ADVANCED APPROACHES IN CIVIL ENGINEERING:

GEOTECHNICS, STRUCTURAL SAFETY, AND SUSTAINABILITY

Editor: ONUR SARAN

BİDGE

BİDGE Yayınları

Advanced Approaches in Civil Engineering: Geotechnics, Structural Safety, and Sustainability

Editör: ONUR SARAN

ISBN: 978-625-8995-32-9

1. Baskı
Sayfa Düzeni: Gözde YÜCEL
Yayınlama Tarihi: 2026-03-25
BİDGE Yayınları

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

Sertifika No: 71374
Yayın hakları © BİDGE Yayınları
www.bidgeyayinlari.com.tr - bidgeyayinlari@gmail.com
Krc Bilişim Ticaret ve Organizasyon Ltd. Şti.
Güzeltepe Mahallesi Abidin Daver Sokak Sefer Apartmanı No: 7/9 Çankaya / Ankara

PREFACE

Civil engineering is undergoing a profound transformation driven by the need for safer structures, smarter design approaches, and a stronger commitment to sustainability. Rapid urbanization, increasing exposure to natural hazards, and the global demand for efficient use of resources have pushed the discipline toward more advanced, integrated, and innovative solutions. In this context, the book "Advanced Approaches in Civil Engineering: Geotechnics, Structural Safety, and Sustainability" aims to contribute to the evolving body of knowledge by bringing together contemporary research and practical insights from key areas of the field.

Sustainability serves as a unifying theme throughout the book, bridging geotechnical and structural perspectives. The contributions emphasize environmentally responsible engineering practices, life-cycle thinking, and the importance of interdisciplinary collaboration in tackling today's complex engineering challenges.

This book is intended for researchers, graduate students, and practicing engineers who seek to stay informed about the latest developments in civil engineering. By combining theoretical advancements with practical applications, it aspires to serve as a valuable reference and inspire further innovation in the field.

İÇİNDEKİLER

ASSESSMENTS OF INCIDENT TYPES HAPPENED IN TUNNELS 1

MEHMET KEMAL GOKAY

YENİLİKÇİ ZEMİN İYİLEŞTİRME YÖNTEMLERİ: ATIK VE BİYOMALZEMELER İLE SÜRDÜRÜLEBİLİR GEOTEKNİK UYGULAMALAR 37

YEŞİM TUSKAN

SEISMIC PERFORMANCE ASSESSMENT USING FRAGILITY ANALYSIS OF OLD, MODERN, AND RETROFITTED RC BUILDINGS 64

MUHAMMED NADİR OLABİ

BOŞLUKLU BETONARME DÖŞEMELER VE KULLANIM ALANLARI 89

FIRAT KIPÇAK

ÇİMENTOLU MACUN DOLGULAR VE MADEN ATIKLARIN SÜRDÜRÜLEBİLİR KULLANIMI 106

BAYRAM ATEŞ, MOHAMMAD AZİM EİRGASH

BÖLÜM 1

ASSESSMENTS OF INCIDENT TYPES HAPPENED IN TUNNELS

Mehmet Kemal GOKAY [1]

Introduction

Underground excavations which have been known due to underground mines, especially coal mines, had been problematic work & workplace until the 50s. However, regulations and strict mine operation Acts have decreased the accidents. Currently underground spaces have not been mentioned only for the mining operations, they could be urban underground spaces, (UUSs), opened & used for different urban based requirements. When the factors are listed for the safer urban underground space, (UUS) including metro tunnels & stations, stability conditions of them and surrounding rock masses have rarely been mentioned in public flypapers. Safe work&workplaces perceptions for tunnels usually handled by "Fire" and "Security" related offices & departments of governments and municipalities. However, as Bergmeister &

[1] Prof. Dr., Konya Technical University, Mining Engineering Department, Konya/Turkey, Orcid: 0000-0003-3792-9414, mkgokay@gmail.com

Francesconi, (2004), wrote earlier that tunnel accidents happened in *"major alpine road tunnels - Mont Blanc between France and Italy), Tauern in Austria and St. Gotthard in Switzerland - in which some 62 persons died",* shaped a trauma especially in European countries. Thus, as these authors pointed out, *"traffic safety in tunnels has become a burning issue for the public, politicians and experts"*. When addressing safety issues, including traffic safety in UUSs, factors contributing to fatalities such as passenger behaviour, traffic congestion, climate impacts, and the structure & design of tunnels must also be considered. In certain cases instability of metro tunnels are the reasons causing unsafe work&workplace conditions and unsafe tunnel operations. Incidences related to tunnel accidents & collapses, (Calvi, 2025), for example cause their deep suffering on the whole societies. When the tunnel accident statistics related to their constructions & operations are under consideration influences of tunnel fires & other incidents on the tunnel linings (support systems) and tunnel structures are important.

On this account, summary provided by Cornelia, (2007) through the "Swiss Council for Accident Prevention", (Schweizerische Beratungsstelle für Unfallverhütung (Hrsg.), Salvisberg, et al. (2004) can be meaningful. Cornelia (2007) wrote that based on "Swiss study on safety in road tunnels (2004)" the following results related to tunnel stabilities can be deducted; *"The risk of a collision in a tunnel and the risk of being injured or killed in an accident rise with increasing traffic intensity and decreasing distances between vehicles"*. According to the author, these Swiss's *"results are supported by the Austrian study on tunnels with uni-and-bi-directional traffic"* by Robatsch & Nussbaumer, (2004). Salvisberg, et al. (2004) also pointed out that accident risk is higher for single-tube tunnels (with bi-directional traffic) than twin-tube tunnels (with uni-directional traffic). Statistical outputs related to traffic accidents in tunnels are then expected to be available for each country for their evaluation to lead regional master-plan efforts and

insurance company policies. Thus, traffic accident ratios in tunnels and their unexpected impacts on tunnel structures (through fires & other damages) are consequently required to be evaluated to provide further "precautions and related plans" for safer tunnel operation conditions in future.

Lin & Chien, (2021) for instance wrote about the critical accidental fires in tunnels by supplying 100 cases of them in a list (covering the time period between 1949-2016) by mentioning the possible causes of the fires and damages, (driver, vehicle, tunnel related). They provided the rations of these causes as; technical problems related to vehicles: 39 %, collisions: 35 %, carried goods: 6 %, and other factors: 20 %. Actually, all the tunnels have basically been opened to serve its transportation related activities. Incidents including fires, floodings, earthquake impacts, accidents, etc. which could be happening in tunnels and cause unexpected outputs for urban societies should also be analysed for their influences to urban areas' "zero datum level" related deformations and stabilities of UUSs. Thus, Acts & Regulations related to UUSs should then include their influences on nearside structures (in/on Earth's crust) including their planning, exploration, excavation, construction, instrumentation, operation, monitoring, maintenance, servicing steps in a more detailed manner.

These influences (differentiations in local deformations, subsidence, in-situ stress-strain states, etc.) could then be planned to be monitored to coincide with the stabilities of available UUSs including tunnels. There are methods for instance, including fibre-optic cable instrumentation, (DFOSs, Distributed fiber optic sensors). DFOSs provide signals to capture any change in strain and temperature along its length, (over long distances). They can be attached on tunnel peripherals or selected ground surfaces at specific (urban/countryside) positions for monitoring purposes, (Inaudi & Walder, 2019; Zhang, et al. 2024).

Stability considerations for tunnels

The rock masses that form almost all of the Earth's crust exhibit differences not only in their formations, (orogenesis of geological structures) but also in their strength and porosity properties. The stabilities of natural voids, cavities, and caves within rock masses, as well as the stabilities of underground spaces excavated by humans, are now crucial for both urban planning and urban life, as well as rural lands. This issue of stability, which was not given much attention 100 years ago, has become a significant concern in recent years due to the increase in the number of underground tunnels. The increase in the number & length of underground tunnels, and the growth of underground settlements have necessitated improved safety measures to ensure the well-being of the people using them.

During the formation of rocks, the porosity and permeability properties of rock masses differ, and their mechanical strengths and behaviours vary as well. Differences in the void structures of rock masses affect their properties as reservoir rocks for groundwater and other natural liquids & gases. The stability of these voids&cavities, including cave-scale sizes become important as production of liquids&gasses from these reservoir rocks can cause deformations, (subsidence), at the Earth's surface. Subsidence caused by UUSs, underground mine operations, and collapsed caves are also problematic cases for human settlements and natural countryside.

One of the significant factors influencing the formation phases of void spaces in micro and macro scales in Earth’s crust is 3D in-situ stresses. When considering 3D in-situ stresses occurring in the Earth's crust; it was written by Griggs, (1939), that gravity causes main 3D in-situ stress-states. Furthermore, other sources of in-situ stresses are caused by; such as: Polflucht forces (described by Wegener, 1924), Coriolis forces (Griggs, 1939), continental drift caused by magma cycles, forces developing due to thermal condition

changes and chemical reactions in the Earth's crust, etc. The stress-strain states in Earth's crust have their differentiations due to the influences of these stress sources. Consequently**,** 3D in-situ stresses vary in quantity and direction at different locations and depths in the Earth's crust, (Fairhurst, 1968; Zang & Stephansson, 2009; Stephansson & Zang, 2014; Zhang, et al. 2021; He, et al. 2024; Gokay, 2025a). When considering in-situ stresses in the Earth's crust, it is also expected that these stresses change in 3D directions over time, (at constant or varying rates). These stress conditions affect rock masses, and cause them to fracture (or fold) depending on their strength properties, [which change also in time, (creep, time-dependent strength behaviours), (Bieniawski, 1970; Lajtai, 1991; Malan, 2002; Barla, et al. 2008; Paraskevopoulou, 2021; Gokay, 2025b)], in depths of Earth's crust. The formation and propagation of rock fractures are then affected by these 3D in-situ stresses, along with temperature and groundwater related effects. These are the main determining factors that disrupt the stability of rock masses through their fractures. For these reasons, it is natural for rock masses, (which have different structural properties and influenced by different 3D in-situ stresses), always have voids and discontinuities (cracks, faults). In other words, the presence of fractures, faults, weakness zones, etc., in the Earth's crust is natural conditions and all of them are forced to expand their dimensions under the influence of 3D in-situ stress states.

In these natural 3D stress-strain states and rock mass strength conditions, (which are dynamic in characters and changes continuously in time), excavations related to UUSs including tunnels should be performed without causing any negative circumstances. This is the expectations of societies and these expectations additionally are extended to UUSs' operation periods. Engineers which provide their professional duties in, *design, excavation, operations, monitoring, maintenance and service,* at tunnelling subjects for consulting & project related companies have to be

equipped with qualified knowledge, engineering, and scientific research background. They have to provide decisions for UUSs which would be under the planning, excavation, operation phases by considering their work&workplace safety and health circumstances as well. All these decisions have to be recorded according to official documentation systems and these decisions cover their legal responsibility extensions according to each country's implemented Acts. Thus engineers in countries should then be ready to follow the rules and Acts directing their professional activities and the responsibilities of engineering decisions.

As it is noted above, all the underground voids, (cavities or spaces) are influenced by 3D in-situ stresses. Induced stresses formed mainly due to these 3D in-situ stress-states are important factors on the stability of these spaces. These influences are time-related and stabilities of the spaces are then influenced also by the time-dependent strength characteristics of the surrounding rock masses. The question always forwarded to the rock engineers is as follows; How long the engineered UUS can be stable enough to supply its services? Time periods considered here in engineering applications can be "less than" or "more than" 100 or 1000 years which are very short time periods when they are compared to the geological eras. Gokay, (2024), summarised the stability related contents & concerns especially for UUS cases. The next question should be asked here is; If it is right to ask engineers to supply full responsibility coverage decisions related to the stability of the UUSs' whole service life. Because stability conditions of UUSs depend on dynamic 3D in-situ stress states and time-dependent strength characteristic of the rock masses. In the conceptual approach, it is known that supplying stability decisions for such a lifetime of the underground spaces cannot be considered reasonable under many coverages of uncertainties. Thus, asking full stability related responsibilities from rock engineers for the metro system tunnels for their construction & operation time periods is not realistic

to be accomplished. Any Act&Regulation which includes such contents should then be reconsidered again to define engineers' duties & responsibilities in more realistic manners on the basis of new developments & standards in rock engineering contents.

Stability failure cases for tunnels

When the subject under consideration is underground spaces, they can be natural; (micro voids, porosity related cavities & micro channels, caves, cave nets, karstic rock structures, etc.), or man-made ones (mine openings, mine stopes, galleries, metro tunnels, UUSs for social-cultural-military-economic purposes). In the last 50 years, road & rail tunnels and metro tunnels are influencing main transportation activities in cities and countryside. In most of the countries life and economic activities cannot be thought of without them. In recent years, it has been numerically verifiable that the number of vehicles and trains in tunnels has been steadily increasing, even for short periods of time. This also means that the number of people using underground tunnels is also increasing over time. These people (passengers, workers, shop-keepers, employers, employees, etc.) are present in underground tunnels or subway systems temporarily or for full working days. Accidents and safety measures in subway tunnels are managed according to factors listed by "Fire" and "Police" departments of countries. These measures are generally precautions taken against incidents such as fires, floods, traffic accidents, incidents caused by technical equipment, explosions, and destructive actions related to human behavior that affect the safety of the tunnels. In the lists of incidents and precautions created within the scope of occupational health and safety procedures, methods of combating the listed incidents are suggested while assuming that the tunnels are already stable. The type of incident missing from these lists is the structural stability of metro tunnels. Actually, the real-world conditions for UUSs (including tunnels) are rather different. As it can be assumed, certainly there is no position in/on the Earth's

crust which can be accepted as stable. Underground spaces even have more influencing factors which deteriorate these UUSs' stability conditions in time constantly. Therefore, engineers must concentrate and supply their full professional efforts for each UUSs, (metro tunnel for instance), stability case. Stability evaluations of tunnels (or UUSs) could be subdivided into the analyses containing the circumstances before and after the tunnel excavations besides the analysis for actual excavation time periods. In engineering operations; all the actions in metro tunnel constructions should be documented, (starting from the first decision taken for tunnelling effort). Projects, plans, operations, excavation steps of the metro tunnel (step by step) should then be documented with related photos and engineered reports which are valuable for archived data sets (and any back-analyses required). Thus metro tunnel stability is of prime importance for any metro line operators and city municipalities which affects many people using the line. That means any collapse occurred in the metro tunnels directly influencing many families using the metro line and the houses and apartments located just above the metro tunnels. That means, the whole society in a local area was influenced in a negative manner. In this situation, the following questions should be considered: Were the metro tunnels excavated safely? Is the stability of these tunnels continuously monitored? Have potential instability events that can be predicted through risk analysis been identified for these tunnels?

When the requirements of the tunnels have been understood by local and national authorities, their plans and realisation have also been started through national or international consultancies. There are complicated legal procedures in most of the countries to start the tunnel projects. Generally, after the project details are clarified, including construction timelines, planned routes and stations, their dimensions, etc., consulting firms (tunnel related companies) submit their plans and designs to carry out the tunnel project. The company (or group of companies) that wins the tunnel construction tender

begins its operations after obtaining the necessary legal permits.The works they have realised in tunnel construction phases are then recorded and reported in daily-shift bases by the company engineers and by the control engineers attended (through the related government offices). Regulations help the monitoring duties of engineers where premium target in the tunnel constructions is providing safe work&workplaces to the employees.

Actually, the datasets related to the rock masses which are going to be tunnelled through the projected operations, must have been collected as detail as possible before the tunnel design steps. In a competitive business environment, whether companies have perfectly completed the relevant design steps before submitting tunnel design proposals to win proposed tunnel projects is always a matter of debate. Private companies are required to present their alternative plans & designs based on data obtained from previous works conducted by central institutions and provided to them. In short, the tender process for tunnel projects involves providing the routes and basic data sets for the projected tunnels, thus initiating the necessary plan and design steps. It should be remembered that the project proposals submitted by private companies logically include their profit-making objectives. In fact, if the relevant state institutions opening the tunnel project tender were to prepare alternative projects (in parallel with the procedures requested from private companies) themselves, it would certainly provide a basis for comparing the projects submitted by private companies and help select the most suitable one.

In conceptual approaches, all the tunnel projects (offered plans and accepted one) should include strict documentation procedures (manners) accomplished through at least two independent authorities (one of them must be realised by the project owners or government authorities for the public safety and rights). Controlling the documentations in daily (or hourly) bases during tunnel excavation periods keeps the tunnel project construction in the planned

schedules. This might also trigger any extra engineering activities needed to increase safety related precautions for the ongoing project construction works. These controlling and monitoring procedures should be organised and followed during tunnel construction and operation phases. Because any engineering incidents happened related to tunnel structures & surrounding rock&soil masses might form unreturnable influences on the tunnel stability conditions. Therefore, engineers working for the tunnel construction or tunnel operation companies must follow the data collection, controlling, monitoring and back-analysing procedures on a daily (or any proper time interval) basis to be sure about the tunnel stability conditions. The importance of these procedures can be better understood by an engineer who reads news reports about a case where the tunnel for the 4th line of the Athens (Greece) metro deviated from the planned route (160 meters of tunnel excavated outside the planned route), (Protothema, 2025). Another example illustrating the importance of control procedures concerns a construction project in Istanbul (Turkey) where a foundation drilling operation was carried out at the construction site. During this operation, the drilling rig's rod pierced the supports of the metro tunnel passing under the construction site and entered the tunnel near its side wall (Sondakika, 2006). In subsequent years, in another similar incident in a different district of Istanbul, the drilling rig again pierced the metro tunnel during foundation drilling operations, creating a hazard (Sondakika, 2024). These types of incidents in tunneling clearly demonstrate the importance of the aforementioned double-sided work controls during the construction and operation phases of tunnels.

For instance, Lei, et al. (2024) wrote that they analysed the highway tunnel collapses during their operation periods through 155 cases (54 cases from China, 101 cases from other countries). They concluded that *"tunnel collapses in operation period are affected by geological factors, lining factors, and accidental factors"*. They also mentioned the combined effects of the causes as well. According to

them, the main reasons for the collapses were realised due to *"the post-lining cavity, lining crack expansion, and fire"*. Example for the tunnel lining failure was reported as one of the important highway tunnel collapses which was reported from Sasago tunnel in Japan on Dec. 3th 2012, (BBC, 2012). According to the news, 150 tunnel supporting panels (20 cm thick, 1.2 tonnes) collapsed on 3 vehicles passing through it at 08:00 o'clock. In this event fatalities were 9, and injured were 2 people, (Wikipedia, 2026a). These basic information about the tunnel incidents, extracted from the collected studies, highlight the vital importance of engineering work in tunnelling. To prevent accidents and loss of stability in tunnels, all project stakeholders (government departments from different ministries, engineers, public officials, private companies, etc.) must strictly adhere to the *exploration (data collection) - excavation - supporting (lining) - operation - monitoring - maintenance - servicing - etc.* procedures related to tunnelling. As with all engineering activities, achieving a long-lasting, (stable), tunnel in tunnelling projects involves numerous steps that must be carefully executed. Therefore, tunnel safety and stability begin with well-organized and directed planning - implementation - monitoring activities carried out by engineers under well-defined work & workplace conditions.

Assessment of tunnel incidents

The number and characteristics of accidents (collapses, failures, support collapses, floorheaves, etc.) occurring in tunnels which have been officially reported, provide valuable information for researchers using these publications. However, it is also known that some small-scale incidents not covered by insurance-documents during tunnel construction & operation may not be included in official reports. Considering the stability of tunnels, data related to tunnel construction & operation, (as well as the behaviour and deformation of surrounding rock masses before and after tunnel

construction), should always be readily available for research on their stability and characteristics. Therefore continuous collection of these data over time is crucial for evaluating potential problems arising from tunnel collapses or failures. Due to data protection regulations of countries, only limited data is shared regarding certain events, including stability incidents in tunnels. Despite these conditions, data collected from official websites of countries' tunnels related institutions has created databases together with the data supplied through the voluntarily provided by companies or organizations responsible for tunnel constructions in those countries. Therefore, statements, declarations, commentaries, explanations, descriptions, or collected database related information included in the publications have been acknowledged with appreciation to understand tunnel failures (incidents) through their reported cases.

For instance, Javid (2026) wrote the following statements to present commuter numbers of "The London Underground" and the tunnels used for them. He noted that "*over a billion passengers annually travel through a labyrinth of tunnels, some dating back to Victorian times*" in British history. As all the commuters and employees of these metro systems know already, *"extraordinary operational complexity, combined with the catastrophic consequences of any failure, creates an environment where mediocrity simply isn't an option"*. According to the author all the employees have been asked to follow the required duties on standards which have been developed through "*hard lessons learned over 160 years of operation*". Actually the following words given by him summarize the importance of the works followed; "*tragic incidents that reshaped safety culture, and the recognition that millions of lives depend on flawless execution every single day*".

In the same engineering consideration, Bergmeister & Francesconi, (2004) presented a study, (Risk Analysis of Accidents in Tunnels), results performed by the United Nations Economic Commission for Europe, UNECE. In this study "*176 cases of*

accidents involving trains in tunnels or underground railways" were analysed and the following rates were pointed mainly for the evaluated causes of incidents; fire: 45 %, collision: 27 %, breakdown: 9 %, not reported: 7 %, others: 5 %, collision & fire: 3 %, explosion: 3 %, breakdown & fire: 1 %. These main incident percentages illustrated the case differences that happened in tunnels in numbers in which responsible engineers might have their options to think about their influences on tunnel stability circumstances as well. All the underground spaces including tunnels have been influenced by all the vibrations reached to them. These vibrations could be sourced due to sudden rock shearing (earthquake shocks are included) and other sources like machine related or blast originated. In this point the statement supplied by Hoek & Karzulovic, (2000) presents the importance of the engineering works surrounding the underground spaces. They stated that under heavy blasting in large-scale open-pit mines, the disturbance zone of the rock slope can extend up to 100 m behind the last row of charged boreholes. Actually, influences of surface operations which originate low and high level vibrations can be detected in nearside tunnels. Level of the vibrations are decision parameters here if they are harmful or permissible in certain limitations, (Hiller, 2011; Gokay, 2023). Since tunnel incidents are widely acknowledged as an inherent risk, engineers engaged in tunnelling activities must be prepared to carry out rescue operations when required, much like in mine rescue services. Therefore, for both private companies and public institutions involved in tunnel construction & operation, the organization of dedicated rescue teams, and the regular practical training & drills of these teams for tunnels, are factors that can significantly influence the severity and consequences of tunnel-related accidents.

Lance & Anderson, (2009), wrote that tunnel construction activities "*particularly in urban areas, has the potential to be one of the hazardous forms of civil engineering construction work*". They

analysed the data related to tunnel constructions and provide their deducted outputs for engineers to evaluate their plans combining surface and underground man-made structures together with the natural features of the rock & soil masses characteristics. Lack of daily bases of documentation for tunnel construction works including engineering supervisions and recording the required features cause absence of data for the back analysis whenever needed. Therefore data collection efforts for underground construction projects including tunnels should better be handled by project owners and construction companies definitely under official recording procedures independently but also by third party engineering groups (companies, organisations, etc.). This manner could have possibly been an important documentation method for any sudden unpredicted, unprecedented, failure or collapse case which might have occurred if it was followed before. Then the tunnel failure events and their reasonings could then possibly be back analysed through these 3 independent data sets which is expected to minimise (or eliminate) any deliberately included facts & numbers (or systematic unpurposed biases in engineering applications). Engineers in general prefer to follow scientific facts and engineering practices defined through standards & specialties. Earlier practices in different projects of tunnels in different Earth's crust locations included their plans, explorations, designs, excavations, supportings, constructions, instrumentations, operations, monitoring, etc. applications. If all these practices had been documented in numerous data-sets and when their content are included into the back analyses of successful (or failed) tunnel projects, tunnel collapses and other failure types influencing tunnellings are expected to be evaluated more intensely. That means all the countries should have their own database including mentioned 3 expertise documentation for each particular: i) well defined tunnel project, ii) tunnel failure, iii) tunnel collapse documentations, iv) documentation of work&workplace safety implementations etc. Only in this type of engineering decision

condition might provide healthy engineering decisions. In this content, the statements given by Idris, et al. (2004) also pointed out the direction for engineers dealing with UUSs. These authors wrote that instabilities happening at underground spaces are "*a major cause of undesirable accidents*". As the experienced engineers and researchers could feel deeply; Idris, et al. (2004) noted also that "*experience feedback is one of the useful methods available to improve the design of construction*". Improvements in technology, work&workplace conditions and engineering understanding beside the rock masses' behaviours could also be included into the factors of logical explanations of the accidents that happened. Following conditions from the example cases, (construction of two Saint Gotthard tunnels, Switzerland), are specified here as Fillat, (1981) presented, (Idris, et al. 2004): a) Saint Gotthard railway tunnel period (1872-1881): workmen: 2500-4000:, wounded person: 260, fatal accident: 177; b) Saint Gotthard road tunnel period (1969-1980): workmen: <700, wounded person: 25, fatal accident: 12.

Similarly, Idris, et al. (2004) wrote openly that tunnels "stability depends firstly on the underground geotechnical, geomechanical and hydrological conditions, then it depends on the construction method and finally on the geometrical characters of the concerned construction itself". The authors set a database in 2002 and included 210 instability events from international references. They collected 21 parameters (variables) for each event reported there. At the end of their analyses, "the geotechnical cause (soil and rock quality and behaviour)" was determined as the cause which "can explain the major part of accidents". As a major part of the Earth's crust, rock masses have many types of discontinuities, weakness zones, and rock minerals as many types of complex solid structures. Rock masses' properties and behaviours have then been differentiated according to their complexities.

In rock mechanics uncertainties play import inheritances on supplied engineering decisions. When uncertain circumstances of

rock&soil properties need to be explored, Spackova's study (2012) can be an example. She wrote, for instance, "*estimates of uncertainties and risks of the construction process are essential information for decision-making in infrastructure projects".* Therefore documentation of tunnel failures & collapses together with their datasets including rock&soil masses properties (covering and explaining unavoidable uncertainties about the laboratory & field tests and observation results) are essential for the lessons learned for the further tunnel engineering works. Researchers, engineers, institutions, etc. in different countries collect similar data for tunnels to perform further analyses in different expertises. Lance & Anderson, (2009) were the ones who performed their analyses to illustrate all the possible foreseeable risks of tunnel construction incidents *"to promote safer construction and improve the perception of risk".* They wrote that *"the important starting point in determining the likelihood of a particular risk is a broad examination of past history".* Development in tunnelling applications has led to performing tunnel works in more mechanised conditions. Due to the requirements of tunnels, the number of new tunnel projects have been increased in time. According to the authors, *"a significant number of incidents have occurred"* during tunnel construction phases as well. They noted about these tunnel incidents that *"unfortunately the published information often provides few detailed case studies".* According to them, *"insurance sensibilities and the influence the information might have on subsequent civil litigation*" are the reason in these circumstances. The authors pointed that since some of the tunnel incidents had been *"investigated and forensically examined"*, their published data *"in incidence report issued*" in legal procedures are become the source information like as the cases of; Penmanshiel tunnel, UK, (1979); Heathrow airport tunnel, UK, (1994); Circle-line, Singapore, (2004).

The common engineering projects related contract situations, (duties and responsibilities according to applied Acts&Regulations),

have certain obstacles in information collection circumstances (on the basis of data protections) which should be re-regulated to increase document sharing through legal manners (procedures, backgrounds). In such conditions, engineers might have more case studies for tunnel behaviours opened in different rock masses. Currently, the outputs supplied through the database collected by researchers are available. Lance & Anderson (2009) for instance provided information and their analyses about 312 tunnel incidents. Their statistical analyses included; i) number of events in every 10 years of grouping since 1970; ii) number of events distributed in sub-groups of excavation methods (NATM *(The New Austrian Tunnelling Method)*, shield, TBM *(Tunnel Boring Machine),* cut&cover, other&unknown) according to defined 10 years of grouping; iii) number of events distributed in sub-groups representing the masses surrounding the tunnels (rocks, soft ground, mixed, unknown). The authors reported the number of "unplanned total incidents" as 60 for the tunnels excavated in rock masses, [in between 1970 to 2009 (end of the writing-up stage of Lance & Anderson (2009) paper)]. The same number was given as 149 for soft grounds. The authors reported the recorded total fatalities in the total 312 tunnel incidences as 272. When information has been collected regarding unplanned tunnel events, *(including: i) the number of fatalities; ii) the collapse or failure of surrounding rock and soil masses; iii) damage to, or loss of, excavation-related machinery and equipment; and iv) damage to the integrity and confidence of ongoing tunnel projects),* it is often retained by tunnelling companies and state authorities rather than being disclosed. This reluctance arises because such information may be used in legal proceedings, potentially leading to further disputes among the parties involved in tunnel construction projects when addressing the consequences of such incidents.

However, the current lack of data sharing on tunnel incidents should not persist. From an engineering perspective, data relating to

both the positive and negative impacts of tunnel incidents should be systematically analysed in order to improve precautionary measures for future tunnelling projects. Thus, any work including survey results of tunnel incidents is a valuable asset which should be more and more for better understanding of the UUSs stability and other incidents in detail. Information supplied by the "*Geotechnical Engineering Office*" of Civil Eng. & Development Department, Hong Kong, (CEDD, 2012), included 52 tunnel failure cases (between 1964 and July 2012) which happened outside of the Hong Kong and 6 more cases from Hong Kong (up to Oct. 2012) as well. The lists and basic causes of the tunnel collapses&failures presented in these reports have increased the awareness of the safety&stability issues of tunnels.

Spackova, et al. (2013) wrote about the probabilistic approach to assess the tunnel construction performance. They noted that "*the probability of construction failure events and the delay caused by such failures*" could be estimated through "*databases available in the literature*". They supplied their estimated tunnel collapse numbers according to their study. They used global data, (HSE, 2006; Seidenfuss, 2006; Stallmann, 2005; Sousa, 2010), related to tunnels and their collapses for the years between 1999-2004. According to their graphed values; [a) total length of constructed tunnels (HSE, 2006), b) total length of mined tunnels (estimated), c) number of collapses (reported)] for the type of tunnels are presented as follows accordingly for: *Road tunnels [a) ~2000 km, b) 1320 km, c) 13 cases]; Rail tunnels: [a) ~4200 km, b) 2770 km, c) 25 cases]; Water-Sewerage tunnels: [a) ~2100 km, b) 1390 km, c) 9 cases]; Others: [a) ~450 km, b) 300 km, c) 1 cases]*. Total numbers for the given time interval (6 years) are given then: [a) ~8750 km, b) 5750 km, c) 48 cases]. These values actually present the importance of the tunnels worldwide for their influences on societies.

Organisations, departments, or ministries in government offices in countries prefer to supply statistical survey values for

tunnels without pointing to the incidents which had happened for the selected time periods. Tunnels under operation in Turkey, for instance, are given at official web page of KGM, (General directory of highways, Turkey), as follows: the total number of intercity road tunnels was 455 and total length of them was 428.43 km, (KGM, 2026). There are additionally motorway tunnels in Turkey and their total number was 43 and total length of them was 96.25 km, (KGM, 2025).

As, Sousa, (2010), noted that tunnel construction has "*intrinsic*" risks because *"it involves the subsurface, which is largely unknown"*. Unplanned incidents happened in "*tunnelling projects have resulted in delays, cost overruns*", and even fatalities. Thus, assessing and managing the risks in tunnelling (include; plannings, exploration, designs, excavations, constructions, mechanisation, instrumentation, operations, maintenance, servicing, etc.) are then vital for workers, engineers, contractors, project owners and most importantly the commuters (people) of these tunnels in further years. These were the reasons certain studies had been started to analyse parameters to visualize the problem. Sousa (2010) performed one of these studies through the evaluation of certain data from *"204 cases of major problems"* at tunnel construction sites. She noted *"geographical distribution of the tunnel cases*" as follows; Europe: 105 cases; Asia: 61 cases; South America: 23 cases; North America: 11 cases; Australia: 3 cases; Africa: 1 case. She supplied incidence distribution according to type of tunnels and their excavation methods which were re-analysed and presented after combining information from other data sources (Spackova, et al. 2013). However, one of Sousa's (2010) graphs that pointed out the "*undesirable event distributions*" in the collected 204 tunnel cases demonstrates the importance of the stability analyses through the rock mechanics concept. These events were reported as; collapse (36 %); daylight collapse (28 %); excessive deformation (11 %); flooding / large inflow of water (9 %); rockfall (7 %); specific

locations (6 %); others (2 %); rockburst (1 %). The author defined the "Daylight collapse" as: "*heading collapse / lining failure of the heading that reaches the surface creating a crater*". In later years, Sousa & Einstein, (2021), provided "*accident type distributions*" for tunnelling through *"a database of tunnel accidents that occurred during construction containing 206 cases that were collected from a combination of literature review, newspapers, and correspondence with tunnelling experts around the world*". These authors provided an explanation, as well, about the contents of the data and they wrote that the data "*the most frequently reported in the literature and by the experts because most likely they are the ones with more severe consequences on the construction process, the safety of the workers and people and structures on the surface. Thus, they may not be the "actual" most frequent accidents during tunnel construction".* The following categorised numbers, "*are probably the most common type of accidents during the operation of tunnels. They can also occur during construction but are less frequent*". Then, the *"accident type distributions*" rates supplied by Sousa & Einstein, (2021), over totally 189 cases were as follows: collapse (41 %); daylight collapse (28 %); excessive deformation (10 %); rockfall (7 %); flooding / large inflow of water (6 %); specific locations (5 %); others (2 %); rockburst (1 %). The ratios were forwarded as important event numbers for tunnel construction cases by Sousa (2010) and Sousa & Einstein (2021). It is interesting that *"tunnel stability*" related events in them consisted of; 83 % of the whole 204 incidences analysed by Sousa (2010), and 87 % of the whole 189 incidences analysed by Sousa & Einstein (2021).

Similar study supplied by Zhu, et al. (2022), and they provided their statistical analysis outputs for "Major Tunnel Construction Accidents", MTCA, *"in China from 2010 to 2020*". This evaluation was performed on the basis of 48 major tunnel construction accident cases. MTCA was defined here for the accident case including fatalities *"more than 3 deaths*". The authors supplied; *[a) MTCA*

incident numbers; b) fatalities; c) the ratio indicates number of fatalities per MTCA incident] values according to the type of MTCA as follows; Collapse [a) 31, b) 172; c) 5.55]; Explosion [a) 8, b) 69; c) 8.50]; Water inrush [a) 6, b) 35; c) 6.33]; Suffocation/Fire [a) 2, b) 9; c) 4.50]; Rockburst [a) 1, b) 3; c) 3.00].

Rock and soil mechanics considerations then cover the stability evaluations according to the type of medium surrounding the tunnels under construction. Actually, stability considerations for any underground spaces including tunnels must be analysed for their excavation and operation periods. Especially operation periods of tunnels have been planned for long-time periods. Therefore time-dependent and different loading rate (stable, increasing/decreasing rate, undulating, dynamic-quakes shocks, etc.) behaviours of surrounding rock&soil masses of tunnels become significant to be analysed for tunnels' stabilities. Ladanyi, (1993), mentioned that "*available field evidence*" and pointed out that "*ground pressure*" (induced stresses) on tunnels' supports depends on; the rock mass properties, natural stress conditions (primary in-situ stresses), the type & the rigidity of the tunnel supports, influence of nearsite underground spaces, and the time of support installation, where induced stresses differ with time after installation due to: i) "*advancement of the working face of the tunnel",* and ii) *"time-dependent changes in rock mass response, caused by consolidation, swelling, creep and weathering effects*". Thus, government authorities (offices) related to tunnel works (including plannings, project handlings, accepting the finished tunnel project for their operations, monitoring the tunnels during their operation periods, etc.) must be systematised by Acts & Regularities accordingly to direct groups of engineers in companies (or at government offices) who analyse the data and control the stability conditions for the tunnels in their planning, excavating, constructing, operation, monitoring phases. At each phase, surrounding rock & soil masses' mechanical behaviours are important for tunnels and these features

directly depend on strength characteristics and loading conditions of them, (which include numerous uncertainties to be handled as well). The words written by Spackova (2012) are needed to be noted here. She noted "*in tunnel construction, a significant part of the uncertainty results from the unknown geotechnical conditions*". She was pointing out rock&soil mechanics subject related to Earth's crust materials which are mostly rock masses for underground spaces. Heterogeneous property differentiations and discontinuity distribution in rock masses provide uncertainties in measured and observed features of them through the tests. However, development in rock engineering context have helped to decrease their influences on the outputs of the projects on/in the rock masses. Spackova (2012) wrote about the subject, covering "uncertainties in the tunnel projects". She classified them into two groups; i) "*usual uncertainties in the course of tunnel design, construction and operation*" phases. ii) "*occurrence of extraordinary events (failures) causing significant unplanned changes of the expected projects development*". Any parameters influencing the tunnelling activities in their planning, excavation/construction, and operation phases would like to be determined in detail. But some of these parameters have uncertainty in their natural occurrences. Spackova (2012) supplied these parameters under the two sub-group titles, (as; usual uncertainties and extraordinary events), as defined above together with "*performance parameters in the tunnel projects*". She added that "*the usual uncertainties influence extraordinary events*". Therefore, in the modelling works she then preferred to differentiate uncertainties in two categories as Der Kiureghian & Ditlevsen (2009) claimed: i) Aleatory uncertainty *("natural, intrinsic randomness in the analysed system, which cannot be reduced"),* and ii) Epidemic uncertainty *("resulting from incomplete knowledge of the system and it can be reduced when additional information is available").*

For the parameters influencing tunnel phases (design, exploration, excavation, supporting, construction, instrumentation,

operation, maintenance, servicing), there are always descriptive, known, parameters which have their engineered explanations (to a certain degree) for their influences on rock&soil behaviours. However, there are some other parameters which are known but their impact on the projects have not been clearly estimated yet. For instance; discontinuity related parameters (continuity, aperture, geometries, fillings. weathering, roughness, discontinuity surface compressive strength, contact area during shearing, etc.), strength properties & behaviours of rock masses and their distribution in them, etc. are some of them. These factors can not possibly be followed in rock masses. Thus, engineering projects including rock&soil masses naturally have many factors uncertain and they can only be managed in those projects through; expertises, observations, survey analyses, classifications, index values, ratings, etc. Since they are not an actual explanation of these masses' behaviours, there are always possibilities of unpaired decisions among the ratings and decisions following these descriptions for a projected engineering work. Accepting these uncertainties and conducting the projects is a one way road while minimizing all their influences. Because, (currently), there is no alternative method to handle these uncertain parameters in full coverage. However, development in technology and scientific researches have decreased the unknown factors of engineering projects realised in/on Earth's crust. But there are still many more uncertain parameters waiting to be researched. In an honest, people-oriented, and sincere engineering environment (which should be addressed through legal regulations), the uncertainties inherent in engineering project contracts should always be discussed. These uncertainties (many of which arise from the properties of natural rock masses) should not be treated as an excuse (a loophole) for potential failures during the construction and operation phases of tunnels. Therefore, researchers and engineering working groups (those working in government offices, consulting firms, engineering companies, insurance companies, etc.) aim to use

the experiences gained from past events to improve future engineering projects. The primary goal here is to minimize tunnel failures/problems in order to reduce loss of life, loss of workforce, loss of equipment, limitations on financing & insurance options, etc.

Paraskevopoulou, et al. (2022) wrote that "*the ability to have an insight into the potential failures modes as well as in the likelihood of an occurring failure based on historical records can be of high value to the tunnelling industry"*. They mentioned positive contributions of databases which were prepared to include tunnel failures. However, they also pointed out that *"inevitably, tunnel failures cannot be eliminated, but their impact can be minimised, and the overall risk can be reduced as the incident could be predicted or mitigated"*. Then, they stated the significance of the "The Code of Practice for Risk Management in Tunnel Works" which according to them "*has had a clear positive impact on the annual tunnel incidents and failures during construction"*. As the authors noted, this Code was actually developed and supplied by the "Association of British Insurers and British Tunnelling Society" in 2003, (and it was later converted to an international version in 2006 by the "International Tunnelling Insurance Group, ITIG)". The aim here is to supply the Code which is similar to the other engineering codes in their professions to describe best practices and provide quidances by decreasing (minimisation of) the risk in tunnelling (Goodfellow, et al. 2014; Paraskevopoulou, et al. (2022).

In this related subject, Kim, et al. (2022) wrote that *"tunnel collapse hazard is a key issue in tunnel construction, which should be adequately assessed to prevent economic damage and casualty*". They collected information from 24 tunnel collapse cases, and they offered *"a risk evaluation model for tunnel collapse based on a quantified grading system and influence factors that significantly affected the tunnel collapse hazard"*. Similarly, Shin, et al. (2009) proposed through "Korea Institute of Construction Technology, KICT", a Tunnel Collapse Hazard Index, (KTH-Index) to evaluate

"*the hazard level of collapse at a tunnel face*". The authors checked databases containing tunnel failure information and analysed the relevant parameters obtained from them using neural network and interaction matrix techniques.

Sarna et al. (2022) attempted to reduce uncertainties in tunnel excavations by presenting methods for estimating geological conditions in tunnelling. In engineering terms, these methods and approaches have their own grading systems and aim to reflect situations as similar as possible to actual Earth's crust conditions. These authors indicated also that "*specific tunnelling responses caused by adverse geology are still poorly studied*". According to them these adverse cases are *"karstic caves and fault zones*", and they offered a methodology to "*identify and predict the potential collapse of TBM tunnels in rocks*". The unplanned incidents in tunnelling have their negative impacts on work&workplace conditions of tunnel constructions&operations. So, Endicott, (2015) wrote that "*safety is fundamental in Civil Engineering, yet failures happen*". The author explained failure cases related with tunnels and set out "*some of the causative factors and explores what lessons have been learned from those cases*". These cases were; a) Edinburgh Tower, basement level collapse during its construction, Hong Kong, (1981), b) Taegu Metro had cut&cover construction type excavation and it had "*extensive collapse of an excavation due to the presence of unidentified strata of sands and gravel*" in South Korea in Jan. 1st 2000, c) Collapse case at Sao Paulo (Brazil) underground railway (metro) station, (related 45 m long excavation and the side of the shaft, (depth=40 m, diameter=40 m), collapsed on Jan.15th 2007). d) Failure at HangZhou Metro on Nov.15th 2008 during its construction phase, (failure events influenced the 45 m length of the tunnel (width=21 m) at 16 m of depth). Beside these cases Endicott, (2015) wrote that "*15 spectacular collapses of tunnels reported worldwide every ten years*". According to his experiences, "*even if a failure of*

a component occurs, the system should be robust enough to withstand the failure of a single component".

In an additional survey, Konstantis, et al. (2016), concentrated also on influences of tunnel related failures. They mentioned the "*losses that the insurance market has suffered in the recent years*". The authors provided a graphical presentation of "*tunnel failures vs ground conditions"* around the tunnels; and *"tunnel failure types distribution*" mainly; tunnel face related failures, support failures, fire, structural, lateral supports, and other causes. Konstantis, et al. (2016) presented insurance costs according to tunnel failure types and they provided; *[tunnel failure numbers & (percentages)],* according to tunnels' construction methods in graphical form for "*total number of projects examined*=68". These values are given for; [Tunnel boring machine: 26 & (38 %)]; [New Austrian tunnelling method: 19 & (28 %)]; [Drill&blast method: 11 & (16 %)]; [Cut& cover method: 5 & (7 %)]; [by Hand: 4 & (6 %)]; [Roadheader method: 3 & (5 %)] by using information from IMIA, (2006); CEDD, (2015); Wannick, (2006); and Reiner, (2011).

Another authors group including Li, et al. (2018), had presented their efforts to classify tunnel collapses. They differentiated several facts which categorised the tunnel collapses. These facts are: "*type of tunnel, cause of collapse, speed of collapse, location of collapse in the tunnel, scale of collapse (including length and volume), form of destruction, economic loss and casualty, time-related characteristics*". They also classified tunnel collapses according to their locations as; "*mountain tunnel collapses, urban tunnel collapses or submerged tunnel collapses*". Their descriptive groupings for the tunnel collapses were different as follows; "*sudden collapses, intermittent collapses or slow deformation collapses; tunnel portal or tunnel truck collapses; minor collapses, medium-size collapses or large-scale collapses; local collapses, arch collapses, irregular collapses, penetration collapses; general collapses, large collapses, very large collapses,*" etc. Similarly,

Spyridis & Proske, (2021) worked on tunnel collapses and they revised the tunnel collapse frequencies by analysing 321 tunnel collapse cases and supplied data presenting the countries' tunnel stocks. According to these authors, there are more than 51K tunnels worldwide, where the top countries having more than 1K tunnels were listed by them as; China (27K), Japan (16K), Norway (2.35K), Korea (1.5K), Germany (1.5K), Switzerland (1.3K). They wrote also that "*extensive statistics indicate that most tunnel collapses occur during construction*". The following output forwarded by them is also one of the facts they had evaluated for tunnels: "*events such as earthquakes and floods, which are the major causes of collapse of other structures, account for only about 10 % to 20 % of all tunnel collapses*".

Another study provided by Paraskevopoulou, et al. (2023) has a statistical approach to understand tunnel related parameters of tunnel failures. The authors defined the *"technical risks based on a database with approximately 400 tunnel failure cases*". Since the selected excavation methods for a specific tunnelling project depends on the rocks & soil masses, the failures encountered in tunnel construction have certain engineering explanations related to them as well. According to the authors, 64 % of the observed tunnel failures were recorded for the rock tunnelling cases. The others, 36 %, was observed at soil tunnel construction sites. They pointed out that the tunnelling&construction method has an impact on failure of tunnels. The percentage level showing *"distribution of tunnelling (excavation) methods examined"* in this study were given by Paraskevopoulou, et al. (2022) as follows; NATM: 48 %, TBM: 34 %, Drill&blast: 14 %, and Cut&cover: 4 %. They also noted that *"all tunnels examined have reported failures during construction*". According to the authors 56 % of the tunnel construction failures were observed in sedimentary rocks (sandstone, shale, marlstone, limestone, chalk). Paraskevopoulou, et al. (2022) defined clearly "*tunnel failures types*" and "*tunnel fatal incidences*" in tunnel

operation phases and reported them as follows: a) tunnel failure types during operations; [fire: 51 %, earthquake: 31 %, support overstressing: 9 %, crown failure: 3 %, fit-out works: 3 % other types: 3 %]; b) tunnel fatal incidents during operations [fire: 90 %, fit-out works: 7 %, other types: 3%]. Paraskevopoulou, et al. (2023) focused on the point that "*fire and earthquakes account for 82 % of the failures during operation*".

When a limited survey has been performed through internet base sources, the numbers (cases) supplied, for instance, under the "tunnel disasters" coverage in Wikipedia, (2026b), have been presented through the following subtitles; i) tunnel disasters: 15 cases; ii) tunnel fires: 11 cases; iii) railway tunnel disasters; 12 cases; in addition to 13 incidends *(crash, fire, bombing, accidents, deliberate attacks, derailment, signal fault, etc.)* involving the "London Underground System". Moreover, "Evening Standard news" had a report on tunnel collapse on Feb. 24th 2025. It was about "*the tunnel in Srisailam left bank canal (SLBC) project*" in Telangana, India. In this news-report major underground space related events happened in India & Thailand were listed as follows; Mandi tunnel collapse, Himachal Pradesh, (2022); Silkyara Bend-Barkot tunnel collapse, Uttarakhand, (2023); Assam coal mine flood, Dima Hasao, (2025); ThamLuang cave incidence due to flooding, Thailand, (2018). The statement forwarded in this news has its vitality for the other UUSs' related excavations-construction-operations as well. The note was as follow; *"over the years, India and other countries have witnessed several major tunnel collapses, raising concerns about rescue operations and the need for stringent safety protocols*", (EveningStandard, 2025). Another information source, Sakski Education, (2026), listed the incidents including tunnel "collapses-accidents-explosion-fires" were listed for India as; Baijnathpur-Lohgad road tunnel fire, Maharashtra, (1981); Mhow-Indore road tunnel bus accident, Madhya Pradesh, (1987); Jammu-Srinagar highway tunnel LPG-truck explosion, (1998); Hirakud

tunnel fire, Odisha, (2009); Tanakpur-Jauljibi road tunnel, bus accident, Uttarakhand, (2019); Jammu-Srinagar highway tunnel, bus collision, (2021); Chenani-Nashri tunnel, Jammu and Kashmir, bus collision, (2022); Char Dham tunnel bus collision, Uttarakhand, (2023); In the same web-site 5 major tunnel related incidents in the World were listed as follows; Seikan tunnel derailment, Japan, (1984); Eurotunnel fire, France-UK, (1996); Mont Blanc tunnel fire, France-Italy, (1999); Saint Gotthard road tunnel fire, Switzerland, (2001); Hokuriku tunnel collapse, Japan, (2012).

The tunnel incidents reviewed here summarize the statistical results of them occurring in tunnels, as compiled by various researchers and institutions. It is crucial to remember that these assessments could yield very different statistical results if all accidents and incidents in tunnels were (officially) reported and made publicly available in the world.

Conclusions

As part of urban infrastructure, tunnels are an integral part of city life in many modern cities. In densely populated urban areas, vehicle and rail transportation networks are impossible to plan without tunnels. Tunnels, now an indispensable part of urban infrastructure, are used for various purposes in the economy and incidents related to them would directly and negatively impact the prosperity of nations. Therefore, it is crucial that all parties involved in tunnel constructions and operations are aware of the accident risks associated with tunnel works. Considering the incidents that occur in tunnels (collapses, fires, earthquake impacts, floods, traffic accidents, explosions, attacks & bombing, etc.), the probability of their occurring in different tunnelling phases (planning, exploration, design, excavation, instrumentation, operation, monitoring, maintenance, servicing) is important.

It is a normal duty for engineers to examine earlier work & workplace accidents (& incidents) at UUSs, that have also befallen

tunnel users during the tunnel operation phase. However, detailed documents of past tunnelling experiences (data related to tunnel incidents) should not be expected to be published due to data protection considerations. Databases developed for tunnel incidents by researchers have limitations in the cases and contents for a tunnel stock in the world, which was more than 51K as Spyridis & Proske, (2021) were reported. Commuters travelling through tunnels and UUSs' users (for shopping & working, or living purposes) have their common wonders about the safety concerns of UUSs; If the UUSs are safe and stable? It is normal for them to consider; How are they going out of UUSs, if something unplanned happens? In order to respond to these kinds of questions, it is required to perform risk assessments & analyses for the selected UUSs, (together with the collection of all kinds of input data related to them). National Acts & Legislative rules then should supply conditions to keep all related tunnelling data (including basic simple daily-shift occurences of small events during tunnel construction & operation phases), at least two separate (independent), locations. Re-regulated Acts in the sharing procedure of these data may be the way out for the researchers to use them in their analysis, (statistics, risk, or stability base evaluations).

In some cities, passengers may spend one to two hours per day in underground metro tunnels. Additionally, workers in such environments may also remain underground for eight to nine hours per day. These extended durations, combined with the large and growing number of individuals present in underground spaces, necessitate that engineers give greater consideration to the safety and structural stability of UUSs, (tunnels).

The global history of tunnel incidents has been statistically analysed by researchers to identify the types and underlying causes of such events. Common incident categories include fires, traffic accidents, flooding, structural collapses & failures, earthquakes, explosions, and technical failures, etc. These risks highlight the

importance for tunnel designers, operators, and regulatory authorities to adopt comprehensive safety measures. Potential strategies for improving tunnel safety include: the provision of additional emergency access routes at critical underground locations, the establishment and regular training of specialized rescue teams; and the continuous monitoring and reassessment of tunnel stability and risk conditions. Implementing such measures can contribute to more predictable structural performance of UUSs and reduce the likelihood and impact of tunnel incidents.

While these practices may already be in place in certain contexts, they are not universally adopted. As the member of the UUSs community, (including passenger, parking facility user, retail customer, and employee working within UUSs), individual has the right to be informed about the safety risks associated with his/her time in these environments. Safety management in UUSs cannot be treated in the same manner as in surface-level workplaces. For instance, in the event of an incident in a metro tunnel, the high density of passengers means that the consequences could escalate to a disaster of national significance (think about ten cars metro train with around 3000 commuters in a peak hour travelling). Thus, having an official UUS centres, at the UUSs managements which is responsible from "incidents" and "stability" concerns about UUSs generally would have positive feedback from societies. Thus, having an official UUS centre, at the UUS management which is responsible from "incidents" (including stabilities of UUSs) concerns about UUS generally would have positive feedback from societies.

References

Barla, G., Bonini, M., & Debernardi, D. (2008) Time Dependent Deformations in Squeezing Tunnels, *The 12th Int. Conf. of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG),* Oct. 1-6th 2008, Goa, India.

BBC, (2012) Japan Sasago tunnel collapse killed nine, *BBC News*, Dec.3th 2012, www.bbc.com/ news/world-asia-20576492.

Bergmeister, K. & Francesconi, S. (2004) *Causes and frequency of incidents in tunnels,* Autostrada del Brennero SpA, UPTUN-Work Package, 1-2. *(Project No: GRD1-2001-40739).* Trento (Italy), Feb. 27th 2004, https://www. kennisplatformtunnelveiligheid.nl, *D1.2a Report: Version:12th of March 2004.*

Bieniawski, Z.T. (1970) Time dependent behaviour of fractured rock, *Rock Mechanics*, 2, pp123-137.

Calvi, E.I.A. (2025) Tunnels collapses: Case studies and key failure mechanisms, Doi:10.13140/RG.2.2.10172.76165.

Cornelia, N. (2007) Comparative analysis of safety in tunnels, *European Conf, of Transport Research Institutes-ECTRI, The 3rd Young Researchers Seminar,* May 27-30th 2007, Brno, Czech Republic.

CEDD, (2012) Catalogue of notable tunnel failures - Case histories (up to October 2012), *Civil Engineering and Development Department (CEDD)*, Geotechnical Engineering Office, The Government of the Hong Kong Special Administrative Region.

CEDD, (2015) Catalogue of notable tunnel failures - Case histories (up to April 2015), *Civil Engineering and Development Department (CEDD)*, Geotechnical Engineering Office, The Government of the Hong Kong Special Administrative Region.

Der Kiureghian, A. & Ditlevsen, O. (2009) Aleatory or epistemic? Does it matter?, *Structural Safety*, 31, pp105-112.

Endicott, L.J. (2015) Design and construction of excavations in an urban setting–Lessons learnt from failures, *International conference on geotechnical engineering, ICGE-2015, Aug.10-11th 2015,* Colombo, Sri Lanka, pp57-66.

Evening Standard, (2025) *Deadly cave-ins: A timeline of major tunnel collapses, rescues in past years,* www://eveningstandardin/deadly-cave-ins-a-timeline-of-major-tunnel-collapses-rescues-in-past-years/?utm_source=copilot.com, Retreviewed in Feb. 2026.

Fairhurst, C. (1968) Methods of determining in-situ rock stresses at great depth. *Technical Report no. 1-68*, Missouri River Division, Corps of Engineers, Omaha, NE, US.

Fillat, G. (1981) *La pratique des soles et fondations*, Chapitre 18 (stabilité des cavités souterraines), Edtion de Moniteur, Paris, pp790-806.

Gokay, M.K. (2023) Interaction in subterranean and surface structures, *Inter. J. of Environmental Trends, (IJENT),* 7, 1, pp27-37.

Gokay, M.K. (2024) *Stability consideration in the safety aspects of urban underground spaces,* Chapter in Design, Detection and Analysis in

Civil Engineering, (Ed. Artik, K.), ISBN 978-625-372-538-9, Bidge Publication, Ankara, Turkey, pp5-55.

Gokay, M.K. (2025a) *Considerations in insitu stresses and engineered works,* Chapter in; Maden ve geoteknik biliminde disiplinlerarası yaklaşımlar, (Interdisiplinary approaches in mining & geotahnical science), (Ed. Ozdemir, E.), ISBN 978-625-372-692-8, Bidge Publication, Ankara, Turkey, pp173-214.

Gokay, M.K. (2025b) *Rock strength differentiation in long-lasting loading condition,* Chapter in; Kaya mekaniginden cevher hazirlamaya guncel yaklasimlar, (Current approaches from rock mechanics to ore preparation), (Ed. Ozdemir, E.), ISBN 978-625-372-669-1, Bidge Publication, Ankara, Turkey, pp46-90.

Goodfellow, R., O'Carroll, J. & Konstantis, S. (2014) Can the risk register become a contract document? *North American Tunnelling Conference-2014,* Los Angeles, California, US.

Griggs, D. (1939) A theory of mountain building, *American Journal of Science,* 237, 9, pp611-650.

He, B.G., Li, H.P., Feng, X.T. & Meng, X.R. (2024) Estimating the complete in-situ stress tensor along deep tunnels with frequent rockbursts near a steep valley, *Bulletin of Eng. Geo.& the Env*., 83:1.

Hiller, D. (2011) The prediction and mitigation of vibration impacts of tunnelling, *Proceedings of Acoustics*, Nov. 2-4th 2011, Paper No 5, p8, Gold Coast, Australia.

Hoek, E. & Karzulovic, A. (2000) Rock mass properties for surface mines, *Slope stability in surface mining*, pp59-70.

HSE (Health & Safety Executive), (2006) The risk to third parties from bored tunnelling in soft ground, *Research Report 453. Health & Safety Executive*, HSE Books, Sudbury, Suffolk, GB.

Idris, J., Al Heib, M. & Verdel, T. (2004) *Feedback from a database created for reporting accidents in tunnels and galleries*, Urban Transport (Eds: Brebbia, X.C.A. & Wadhwa, L.C.), WIT Transactions on The Built Environment, WIT Press, p75, www.witpress.com, ISBN 1-85312-716-7.

IMIA, (2006) WGP 48 (06): ALOP/DSU coverage for tunnelling risks? *The 39th Annual Conference of IMIA*, International Engineering Insurance Association, Sep.11-13th 2006, Boston, US.

Inaudi, D. & Walder, R. (2019) Full-length tunnel structural monitoring, *Proceedings of the Structural Health Monitoring*, Stanford, California, US, pp10-12.

Javid, H. (2026) Why London underground training standards are among the strictest in UK-Rail, *London Daily news*, Jan. 27th 2026, www.londondaily.news.

KGM, (2025) *Otoyol tünel envanter bilgileri,* (Documents of motorway tunnel numbers), General directory of highways, (KGM), Web page: www.kgm.gov.tr, Ministry of transport and infrastructure, Turkey.

KGM, (2026) *Tünel envanter bilgileri,* (Documents of intercity tunnel numbers), General directory of highways, (KGM), Web page: www.kgm.gov.tr, Ministry of transport and infrastructure, Turkey.

Kim, J., Kim, C., Kim, G., Kim, I., Abbas, Q. & Lee, J. (2022) Probabilistic tunnel collapse risk evaluation model using analytical hierarchy process (AHP) and Delphi survey technique, *Tunnel. &Undergr. Space Tech.,* 120, 104262.

Konstantis, T., Konstantis, S., & Spyridis, P. (2016) Tunnel losses: Causes, impact, trends and risk engineering management, *World Tunnelling Congress, WTC2016*, Apr.22-28th 2016, San Francisco, CA, US

Ladanyi, B. (1993) *Time-dependent response of rock around tunnels*. Chapter 4, Analysis and Design Methods, pp77-112), Pergamon.

Lajtai, E.Z. (1991) Time-dependent behaviour of the rock mass, *Geotechnical and Geological Engineering*, 9, pp109-124.

Lance, G.A. & Anderson, J.M. (2009) Application of a database of unplanned tunnel construction incidents to promote safer construction and improve the perception of risk, *Forensic Engineering: From Failure to Understanding,* (Ed: Neale, B.S), ISBN:978-072-773-613-0, Proceedings of Two Day International conference, Institution of Civil Engineers, Dec.2-4th 2008, London, UK, pp71-80, Thomas Telford Publ.

Lei, B., Ding, W., Huang, X. & Zhang, Q. (2024) Analysis of tunnel collapse disasters during operation and exploration of disaster damage mechanisms, *IOP Conf. Series: Earth and Env. Sci.*, 1333, 1, 012049.

Li, B., Sun, J., Song, Y., Chu, Z. & Ren, D. (2018) Classification and characteristic analysis of tunnel collapses, *ISRM Int. Symp.-Asian Rock Mech. Symp.*, (pp. ISRM-ARMS10), ISRM.

Lin, C.L. & Chien, C.F. (2021) Lessons learned from critical accidental fires in tunnels, *Tunnel.& Undergr. Space Tech.,* 113, 103944.

Malan, D.F. (2002) Simulating the time-dependent behaviour of excavations in hard rock, *Rock Mech. & Rock Eng*., 35, 4, pp225-254.

Paraskevopoulou, C. (2021) Time-dependent behavior of rock, *Engineering Geology*, p19.

Paraskevopoulou, C., Dallavalle, M., Konstantis, S., Spyridis, P. & Benardos, A. (2022) Assessing the failure potential of tunnels and the impacts on cost overruns and project delays, *Tunnelling and Underground Space Technology,* 123: 104443.

Paraskevopoulou, C., Spyridis, P., Proske, D., & Doulkas, G. (2023) Statistical interpretation of tunnel project characteristics and their

influence on technical risks–current and future challenges, Expanding Underground-Knowledge and Passion to Make a Positive Impact on the World, (Eds. Anagnostou, Benardos & Marinos), pp3250-3257, ISBN 978-1-003-34803-0, CRC Press.

Protothema, (2025) Wrong 160-meter section opened in the Metro tunnel at Katechaki-Restoration order issued by Tachiaos, *Newsroom*, Mar.17th 2025, www.en.protothema.gr.

Reiner, H. (2011) Developments in the tunnelling industry following introduction of the Tunnelling Code of Practice, *IMIA Annual Conference, Sep. 21st 2011*, Amsterdam, Netherland.

Robatsch, K. & Nussbaumer, C. (2004) *Tunnels mit Gegenverkehr und Richtungsverkehr/Tunnels with uni- and bi-directional traffic*, Im Auftrag des Bundesministerium für Wissenschaft und Verkehr. Straßenforschung Heft 539, Bundesministerium für Wissenschaft und Verkehr (Hrsg.), Wien, Austria, p56.

Sakski Education (2026) *Worst tunnel crash disasters in the World and in India*, www://education.sakshi.com/en/general-knowledge/stock-gk/worst-tunnel-crash-disaster-word-and-india-144354?utm_source= copilot.com, Retreviewed in Feb. 2026.

Salvisberg, U., Allenbach, R., Cavegn, M., Hubacher, M., Siegrist, S. (2004) *Verkehrssicherheit in Autobahn- und Autostraßentunneln des Nationalstraßennetzes*, bfu-Report, Schweizerische Beratungsstelle für Unfallverhütung (Hrsg.), 51, p98, Bern, Switzerland.

Sarna, S., Gutierrez, M., Mooney, M. & Zhu, M. (2022) Predicting upcoming collapse incidents during tunnelling in rocks with continuation length based on influence zone, *Rock Mechanics & Rock Engineering,* 55, 10, pp5905-5931.

Seidenfuss, T. (2006) Collapses in tunnelling, *Master thesis*. Fachhochschule Stuttgart, Hochschule fur Technik, Germany.

Shin, H.S., Kwon, Y.C., Jung, Y.S., Bae, G.J. & Kim, Y.G. (2009) Methodology for quantitative hazard assessment for tunnel collapses based on case histories in Korea, *Int. Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 46, 6, pp1072-1087.

Sondakika, (2006) Istanbul: Metro hattinda meydana gelen sondaj kazasi, *Sondakika news*, Aug.10th 2006, www.sondakika. com.

Sondakika, (2024) Mecidiyekoy-Istanbul Havalimani metro hattinda sondaj makinesi kazasi, *Sondakika news*, Jan. 22th 2024, www. sondakika.com.

Sousa, R.L. (2010) Risk analysis for tunnelling projects, *PhD Thesis*, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, Boston, US, p589.

Sousa, R.L. & Einstein, H.H. (2021) Lessons from accidents during tunnel construction, *Tunnelling & Underground Space Tech.*, 113, 103916.

Spackova, O. (2012) Risk management of tunnel construction projects, *PhD Thesis*, Czech Technical University, CTU, Prague, Czech Republic, p164.

Spackova, O., Sejnoha, J. & Straub, D. (2013) Probabilistic assessment of tunnel construction performance based on data, *Tunnelling and Underground Space Technology,* 37, 62-78.

Spyridis, P. & Proske, D. (2021) Revised comparison of tunnel collapse frequencies and tunnel failure probabilities, ASCE-ASME *Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering*, 7, 2, 04021004.

Stallmann, M. (2005) *Verbruche im tunnelbau*, Ursachen und Sanierung, VDM-Verlag Müller.

Stephansson, O., & Zang, A. (2014) ISRM suggested methods for rock stress estimation-part 5: establishing a model for the in situ stress at a given site. *The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007-2014*, pp187-201, Cham: Springer International Publishing.

Wannick, H.P. (2006) The Code of Practice for risk management of tunnel works future tunnelling insurance from the insurers' point of view, *ITA Conference, Apr.25th 2006*, Seoul, Korea.

Wegener, A. (1924) *The Origin of continents and oceans*, (Translation from 3th Edition in German, by J.G.A. Skerl), E.P. Dutton and Company Inc., New York.

Wikipedia, (2026a) *Sasago tunnel*, www://en.wikipedia. org/wiki/ Sasago_Tunnel, Retreviewed in Feb. 2026.

Wikipedia, (2026b) *Tunnel disasters*, www://en.wikipedia.org /wiki/Category:Tunnel_disasters, Retreviewed in Feb. 2026.

Zang, A. & Stephansson, O. (2009) *Stress field of the Earth's crust*. Springer Sci.& Business, ISBN978-1-4020-8443-0, p318.

Zhang, Y., Yin, S., & Zhang, J. (2021) In situ stress prediction in subsurface rocks: An overview and a new method, *Geofluids*, 1, 6639793.

Zhang, X., Zhu, H., Jiang, X. & Broere, W. (2024) Distributed fiber optic sensors for tunnel monitoring: A state-of-the-art review, *J. of Rock Mech., & Geotech. Eng.,* 16, 9, pp3841-3863.

Zhu, Y., Zhou, J., Zhang, B., Wang, H. and Huang, M. (2022) Statistical analysis of major tunnel construction accidents in China from 2010 to 2020, *Tunnelling & Underground Space Technology,* 124, 104460.

BÖLÜM 2

YENİLİKÇİ ZEMİN İYİLEŞTİRME YÖNTEMLERİ: ATIK VE BİYOMALZEMELER İLE SÜRDÜRÜLEBİLİR GEOTEKNİK UYGULAMALAR

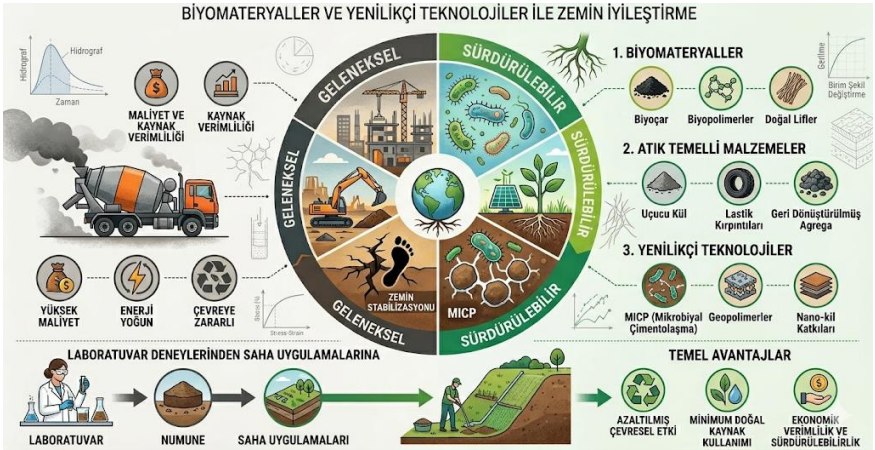
YESİM TUSKAN[1]

Giriş

Geoteknik mühendisliği, altyapı güvenliği, yapı dayanımı ve doğal afet risklerinin azaltılmasında temel bir disiplin olarak öne çıkmaktadır. Ancak geleneksel zemin iyileştirme ve stabilizasyon yöntemleri çoğu zaman yüksek maliyetli, enerji yoğun ve çevreye zararlı olabilmektedir. Bu durum, mühendisleri daha sürdürülebilir, ekonomik ve çevre dostu çözümler geliştirmeye yönlendirmiştir. Son yıllarda yapılan araştırmalar, biyomalzemeler (biochar, biyopolimerler, doğal lifler), atık temelli malzemeler (uçucu kül, kömür külü, lastik kırpıntıları, geri dönüştürülmüş agrega) ve yenilikçi teknolojiler (MICP, geopolimerler, nano-kil katkıları) gibi yöntemlerin zemin iyileştirmede başarılı ve sürdürülebilir alternatifler olabileceğini göstermiştir. Bu çalışmalar hem laboratuvar hem de saha ölçekli deneylerle desteklenmiş, çevresel

[1] Doktor Öğretim Üyesi, Manisa Celal Bayar Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0001-7090-2235

etkilerin azaltılması, doğal kaynak kullanımının minimize edilmesi ve ekonomik verimlilik açısından önemli avantajlar sunmuştur (Şekil 1.).



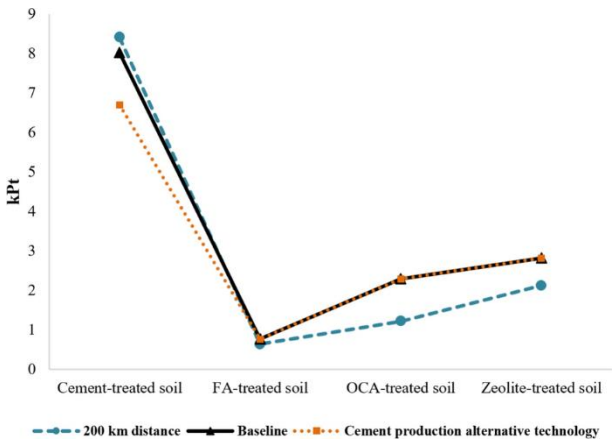
Şekil 1. Biyomateryaller ve Yenilikçi Teknolojiler ile Zemin İyileştirme

Biyogeoteknik yaklaşımlar, mikroorganizmaların zemin içi kimyasal süreçleri yönlendirmesi üzerine kuruludur ve özellikle MICP (Microbially Induced Calcium Carbonate Precipitation) yöntemi ile zeminin çimentolanmasını sağlar. Bunun yanı sıra, biochar ve diğer çevre dostu katkılar, zemin hidrolik özelliklerinin iyileştirilmesi, oturmaların azaltılması ve taşıma kapasitesinin artırılması gibi geleneksel zemin iyileştirme hedeflerini destekler. Kitapta ele alınan diğer çalışmalar ise şehir ve havza ölçeğinde sürdürülebilir su yönetimi, sünger şehir (sponge city) ve sürdürülebilir dolgu malzemelerinin kullanımını incelemektedir. Bu kapsam, yalnızca mühendislik açıdan zemin iyileştirmeyi değil, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirliği ve kaynak verimliliğini de içerir. Sürdürülebilir geoteknik uygulamalar ve yenilikçi zemin iyileştirme yöntemlerini bir araya getirerek mühendisler, araştırmacılar ve öğrenciler için kapsamlı bir referans kaynağı sunmayı amaçlamaktadır. Hem laboratuvar deneyleri hem de saha uygulamalarını kapsayan araştırmaların sentezi, gelecekteki

mühendislik projelerinde çevre dostu ve ekonomik çözümlerin benimsenmesine katkı sağlayacaktır.

Sürdürülebilir Geoteknik Uygulamalar

Abu Yosef ve diğ. (2026), bu çalışmada uçucu kül (FA), zeytin pirinası külü (OCA) ve zeolitin, şişen zeminlerin stabilizasyonunda çimentoya alternatif olarak kullanımının çevresel sürdürülebilirliğini yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA) yöntemiyle incelemiştir. ReCiPe 2016 metodolojisini kullanarak farklı stabilizatörlerin çevresel etkilerini karşılaştırmıştır. Sonuçlara göre uçucu kül (FA), çimentoya kıyasla küresel ısınma etkisini %93 oranında azaltarak en çevre dostu seçenek olarak belirlenmiştir (Şekil 2.).



Şekil 2. Sabit taşıma mesafesi ve alternatif çimento üretim teknolojisi kullanılarak duyarlılık analizi (Abu Yosef ve diğ. 2026)

Zeytin pirinası külünün (OCA) çoğu çevresel etki kategorisinde çimentodan daha iyi performans gösterdiğini, ancak ozon incelmesi ve karasal ekotoksisite kategorilerinde daha yüksek etkilere sahip olduğunu tespit etmiştir. Zeolit ve çimento ise genel çevresel etki açısından daha yüksek değerlere ulaşmış, özellikle çimento çoğu kategoride en olumsuz performansı göstermiştir. Özellikle uçucu kül (FA) ve zeytin pirinası külü (OCA) gibi atık

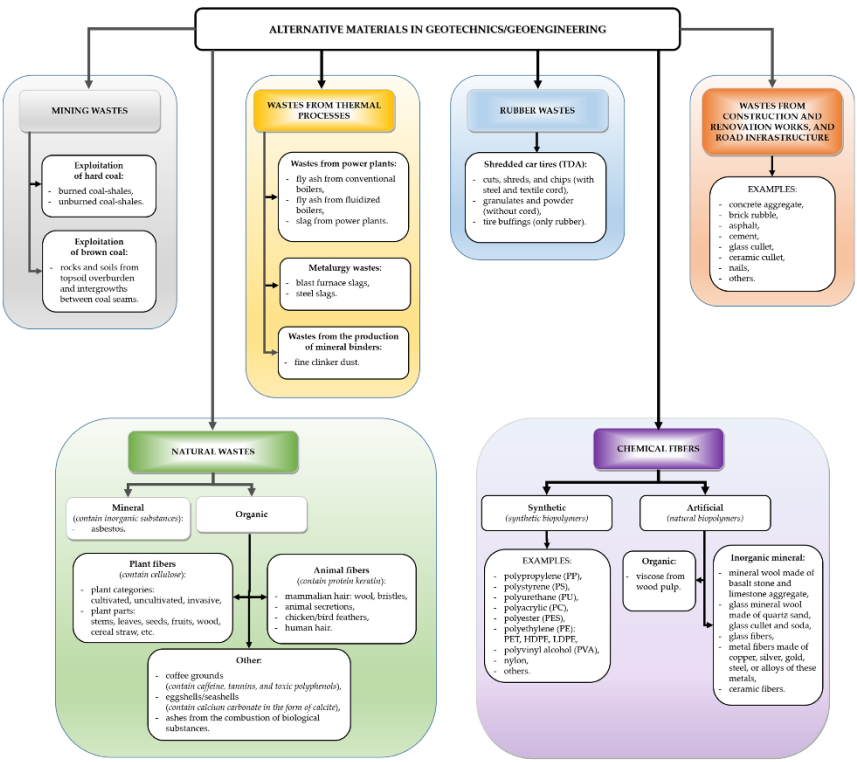
malzemelerin, zemin stabilizasyonunda çimentoya çevresel açıdan sürdürülebilir ve faydalı alternatifler olabileceğini ortaya koymuştur.

Dinç ve diğ. (2025), bu çalışmada bor açısından zengin doğal bir mineral olan colemanitin, kumlu zeminlerin mühendislik özelliklerini iyileştirmek amacıyla sürdürülebilir bir stabilizatör olarak kullanımını araştırmıştır. Farklı oranlarda colemanit karıştırılmış kum numuneleri üzerinde laboratuvar deneyleri gerçekleştirmiştir. Yapılan testler sonucunda colemanit ilavesinin zeminin boşluk oranını ve geçirgenliğini azalttığı, zemini daha yoğun hale getirdiği belirlenmiştir. Ayrıca dayanım ve rijitlik değerlerinin arttığı tespit edilmiştir. Deneysel çalışmalara ek olarak sayısal analizler yapmış ve bu analizlerin laboratuvar sonuçlarını desteklediğini göstermiştir. Sayısal modellemeler, colemanit katkısının zeminin mekanik davranışını iyileştirdiğini doğrulamıştır. Sonuç olarak, colemanitin çimento gibi geleneksel stabilizatörlere çevre dostu bir alternatif olabileceğini ve geoteknik performansı artırırken çevresel etkiyi azaltabileceğini ortaya koymuştur.

Bangalore Ramu ve diğ. (2025), bu bibliyometrik çalışmada 2000–2025 yılları arasında kum–lastik karışımları üzerine yapılan küresel araştırmaları analiz etmiş, bu malzemelerin zemin stabilizasyonu, dolgu yapıları, sismik izolasyon ve drenaj için sürdürülebilir geoteknik malzemeler olarak yükselişini vurgulamıştır. 366 yayına dayanan analizler, 2015 sonrası araştırmalarda belirgin bir artış olduğunu göstermiştir; bu, çevresel kaygıların artması ve atık lastiklerin geri dönüştürülmesine yönelik çabaları yansıtmaktadır. Kum–lastik karışımlarının sürdürülebilirlik ve mühendislik açısından avantaj sağladığını belirtmiş, ancak sıkışma sorunları, tane boyutu değişkenliği ve uzun dönem dayanıklılık gibi devam eden zorlukların da altını çizmiştir. Çalışma, bu karışımların dairesel ve çevre dostu yapı malzemeleri olarak potansiyelini tam olarak kullanabilmek için daha fazla geniş ölçekli

saha çalışması, standartlaştırılmış tasarım uygulamaları ve gelişmiş sayısal modelleme yapılması gerektiğini önermektedir.

Jastrzębska (2025), bu çalışmada düşük emisyonlu ve döngüsel ekonomi temelli geoteknik mühendisliği bağlamında zayıf zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılan atık kaynaklı malzemeler ve yeni teknolojiler üzerine kapsamlı bir inceleme yapmıştır. Bilgilerin literatürde dağınık olması nedeniyle, çalışma maden atıkları, termal proseslerden elde edilen atıklar, kullanım ömrünü tamamlamış lastikler, sentetik lifler gibi kimyasal süreçlerden gelen malzemeler ve inşaat-yıkım atıkları gibi zemin iyileştirmede ve yol inşaatında başarıyla uygulanmış malzemeler üzerine önemli bulguları bir araya getirmiştir. Ayrıca, nano malzemeler, mikrobiyal ve enzim kaynaklı kalsit çökelmesi (MICP/EICP) ile lignosülfonat uygulamaları gibi hızla gelişen yenilikçi yöntemler de vurgulanmıştır (Şekil 3.).



Şekil 3. Geomühendislik uygulamalarında kullanılabilecek alternatif malzemelerin sınıflandırılması (Jastrzębska 2025)

Pham (2025), bu çalışmada iklim değişikliğinin artan yağış değişkenliği, kuraklık ve aşırı sıcaklıklar bağlamında iklim dayanıklı geoteknik altyapı tasarımında doymamış zemin mekaniğinin (USM) önemini vurgulamıştır. USM, değişen nem koşulları altındaki zemin davranışını daha doğru temsil ederek geleneksel doymuş zemin modellerinin sınırlamalarını ele almaktadır. Çalışmada zemin-atmosfer etkileşimleri, hidrolik histerezis ve iklim projeksiyonlarındaki belirsizlik gibi temel zorluklar ve gelişen izleme, modelleme ve güvenilirlik temelli tasarım fırsatları tartışılmıştır. Emme etkilerini taşıma kapasitesi ve stabilite analizlerine dahil ederek, yağış infiltrasyonunun yamaçlar, sığ temeller ve dolgu yapılarındaki zemin dayanımını hızla azaltabileceğini ve yenilme riskini artırabileceğini göstermiştir.

AlNaje ve diğ. (2025) bu çalışmada, zemin iyileştirme uygulamalarında kullanılan sürdürülebilir çimentomsu katkıların performansını ve çevresel faydalarını incelemektedir. Geleneksel zemin stabilizasyon yöntemlerinde Portland çimentosu veya hidrolik kireç gibi bağlayıcılar yaygın olarak kullanılsa da, çimento üretiminin küresel CO_2 emisyonlarının yaklaşık %5'ini oluşturması nedeniyle araştırmalar çevre dostu alternatiflere yönelmiştir. Bu nedenle, uçucu kül, çimento fırın tozu, granüle yüksek fırın cürufu, pirinç kabuğu külü, taş tozu, kereste külü, kırık seramik gibi endüstriyel ve tarımsal atıkların puzolanik özelliklerinden yararlanılarak daha ekonomik ve çevreye duyarlı stabilizasyon çözümleri geliştirilmiştir. İncelenen çalışmalar, bu sürdürülebilir malzemelerin geniş dozaj aralıklarıyla (2–50% arası) kullanıldığını ve çoğu durumda Atterberg limitlerini düşürdüğünü, şişme potansiyelini azalttığını ve zemin davranışını daha stabil hâle getirdiğini ortaya koymaktadır. Kompaksiyon özellikleri (MDD ve OMC), kullanılan malzeme ve zemin türüne bağlı olarak farklı

eğilimler göstermiş, ancak genel amaç zeminin daha flokule bir yapıya kavuşmasını sağlamak olmuştur. Ayrıca, California bearing ratio (CBR) ve tek eksenli basınç dayanımının sürdürülebilir katkılarla belirgin şekilde iyileştiği gözlemlenmiştir; bazı atıklar (örneğin yumurta kabuğu) tek başına sınırlı etki gösterdiğinden kireç ile karıştırıldığında daha iyi performans elde edilmiştir. Sonuç olarak endüstriyel atık esaslı malzemeler—özellikle CKD, GGBS ve red mud—diğer malzeme türlerine kıyasla daha güçlü iyileştirme etkisi sağlamış; aynı zamanda düşük maliyet, çevreye duyarlılık ve depolama kirliliğinin azalması gibi önemli avantajlar sunmuştur. Bu bulgular, sürdürülebilir stabilizatörlerin hem ekonomik hem çevresel açıdan geleneksel çimento bazlı yöntemlere kıyasla güçlü alternatifler olduğunu göstermektedir.

Li ve diğ. (2025) bu çalışmada, 19 yağmur suyu yönetim modelinin altı temel sünger şehir fonksiyonunu (tutma, infiltrasyon, depolama, kullanım, arıtma ve deşarj) simüle etme yeteneklerini değerlendirmiş; modellerin hidrolojik performansı genellikle başarılı olsa da karar destek araçlarının ekonomik, sosyal ve çevresel etkileri yeterince kapsamadığını ortaya koymuştur. Ayrıca modeller, Çin'e özgü standartlar ve iklim koşulları için tam uyumlu değildir; yağmur bahçeleri, sarnıçlar veya suyun yeniden kullanım yolları mevcut simülasyonlara dahil edilmemiştir. SCP uygulamalarının olası olumsuz etkileri (ör. fosfor artışı, ötrofikasyon, kirletici birikimi) modeller tarafından göz ardı edilmektedir. Çin'de model uygulamalarının çoğu orta ve doğu bölgelerde yoğunlaşırken; kuzeyde infiltrasyon, güneyde depolama odaklı çalışmalar yapılmaktadır. Bu durum, iklim kuşaklarına göre doğru model seçiminin önemini göstermektedir. Araştırma sonucunda, sünger şehir uygulamalarını tam anlamıyla değerlendirebilecek, sosyal-ekonomik maliyet–fayda analizlerini içeren, yerel koşullara uyarlanmış geliştirilmiş modellerin gerekliliği vurgulanmıştır. Ayrıca hidrolik süreçlerin uzun vadeli değişimi, iklim değişimi

etkileri ve suyun yeniden kullanımının izlenebilir simülasyonlara entegre edilmesi, sünger şehir planlamasında sürdürülebilir yönetim için kritik görülmektedir.

Shireen ve diğ. (2025) bu çalışmada, endüstriyel atıkların — özellikle kullanım ömrünü tamamlamış lastiklerin (ELT), kömür külü ve maden atıklarının— çevreyi tehdit eden depolama sorunları nedeniyle sürdürülebilir biçimde değerlendirilmesi konusunu ele almıştır. ELT'lerin dayanım, esneklik ve dayanıklılık özellikleri sayesinde değerli bir kaynak olduğunu; TDM–kum karışımlarının zayıf zemin üzerinde yapılan dolgular, istinat duvarları, köprü ayakları ve çeşitli altyapı elemanları için uygun davranış sergilediğini göstermiştir. Kömür külünün yoğun kullanımının oluşturduğu depolama baskısını ve çevresel riskleri incelemiş, külün yol yapımı, blok üretimi ve dolgu malzemesi olarak kullanımına yönelik mevcut düzenlemeleri ve uygulamaları değerlendirmiştir. TDM ve kömür külünün geoteknik dolgular ve hafif mühendislik dolguları için uygunluğunu inceleyen araştırmaları derlemiş ve hafif yapısal dolgu uygulamalarına yönelik model çalışmalarını özetlemiştir. Elde edilen sonuçların bu iki atık malzemenin düşük birim hacim ağırlıkları, yeterli dayanım özellikleri ve geleneksel dolgu malzemelerine alternatif olabilecek davranışları sayesinde hafif dolgu, zayıf zeminde yük azaltma ve istinat yapılarının toplam ağırlığını düşürme açısından önemli avantajlar sunduğunu ortaya koyduğunu; özellikle lastik kırpıntılarının kum ile birlikte fiber benzeri bir takviye etkisi oluşturduğunu ve büyük ölçekli deneylerin bu malzemelerin mühendislik uygulamalarındaki potansiyelini doğruladığını göstermiştir.

Eze ve diğ. (2025) doygun olmayan maden atıkları, matris emme basıncı, su tutma kapasitesi ve sıcaklık–nem değişimleri gibi hidro-mekanik faktörlere bağlı olarak karmaşık davranışlar sergilemesini ve özellikle iklim değişikliğinin etkileri altında sürdürülebilir yönetimi kritik hâle gelmesini incelemiştir. İnce taneli

atıkların su–zemin karakteristik eğrileri, düşük sıcaklık ve küçük tane boyutunun emme basıncını artırması gibi nedenlerle stabilite değerlendirmesinde belirleyicidir. Kuruma– ıslanma döngüleri freatik yüzeyin değişmesine, statik sıvılaşma riskinin artmasına ve özellikle ekstrem yağış, yüksek sıcaklık ve donma–çözülme döngülerinin etkisiyle depolama tesislerinde (TSF) geoteknik parametrelerin mekânsal olarak farklılaşmasına yol açmaktadır. İklim değişikliği koşullarında artan sıcaklık ve kuraklık, tozlaşma ile ağır metallerin taşınımını hızlandırmakta, yoğun yağış ise ağır metal sızıntısını artırarak çevresel ve halk sağlığı açısından riskleri büyütmektedir; bu durum birçok ülkede yeraltı suyu kirliliği, biyobirikim ve ekosistem bozulmasına yol açan olumsuz örneklerle belgelenmiştir. Bu bağlamda MICP gibi biyolojik süreçler su tutma kapasitesini artırarak erozyonu azaltmakta, sınır koşullarındaki değişimlere karşı zeminin dayanımını güçlendirmekte ve iklime bağlı degradasyona karşı direnci artırmaktadır; ayrıca iyileştirilmiş kireç harcı, atıklardaki kurşun ve arsenik gibi toksik elementleri immobilize ederek hem yapısal dayanımı korumakta hem de çevresel stresi azaltmaktadır. Toprak tüfünün ve revejetasyonun kullanımı, taşıma gücünü artırırken karbon emisyonlarını azaltmakta ve mikroorganizmalar aracılığıyla biyoremediasyonu desteklemektedir. Atıkların yeniden işlenmesi ve değer kazanımı, sürdürülebilir kaynak yönetiminin temel bileşenlerinden biri olarak tanımlanmakta ve geoteknik performans ile çevresel koruma arasında denge kurmaktadır. Bununla birlikte dünya genelinde yaşanan Fundao, Brumadinho, Mount Polley ve Karamken gibi TSF çöküşleri, maden atığı yönetiminin yalnızca mühendislik değil aynı zamanda sosyal ve çevresel bir problem olduğunu göstermektedir. İklim-adaptif teknolojiler—MICP, çok katmanlı örtü sistemleri, UAV tabanlı izleme, SEEP/W ve PLAXIS gibi gelişmiş modelleme araçları—tasarım ve işletmede karar destek sistemlerini güçlendirmekte olsa da özellikle küresel güneyde erişilebilirlik sorunu ve uygulama boşlukları devam etmektedir. Bu nedenle

sürdürülebilir ve iklim dirençli maden atığı yönetimi için doygun olmayan zemin mekaniği, iklim modellemesi, ekolojik restorasyon ve gerçek zamanlı izleme teknolojilerinin entegre edildiği, disiplinler arası ve paydaş katılımlı bir yaklaşımın geliştirilmesi zorunludur.

Macías-Párraga ve diğ. (2025), genişleme potansiyeli yüksek (expansive) kil zeminlerin hacim değişimi nedeniyle dünya genelinde ciddi altyapı sorunlarına yol açtığını vurgulamakta ve özellikle Ekvador kıyı bölgesi için yenilikçi/sürdürülebilir zemin iyileştirme tekniklerini değerlendirmektedir. Genişleyen kil mineralleri (montmorillonit, illit, vermikülit) su ile şişme eğiliminde olup binalar, yollar ve temel altyapılarda büyük hasarlara yol açmaktadır. Çimento ve kireç gibi geleneksel stabilizasyon malzemeleri çevresel etkileri nedeniyle sürdürülebilirlik açısından eleştirilmekte, bu nedenle tarımsal ve endüstriyel atıklar ile geliştirilen alternatif yöntemler ön plana çıkmaktadır. Makale, literatür taramasını dört ana kategoriye ayırmaktadır: kimyasal, fiziksel–mekanik, termal ve sürdürülebilir/atık esaslı stabilizasyon teknikleri. Bu tekniklerle yapılan çalışmalarda, uçucu kül, pirinç kabuğu külü, şeker kamışı posası, EPS, plastik, nanomalzemeler ve kauçuk gibi birçok alternatif malzeme ile şişme azalması, dayanım artışı (UCS, CBR) ve hacim değişiminin kontrolü sağlandığı raporlanmıştır. Ancak uzun vadeli dayanım, çevresel etkiler ve standart eksikliği gibi konular henüz çözülememiştir. Sonuçlar, Ekvador kıyı bölgesinin mineralojik yapısının (yüksek oranda kaolinit, düşük montmorillonit ve düşük CaO içeriği) geleneksel stabilizasyon yöntemlerine duyarlılığını sınırladığını göstermektedir. Bu nedenle pirinç kabuğu külü, şeker kamışı posası, jüt lifi, muz lifi, bambu yaprak külü gibi yerel ve sürdürülebilir malzemeler daha etkili ve uygun görülmektedir. Alternatif malzemelerle elde edilen UCS ve CBR değerlerindeki artış (2.3 kata kadar UCS, 1.9 kata kadar CBR) yöntemlerin teknik açıdan

uygulanabilir olduğunu göstermektedir. Ancak bazı tekniklerin yaygın uygulamasına geçilmesi için uzun dönem performans testleri, daha fazla mekanik veri ve saha denemeleri gerekmektedir.

Al Khazaleh ve diğ. (2024), altı farklı zemin türü üzerinde nano-kilin; dayanım, geçirgenlik, oturma davranışı ve ıslanma–kuruma döngüleri altındaki performans üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemiştir. Çalışmada optimum nano-kil oranının zemin türüne bağlı olarak %0,2 ile %0,4 arasında değiştiği belirlenmiştir. Tüm iyileştirilmiş zeminlerde tek eksenli basınç dayanımı (UCS) ve California Taşıma Oranı (CBR) değerlerinde önemli artışlar gözlemlemiştir. Bu artışın, nano-kilin CSH (kalsiyum silikat hidrat) jelleri oluşturarak zemin tanelerini daha sıkı bağlamasından kaynaklandığı ifade edilmiştir. Ayrıca geçirgenlik ve oturma miktarında belirgin azalmalar tespit edilmiştir. Sonuç olarak, amorf nano-kilin zayıf zeminlerin sürdürülebilir şekilde iyileştirilmesinde etkili ve geniş uygulama potansiyeline sahip bir stabilizatör olduğunu ortaya koymuştur.

Bhagatkar ve Lamba (2024) bu çalışmada, günümüzde hızla gelişen altyapı ihtiyaçlarının bir sonucu olarak zemin iyileştirme tekniklerinde ortaya çıkan yeniliklere odaklanmakta ve geleneksel yöntemlerin sınırlılıkları nedeniyle sürdürülebilir, yüksek performanslı alternatiflere duyulan ihtiyacı ortaya koymaktadır. Geleneksel stabilizasyon yöntemleri olan çimento, kireç ve uçucu kül uygulamaları zemin dayanımını, hacim stabilitesini ve taşıma kapasitesini artırsa da yüksek karbon salımı, çevresel etkiler ve organik içerikli, tuzlu veya ekstrem iklim koşullarına sahip zeminlerde yetersiz performans göstermektedir. Bu nedenle endüstriyel yan ürünler (cüruf, uçucu kül), nanomalzemeler (nano-silika, nano-kil, nano-bentonit) ve biyolojik yöntemler (MICP gibi mikroorganizmaların kalsiyum karbonat çökelterek zemin matrisini güçlendirmesi) modern sürdürülebilir çözümler olarak öne çıkmıştır. Zemin dayanımını moleküler ölçekten etkileyebilen

nanomateryallerin özellikle UCS (tek eksenli basınç dayanımı) üzerinde 2.3 kata kadar artış sağladığı, MICP uygulamalarının kayma dayanımını yaklaşık %12 artırdığı ve permeabiliteyi düşürdüğü vurgulanmıştır. Biopolimerler—özellikle sodyum aljinat, jelatin, ksantan gum ve guar gum—çökebilir zeminlerde %95'e varan iyileşme sağlaması, çevre dostu yapısı ve düşük toksisite nedeniyle sürdürülebilir stabilizatörler olarak önemli bir potansiyel sunmaktadır. Ek olarak, zemin güçlendirme yöntemlerinden geosentetikler, geotekstiller, geogridler, taş kolonlar, vibro-kompaksiyon ve soil nailing tekniklerinin karmaşık zemin koşullarında etkili olduğu ancak doğru tasarım ve uygulama gerektirdiği açıklanmaktadır. Grouting teknolojilerinde de gelişmeler yaşanmış, mikro ince çimentolar ve genişleyici malzemeler kullanılarak boşluk doldurma, su kontrolü ve sıvılaşma azaltma hedeflerinde daha etkin çözümler geliştirilmiştir. Analizler, sürdürülebilir çimentomsu malzemelerin CO_2 emisyonlarını %50'e kadar düşürürken geleneksel stabilizatörlerle benzer performans sunduğunu; nanomalzemeler, biopolimerler ve MICP gibi biyoteknolojik yaklaşımların hem dayanım hem çevresel kalite açısından modern jeoteknik mühendisliğinde güçlü alternatifler olduğunu göstermektedir. Özellikle kritik altyapı projelerinde, yüksek dayanım, uzun servis ömrü ve çevresel sürdürülebilirliği birlikte sağlayabilen bu tekniklerin mühendislik geleceğinde daha geniş uygulama alanı bulacağı sonucuna varılmıştır.

Sarma ve Dey (2024), bu çalışmada stabilize edilmemiş yolların tasarımını geliştirmiş, geleneksel 2B yöntemlerin araç yükleri ve oluşan deformasyonun gerçek 3B etkilerini göz ardı ettiğini vurgulamıştır. Sonuçlar, geotekstilsiz stabilize edilmemiş yolların tekrar eden trafik altında ciddi çöküntüler oluşturduğunu göstermiştir. Agregat-alt zemin ara yüzeyine geotekstil katmanı eklenmesi, alt zemine binen gerilmeyi önemli ölçüde azaltmış, çöküntüleri minimize etmiş ve uzun vadeli performansı artırmıştır.

Çalışma, geotekstil takviyesinin stabilize edilmemiş yolların dayanıklılığını ve güvenilirliğini artırmak için pratik ve sürdürülebilir bir yöntem olduğunu ortaya koymaktadır.

Dienta ve Bağriaçik (2024), bu çalışmada dokumasız geotekstillerin, yol ve otoyol inşaatlarında alt zeminlerin taşıma kapasitesini artırmak için maliyet etkin bir zemin stabilizasyon yöntemi olarak kullanımını araştırmıştır. Mali'deki Missabougou ve Türkiye'deki Sariçam bölgelerinden alınan iki farklı zemin üzerinde kapsamlı laboratuvar deneyleri gerçekleştirilmiş; sıkıştırma testleri ve California taşıma oranı (CBR) ölçümleri yapılmıştır. Toplam 48 adet nemsiz CBR testi, geotekstiller farklı derinliklerde ve değişik katmanlama konfigürasyonlarında yerleştirilerek uygulanmıştır. Sonuçlar, CBR değerlerinde belirgin artışlar göstermiştir: Missabougou zemini için CBR 12'den 76'ya, Sariçam zemini için 45'ten 75'e yükselmiştir. Bulgular, stratejik olarak yerleştirilen dokumasız geotekstillerin alt zemini önemli ölçüde güçlendirdiğini ve yol performansını artırmak, altyapının ömrünü uzatmak için pratik ve dayanıklı bir çözüm sunduğunu ortaya koymaktadır.

Balreddy ve diğ. (2024), bu çalışmada silty kumlu zeminlerin rastgele karıştırılmış, alkali işlem görmüş areca lifleri ile iyileştirilmesini sürdürülebilir bir stabilizasyon yöntemi olarak incelemiştir. Çalışmada lif içerikleri %0'dan %0,8'e kadar değiştirilmiş ve sıkıştırma, California taşıma oranı (CBR), tek eksenli basınç dayanımı (UCS) ve üç eksenli testler uygulanmıştır. Lif içeriği arttıkça zemin daha fazla nem gerektirmiş, daha hafif hale gelmiş ve genel dayanımı artmıştır. En iyi sonuçlar %0,6 lif içeriğinde elde edilmiştir; bu karışım en yüksek dayanımı sağlamış ve IITPAVE analizine göre 2 milyon standart aksın altında trafik gören düşük hacimli yol alt yapıları için uygun bulunmuştur. Çalışma, areca lifinin yerel zeminleri güçlendirmek ve yol kaplamalarının dayanıklılığını artırmak için etkili ve çevre dostu bir seçenek olduğunu göstermektedir.

Kasehchi ve diğ. (2024), bu çalışmada seramik atık tozu (CWP) esaslı bir geopolymer ile zayıf silty kumlu zeminlerin stabilize edilebilme potansiyelini araştırmıştır. Seramik atık tozu ile sodyum hidroksit çözeltisi karıştırılarak oluşturulan geopolymer stabilizasyonu, doğal zemine ve %5 çimento katkılı zemine kıyasla zeminin dayanımını ve deformasyon kapasitesini önemli ölçüde artırmıştır. Optimal karışım olarak %15 CWP ve 6 M NaOH kullanıldığında 28 gün kürlenmiş numunelerde dayanım 0,080 MPa'dan 2,22 MPa'ya yükselmiş, rijitlik ve esneklik de artmıştır. Ayrıca, daha yüksek kürleme sıcaklıkları (70 °C) dayanımı daha da artırmıştır. Mikroskopik analizler (SEM-EDX) güçlü bağlayıcı jellerin oluştuğunu göstermiştir. Bu sonuçlar, CWP esaslı geopolymerlerin ucuz, etkili ve çevre dostu bir zemin stabilizasyon yöntemi olduğunu ve atık malzemelerin sürdürülebilir yapımda yeniden kullanılmasına imkân sağladığını ortaya koymaktadır.

Reddy ve diğ. (2024), bu çalışmada alkali-aktif malzemelerin zeminleri sürdürülebilir bir şekilde güçlendirmek için kullanımını incelemiştir; bu sayede dolgu, şev, istinat duvarı ve taşkın koruma sistemleri gibi yapıların deprem ve sel gibi aşırı olaylara karşı dayanıklılığı artırılabilir. Sanayi atıkları olan uçucu kül ve kırmızı çamur, alkali çözeltilerle aktive edildiğinde zemin performansını önemli ölçüde artırmaktadır. Çalışma, alkali aktivasyonun nasıl çalıştığını, farklı bağlayıcılar ve aktive edicilerin rollerini ve bunların zemin dayanımı ve dayanıklılığı üzerindeki etkilerini açıklamaktadır. Araştırmalar, alkali-aktif zeminlerin çok daha yüksek dayanım kazandığını ve özellikle tekrar eden ıslanma koşullarında zaman içinde daha iyi performans gösterdiğini ortaya koymuştur. Çalışma ayrıca sürdürülebilirlik ve dayanıklılığı ölçmek için bir çerçeve sunmaktadır.

Kumar ve Kumari (2023) bu çalışmada, düzenli depolama sahalarında kullanılan taban sızdırmazlık sistemlerinin tasarımında gerekli malzeme özelliklerini ve sürdürülebilir, düşük geçirgenlik

sağlanabilecek çeşitli malzeme alternatiflerini incelemektedir. Gelişmiş ülkelerde atık depolama alanları, çevreyi korumak amacıyla belirli yönetmeliklere göre tasarlanıp işletilir ve bu süreçte en kritik bileşenlerden biri, sızıntı suyunun alt zemine geçmesini engelleyen taban liner sistemidir. Uygun bir taban liner malzemesinin şişme davranışı, dayanımı ve hidrolik iletkenlik gibi belirli mühendislik özelliklere sahip olması gerekir; ideal olarak bu geçirgenlik değeri 10^{-9} m/s'nin altında olmalıdır. Uygun özellikte doğal zemin bulunamadığında, yerel topraklara bentonit gibi düşük geçirgenlik sağlayan katkılar eklenerek iyileştirilmiş karışımlar elde edilebilmektedir. Literatürde kil, geosentetik kil örtüleri, geomembranlar, geotekstil ve çeşitli endüstriyel atık katkıları gibi farklı malzemelerin hidrolik ve mekanik davranışları detaylı olarak araştırılmıştır. Bulgular, montmorillonit oranı yüksek kil ve uygun geosentetik yoğunluğunun düşük geçirgenlik ve kendini iyileştirme özelliklerini artırdığını göstermektedir. Tuz çözeltisi etkisi, kilin plastisite özelliğine bağlı olarak geçirgenlik davranışında değişiklik yaratırken, biochar– bentonit–kum karışımlarının düşük geçirgenlik sağlayarak liner malzemesi olarak uygun olduğunu ortaya koymuştur. Biochar ilavesiyle zeminlerin kuru yoğunluğu artarken optimum su muhtevası azalmakta; biochar oranı ve partikül boyutu, zemin dayanımı ve sıkışabilirlik üzerinde belirgin etki göstermektedir. Bentonit miktarının artmasıyla hidrolik iletkenlik logaritmik olarak azalmakta ve şişme potansiyeli yükselmektedir.

Shahid (2022) bu çalışmada, geoteknik mühendislerinin zemin dayanımının artırılması, su akışının kontrol edilmesi, hidrolik iletkenliğin düzenlenmesi, dayanıklılığın iyileştirilmesi ve sıvılaşma riskinin azaltılması gibi mühendislik problemlerine çözüm üretme gerekliliğini ele almıştır. Çalışmada, geleneksel yöntemlerin maliyetli, enerji yoğun ve çevreye zararlı olması nedeniyle sürdürülebilir çözümlere ihtiyaç duyulduğu vurgulanmıştır. Biyomateryallerin (biyokömür, biyopolimerler, doğal lifler)

kullanımı ve bitkilendirme gibi ekolojik yaklaşımların şev ve dolgu stabilitesini artırmada avantaj sağladığı belirtilmiştir. Biyogeo-mühendislik adı verilen yeni alanın, mikroorganizmaların zemin içi kimyasal süreçlerini yönlendirmesini temel aldığını ve özellikle üreoliz yoluyla mikroorganizmaların kalsiyum karbonat çökelterek zemini çimentoladığı MICP (Microbially Induced Calcium Carbonate Precipitation) yönteminin son yıllarda yoğun şekilde araştırıldığını göstermiştir. Çalışmada, MICP sürecinin üniform gerçekleşmemesi, yan ürünlerin çevresel etkileri ve büyük ölçekli uygulamalarda maliyetin yüksek olması gibi engellerin hâlâ çözülmesi gerektiği vurgulanmıştır. Denitrifikasyon yoluyla yapılan MICP'nin çevresel yan ürünleri azalttığı, ancak sürecin yavaş ilerlediği için geniş ölçekli kullanımda sınırlı kaldığı belirtilmiştir.

Vieira (2022) bu makalede, geoteknik mühendisliğinin sürdürülebilirlik açısından kritik rolünü vurgulamıştır. Makale, azalan yenilenemez doğal kaynaklar ve artan atık miktarı nedeniyle çevre dostu malzemelerin geoteknik uygulamalarda kullanımının önemini tartışmaktadır. Çevre dostu malzemeler hem kaynak tüketimini azaltmakta hem de atıkların yeniden değerlendirilmesini sağlamaktadır. Brundtland Raporu'nun sürdürülebilirlik ilkelerine dikkat çekerek, inşaat sektörünün yüksek enerji tüketimi, yoğun doğal kaynak kullanımı ve büyük miktarda atık üretimi nedeniyle sorumluluk alması gerektiğini vurgulamıştır. Makale, geoteknik mühendislerinin çevreci, kaynak verimli ve düşük karbonlu çözümler geliştirmeye yönelmesinin önemini belirtmiş ve özel sayının konu hâline getirerek sürdürülebilirlik çalışmaları için devam edeceğini vurgulamıştır.

Liu ve diğ. (2022), bu çalışmada biyokömür ile iyileştirilmiş zeminlerin dolgu yapılarında potansiyel hafif malzeme olarak kullanılabilirliğini araştırmıştır. Biyokömürün toprakta su ve besin tutma kapasitesini artırdığı bilinse de taşıma kapasitesi üzerine etkisi yeterince anlaşılmamıştır. Çalışmada silty kum ve saf kum zeminleri

%5, %10 ve %15 biyokömür ile karıştırılarak test edilmiştir. Sonuçlar, biyokömür eklenmesinin zemini hafiflettiğini, ancak kesme dayanımı ve yük taşıma kapasitesini önemli ölçüde artırdığını göstermiştir. Ayrıca, biyokömür uygulaması bitki büyümesini destekleyerek dolgu yamaçlarında erozyonun azalmasına katkı sağlamıştır.

Sun ve diğ. (2021), bu çalışmada biyokömür uygulamalarının zemin agregat stabilitesi ve karbon tutumu üzerindeki uzun dönem etkilerini incelemiştir. Araştırmada biyokömür, toprak organik karbonu (SOC), mikrobiyal biyokütle karbonu (MBC) ve glomalin benzeri toprak proteinleri (GRSP) değerlerini artırarak zemin agregat stabilitesini yükseltmiştir. Çoğu toprak agregat fraksiyonunda biyokömür içeriği uygulama dozuna bağlı olarak artmıştır. Biyokömür ayrıca toprak pH, elektriksel iletkenlik (EC) ve katyon değişim kapasitesini (CEC) artırmıştır. BC3 ile işlenen örneklerde, toprak agregat stabilitesi azalmış, ancak biyolojik bağlayıcılar artmıştır. Çalışmada kullanılan yapısal eşitlik modeli biyokömürün etki mekanizmasını göstermiştir, ancak mekanizmaların tam olarak anlaşılması için daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulmaktadır.

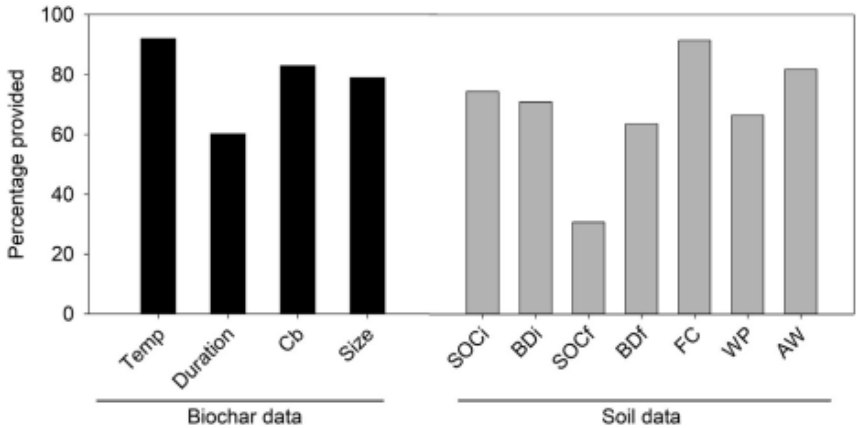
Pouladi ve diğ. (2021), bu çalışmada “sünger şehir” yaklaşımını şehir ölçeğinin ötesine taşıyarak bütün bir havza ölçeğinde su yönetimi ve direnç modellemesi önermiştir. Çalışmada, su direncini değerlendirmek için 20 göstergeden oluşan disiplinler arası bir model geliştirilmiş; ekolojik altyapı, su kalitesi, taşkın yönetimi, su geri kazanımı ve sosyal dayanıklılık gibi unsurlar dikkate alınmıştır. Altı pilot şehir üzerinde yapılan incelemeler, yeşil altyapı unsurlarının (yeşil çatı, geçirgen yüzey vb.) taşkın azaltımında etkili olduğunu; ancak havza ölçeğinde planlama yapılmadığında şehir içi çözümlerin sınırlı kaldığını göstermiştir. Ayrıca, su döngüsünün tüm parçalarının bütünleşik yönetilmesi gerektiği vurgulanmıştır.

Hussain ve diğ. (2021), bu çalışmada mezquite ağacından üretilen biyokömürün kil içeren kum zeminlerinin sıkışma ve kesme dayanımı üzerindeki etkilerini incelemiştir. Çalışmada zemine %5, %10 ve %15 biyokömür eklenmiş ve testler gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, biyokömür eklemenin zemini daha hafif hale getirdiğini (düşük kuru yoğunluk), ancak kesme dayanımını artırdığını (yüksek kohezyon ve sürtünme açısı) göstermiştir. Bununla birlikte, drenajsız dayanım, zeminin sıkışma düzeyine bağlı olarak artabilir veya azalabilir. Yüksek sıkışmada dayanım düşmüş, muhtemelen fazladan suyun bir yağlayıcı gibi davranmasından kaynaklanmıştır. Daha düşük sıkışmada ise dayanım artmıştır.

Pouladi ve diğ. (2021), bu çalışmada "sünger şehir" yaklaşımını şehir ölçeğinin ötesine taşıyarak bütün bir havza ölçeğinde su yönetimi ve direnç modellemesi önermiştir. Çalışmada, su direncini değerlendirmek için 20 göstergeden oluşan disiplinler arası bir model geliştirilmiş; ekolojik altyapı, su kalitesi, taşkın yönetimi, su geri kazanımı ve sosyal dayanıklılık gibi unsurlar dikkate alınmıştır. Altı pilot şehir üzerinde yapılan incelemeler, yeşil altyapı unsurlarının (yeşil çatı, geçirgen yüzey vb.) taşkın azaltımında etkili olduğunu; ancak havza ölçeğinde planlama yapılmadığında şehir içi çözümlerin sınırlı kaldığını göstermiştir. Ayrıca, su döngüsünün tüm parçalarının bütünleşik yönetilmesi gerektiği vurgulanmıştır.

Razzaghi ve diğ. (2020), bu çalışmada biyokömürün zemin özellikleri üzerindeki etkilerini incelemek için çok sayıda deneyi analiz etmiştir. Sonuçlar, biyokömürün zemini daha az yoğun hâle getirdiğini ve su tutma kapasitesini artırdığını göstermiştir; bu etki özellikle kumlu (iri taneli) topraklarda belirgindir. Orta dokulu topraklarda hafif bir iyileşme gözlenmiş, kil içeren (ince taneli) topraklarda ise değişim çok az olmuştur. Biyokömür, bitkiler için kullanılabilir su miktarını en çok kumlu topraklarda artırmıştır. Araştırmacılar ayrıca farklı biyokömür çalışmalarını daha adil bir

şekilde karşılaştırmak için yeni bir ölçüt geliştirmiştir. Biyokömürün su tutma üzerindeki etkilerini tam olarak anlamak için zemin ve biyokömürle ilgili bilgilerin daha iyi raporlanması gerektiğini vurgulamaktadır (Şekil 4.).



Şekil 4. Biyokömür ve zemin özelliklerine ilişkin incelenen makalelerde sunulan bilgilerin genel özeti(Razzaghi ve diğ. 2020)

Zukri ve Nazir (2018) bu çalışmada, yumuşak zeminlerin iyileştirilmesinde yaygın olarak kullanılan taş kolon yöntemini incelemiş ve özellikle kolon dolgu malzemelerinin seçimi, performansı ile alternatif malzemelerin sürdürülebilirlik açısından potansiyelini değerlendirmiştir. Çalışmada, taş kolonların 20–75 mm boyutlarında taş, çakıl veya kum gibi granüler malzemelerin dikey çukurlara sıkıştırılmasıyla oluşturulduğu; zemin taşıma gücünü artırmak, oturmaları azaltmak ve zayıf zeminleri iyileştirmek için kullanıldığı vurgulanmıştır. Dolgu malzemesinin dayanımı ve çevre zeminin kısıtlama basıncı, kolon kapasitesini belirleyen ana parametreler olarak ele alınmıştır. Yapılan araştırmaların pek çok alternatif malzemenin —uçucu kül, kömür taban külü, geri dönüştürülmüş agrega, lastik kırpıntıları, polipropilen kırıkları, PFA, silikomanganez cürufu, taş tozu, kireçtaşı, kum vb.— taş kolon dolgusu olarak kullanılabileceğini gösterdiğini belirtmiştir. Bu

malzemeler laboratuvar deneyleri ve sayısal analizlerle olumlu performans göstermiş ve hem ekonomik hem çevresel faydalar sağlamıştır. Bulguların sahada tam ölçekli uygulamalarla doğrulanması gerektiğini vurgulamış ve ezilmiş atık cam ile hafif genleştirilmiş kil agregası (LECA) gibi potansiyel dolgu malzemeleri üzerinde araştırmalar yapılmasının önemini önermiştir. Sonuç olarak, alternatif ve geri dönüştürülmüş malzemelerin kullanımı taş kolon teknolojisini daha sürdürülebilir hâle getirebilmektedir.

Rahardjo ve diğ. (2016) bu çalışmada, iklim değişikliğinin artan şiddetli yağış olayları nedeniyle Singapur'da şev stabilitesinin nasıl etkilendiğini incelemektedir. Literatür, dünya genelinde—özellikle tropikal bölgelerde—aşırı yağışların giderek arttığını ve bu durumun yağış kaynaklı şev göçmelerinde önemli rol oynadığını göstermektedir. Çalışmada Gumbel dağılımı kullanılarak 6 farklı yağış süresi (10–30 dakika, 1–2–24 saat) ve 6 farklı geri dönüş periyodu (2–100 yıl) için yeni IDF (Intensity-Duration-Frequency) eğrileri geliştirilmiştir. Elde edilen yeni IDF eğrileri, sızma ve şev stabilite analizlerinde kullanılmıştır. Sonuçlar, yeni IDF eğrilerinden elde edilen yağış şiddetleriyle analiz edilen şevlerin güvenlik katsayısının eski IDF eğrilerine göre daha düşük çıktığını göstermiştir. Bu da gelecekteki olası yağışların mevcut tasarım kriterlerinden daha tehlikeli olabileceğini ortaya koymaktadır. Çalışmanın sınırlılığı tek tip zemin üzerinden değerlendirme yapılmış olmasıdır; bu nedenle farklı zemin türleri için analizlerin genişletilmesi önerilmektedir.

Basu ve diğ. (2015) bu çalışmada, sürdürülebilirlik kavramının jeoteknik mühendisliğiyle olan ilişkisini sistematik biçimde ele almakta ve sürdürülebilirliğin küresel ölçekte birbirine bağlı sosyal, çevresel, ekonomik ve mühendislik sistemlerinin dengesi ile doğrudan ilişkili olduğunu vurgulamaktadır. Sürdürülebilirlik, bir sistemde arzın talebi karşılaması üzerine

kuruludur ve zaman boyutu bu ilişkinin en kritik determinanıdır. İnsanlığın yaşamını sürdürdüğü tüm mühendislik sistemleri doğal kaynakları tüketirken eş zamanlı olarak atık ve emisyon üretir; dolayısıyla mühendislik ürünlerinin ekonomik, dayanıklı, fonksiyonel ve çevresel açıdan sorumlu olması sürdürülebilirliğin temel dayanaklarındandır. İnşaat sektörü dünya enerji tüketiminin yaklaşık %40'ını oluşturmakta, doğal agrega kaynaklarını hızla tüketmekte ve iklim değişimi, erozyon, arazi bozulması, ormansızlaşma gibi çevresel sorunlara önemli düzeyde katkı sağlamaktadır. Jeoteknik projeler yalnızca araziyi fiziksel olarak değiştirmekle kalmayıp toplumsal, çevresel ve ekonomik dengeleri uzun vadede etkileyen kalıcı dönüşümler yaratmaktadır. Bu nedenle sürdürülebilir jeoteknik süreçlerin geliştirilmesi hem kaynak kullanımının azaltılması hem de altyapı güvenliğinin artırılması açısından kritik önem taşımaktadır. Sonuç olarak çalışma, jeoteknik mühendisliğinde sürdürülebilirliğin sağlanmasının yalnızca malzeme seçimiyle sınırlı olmadığını, aynı zamanda sosyal, ekonomik, çevresel etkilerin yanı sıra güvenilirlik ve dayanıklılık bileşenlerinin bütüncül bir sistem yaklaşımıyla ele alınmasını gerektirdiğini vurgulamaktadır.

Sonuç

Bu bölümde incelenen çalışmalar, sürdürülebilir geoteknik uygulamaların ve yenilikçi zemin iyileştirme tekniklerinin zemin mühendisliğinde giderek daha merkezi bir rol üstlendiğini göstermektedir. Araştırmalar, biyomateryaller, atık temelli malzemeler, geopolimerler ve mikroorganizma tabanlı çözümlerin hem çevresel etkileri azaltarak hem de mühendislik performansını artırarak geleneksel yöntemlere güçlü alternatifler sunduğunu ortaya koymuştur. Biyogeoteknik yaklaşımlar, özellikle MICP ve diğer süreçler sayesinde, zemin dayanımını artırmak ve taşıma kapasitesini iyileştirmek için etkili bir yöntem olarak doğrulanmıştır. Biochar, nano-kil ve doğal lif katkıları gibi ekolojik malzemeler,

hidrolik özelliklerin iyileştirilmesi, oturmaların azaltılması ve zemin rijitliğinin artırılmasında önemli avantajlar sağlamaktadır.

Atık malzemelerin geoteknik uygulamalarda kullanımı, yalnızca çevresel sürdürülebilirliği desteklemekle kalmayıp, aynı zamanda ekonomik verimliliği artırmakta ve doğal kaynakların kullanımını azaltmaktadır. Lastik kırpıntıları, uçucu kül, kömür külü ve diğer geri dönüştürülmüş malzemeler, hafif dolgu, taş kolon dolgusu ve istinat yapıları gibi birçok mühendislik uygulamasında başarılı performans göstermiştir. Ayrıca, şehir ve havza ölçeğinde sürdürülebilir su yönetimi yaklaşımları, sünger şehir modelleri ile entegre edilerek, su direncini artırmak ve taşkın riskini azaltmak açısından kritik bir çerçeve sunmaktadır.

Sonuç olarak, sürdürülebilir geoteknik ve yenilikçi zemin iyileştirme yöntemleri, çevresel sorumluluk ve mühendislik performansını bir araya getirerek geleceğin altyapı projeleri için vazgeçilmez bir temel oluşturmaktadır. Geoteknik mühendislerinin, biyoloji, kimya ve çevre bilimleri ile disiplinler arası bilgiye sahip olması, bu çözümlerin saha uygulamalarına etkin bir şekilde aktarılmasını sağlayacak ve sürdürülebilir bir mühendislik pratiğini destekleyecektir.

Kaynakça

Abu Yosef, S., Balkaya, M., Güven, H., & Fares, A. (2026). Life cycle assessment of fly ash, olive cake ash, and zeolite for environmentally sustainable soil stabilization. *International Journal of Environmental Science and Technology, 23*(2), 100–118. https://doi.org/10.1007/s13762-025-06890-8

Al Khazaleh, M., Karumanchi, M., Bellum, R. R., & Subramani, A. K. (2024). Experimental assessment of geotechnical properties of nano-clay-stabilized soils: advanced sustainable geotechnical solution. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering, 10*, 8. https://doi.org/10.1007/s40891-023-00517-z

AlNaje, F. Q., Abed, A. H., & Al-Taie, A. J. (2025). A review of sustainable materials to improve geotechnical properties of soils. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation, 10*(1), 45–67. https://doi.org/10.1007/s41024-025-00123-4

Balreddy, M. S., Sajjan, S. S., Pruthviraja, D., & Naganna, S. R. (2024). Utilization of alkali-treated areca fibers for stabilizing silty sand soil for use in pavement subgrades: Analysis using IITPAVE software. *Emergent Materials*, *7*(4), 1927-1939. https://doi.org/10.1007/s42247-024-00710-4

Bangalore Ramu, M., Baarimah, A. O., Mokaizh, A. A. B., Mushtaha, A. W., Al-Mekhlafi, A. B. A., Alawag, A. M., & Alzubi, K. M. (2025). Turning Waste into Resources: Bibliometric Study on Sand–Rubber Tire Mixtures in Geotechnical Engineering. *Geotechnics, 5*(4), 71. https://doi.org/10.3390/geotechnics5040071

Basu, D., Misra, A., & Puppala, A. J. (2015). Sustainability and geotechnical engineering: Perspectives and review. *Canadian*

Geotechnical Journal. 52(1): 96-113. https://doi.org/10.1139/cgj-2013-0120

Bhagatkar, P. M., & Lamba, A. (2024). An empirical review of innovative soil improvement techniques in geotechnical engineering. *Mesopotamian Journal of Civil Engineering, 2024*, 42-53. https://orcid.org/0000-0001-8227-1880

Dienta, M., & Bağriaçik, B. (2024). Investigation into the use of non-woven geotextiles in soil stabilization. *Arabian Journal of Geosciences*, *17*(11), 290. https://doi.org/10.1007/s12517-024-12056-6

Dinç, B. K., Dehghanian, K., & Etminan, E. (2025). Sustainable soil stabilization using colemanite: Experimental and numerical analysis of sandy soils for improved geotechnical properties. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation, 10*(2), 133. https://doi.org/10.1007/s41024-025-00640-6

Eze, K. N., Shorunke, M. O., Ilesanmi, O. O., Anosike, C. U., Ezeanowai, U. H., & Adekunle, O. H. (2025). Sustainability in management for unsaturated mine tailings dams amidst climate change. *Discover Geoscience, 3*(1), 112. https://doi.org/10.1007/s44288-025-00222-6

Hussain, R., Ghosh, K.K., Garg, A., & Ravi, K. (2021). Effect of biochar produced from mesquite on the compaction characteristics and shear strength of a clayey sand. *Geotechnical and Geological Engineering, 39*(2), 1117–1131. https://doi.org/10.1007/s10706-020-01549-2

Jastrzębska, M. (2025). Use of alternative materials in sustainable geotechnics: state of world knowledge and some examples from Poland. *Applied Sciences*, *15*(6), 3352. https://doi.org/10.3390/app15063352

Kasehchi, E., Arjomand, M. A., & Alizadeh Elizei, M. H. (2024). Experimental investigation of the feasibility of stabilizing inshore silty sand soil using geopolymer based on ceramic waste powder: An approach to upcycling waste material for sustainable construction. *Case Studies in Construction Materials, 20*, e02979. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e02979

Kumar, R., & Kumari, S. (2023). Geotechnical properties of materials used in landfill clay liner: A critical review. *Sādhanā, 48*(2), 64. https://doi.org/10.1007/s12046-023-02124-0

Liu, Q., Cui, W., Tian, Z., Tang, Y., Tillotson, M., & Liu, J. (2022). Stormwater management modeling in "Sponge City" construction: Current state and future directions. *Frontiers in Environmental Science, 9*, 816093. https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.816093

Macías-Párraga, M., Torrijo Echarri, F. J., Alonso-Pandavenes, O., & Garzón-Roca, J. (2025). Improvement of expansive soils: A review focused on applying innovative and sustainable techniques in the Ecuadorian coastal soils. *Journal of Sustainable Geotechnical Engineering, 13*(1), 45–68. https://doi.org/10.1016/j.jsg.2025.100567

Pham, T. A. (2025). Climate change impacts on geotechnical infrastructure: role of unsaturated soil mechanics for adaptation. *Frontiers in Built Environment*, *11*, 1666334. https://doi.org/10.3389/fbuil.2025.1666334

Pouladi, B., Bour, O., Longuevergne, L., de La Bernardie, J., & Simon, N. (2021). Modelling borehole flows from Distributed Temperature Sensing data to monitor groundwater dynamics in fractured media. *Journal of Hydrology*, *598*, 126450. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126450

Rahardjo, H., Satyanaga, A., & Leong, E. C. (2016). Effects of rainfall characteristics on the stability of tropical residual soil slope.

Razzaghi, F., Obour, P. B., & Arthur, E. (2020). Does biochar improve soil water retention? A systematic review and meta-analysis. *Geoderma, 361*, 114055. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114055

Reddy, A. S., Iyer, K. K., & Dave, T. N. (2024). Alkali activated soil stabilization as a sustainable pathway for the development of resilient geotechnical infrastructure. *Indian Geotechnical Journal, 54*(3), 945-970. https://doi.org/10.1007/s40098-024-00893-x

Sarma, N. J., & Dey, A. (2024). Improvement of long-term performance of unpaved road constructed over marginalized subsoil using geotextile reinforcement. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering, 10*(3), 39. https://doi.org/10.1007/s40891-024-00550-6

Shahid, S. (2022, April). Review on biogeotechnics for soil treatment. In Proceedings of the 7th World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineering (CSEE'22), Virtual Conference (pp. 10-12).

Shireen, K., Varghese, R. M., & Sankar, N. (2025). Sustainable utilization of lightweight waste materials as structural fill for geotechnical applications. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation, 10*(2), 89–108. https://doi.org/10.1088/1757-899X/1114/1/012034

Sun, Q., Meng, J., Lan, Y., Shi, G., Yang, X., Cao, D., ... & Han, X. (2021). Long-term effects of biochar amendment on soil aggregate stability and biological binding agents in brown

earth. *Catena*, *205*, 105460. https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105460

Vieira, C. S. (2022). Sustainability in geotechnics through the use of environmentally friendly materials. *Sustainability, 14*(3), 1155. https://doi.org/10.3390/su14031155

Zukri, A., & Nazir, R. (2018, April). Sustainable materials used as stone column filler: A short review. In IOP conference series: materials science and engineering (Vol. 342, No. 1, p. 012001). *IOP Publishing*. https://doi.org/10.1007/s10706-025-01345-2

BÖLÜM 3

SEISMIC PERFORMANCE ASSESSMENT USING FRAGILITY ANALYSIS OF OLD, MODERN, AND RETROFITTED RC BUILDINGS

M Nadir Olabi[1]

Introduction

Earthquakes represent one of the most devastating natural hazards, with the potential to cause widespread structural damage and significant loss of life. Reinforced concrete (RC) buildings, which constitute a large percentage of the existing housing stock found worldwide in general and especially in Türkiye, exhibit varying levels of seismic performance depending heavily on their period of construction following the design standards in that time. The seismic vulnerability of this existing buildings is a critical concern for engineers and policymakers, particularly since many structures were built before the implementation of modern seismic design codes (Aydogdu et al., 2023; Bilgin et al., 2025; Oz & Omur, 2025). These older, pre-code structures are based on a design philosophy that essentially uses gravity loads only without accounting for lateral seismic forces (Rubini et al., 2025).

[1] Assistant Professor, Bolu Abant Izzet Baysal University, Department of Building Information, Faculty of Architecture, Bolu, Türkiye, nadirolabi@ibu.edu.tr, ORCID: 10000-0003-2735-8961

Consequently, this segment of the building stock is the most vulnerable due to inadequate detailing and the use of materials with limited ductile qualities. Common problems include the incorporation of low-strength concrete and smooth reinforcing bars, which lack the necessary bond strength for reliable RC elements. Furthermore, pre-code detailing often featured inadequate shear capacity in columns due to wide spaced and insufficiently anchored (90o) transverse ties, leading to brittle failure modes (Caglar et al., 2023; Demir et al., 2024; Manfredi, 2025).

The seismic performance between older and newer code compliant construction is vastly divergent, which highlights the urgent necessity for effective retrofitting strategies to enhance structural resilience. Given the steep costs associated with demolishing and replacing existing structures, seismic retrofitting offers a proven and sometimes more economical and feasible path toward risk mitigation (Gkournelos et al., 2021; Aprile & Monti, 2022; Zhang et al., 2024). Columns are typically the most critical elements targeted for rehabilitation, as they are essential for transferring loads and dissipating seismic energy. Among various columns retrofitting techniques, RC jacketing is considered one of the most practical approaches for strengthening existing RC structures due to its efficiency and cost-effectiveness (Raza et al., 2019). As known, RC jacketing works by casting a new layer of concrete with new longitudinal and transverse reinforcement around the original column. While this process achieves an increase to the cross-sectional area, it provides additional confinement to the concrete core. The result is a significant enhancement to both flexural and shear capacity, alongside an improvement in the overall ductility of the retrofitted member. Studies have consistently demonstrated that this approach substantially enhances the member's load-bearing capacity and effectively delays the formation of plastic

hinges under seismic loading (Ersoy et al., 1993; Vandoros & Dritsos, 2008; Campione et al., 2014; Caglar et al., 2019).

A robust, quantitative framework is required to assess and compare the performance improvements achieved by retrofitting. Fragility analysis has been developed as a powerful, probabilistic tool for quantifying seismic risk. A fragility curve provides a graphical representation of the predicted probability of a structure exceeding a specific damage state for a given level of ground shaking intensity. Modern fragility analysis largely relies on numerical simulations due to the limited availability of comprehensive seismic damage data. Moreover, the Incremental Dynamic Analysis (IDA) is a key analytical method employed in performance-based earthquake engineering for evaluating structural response and predicting damage. IDA involves performing a series of nonlinear dynamic analyses on a structural model using earthquake records scaled to increasing intensity levels. The primary advantage of IDA lies in its ability to analyze the entire structural response process, capturing behavior from elasticity through elasto-plasticity to ultimate collapse. The output generated from IDA (Engineering Demand Parameter vs. Intensity Measure) is then used to construct the cumulative fragility curves (Serdar Kirçil & Polat, 2006; Baker, 2015; Cardone, 2016; Adibi & Talebkhah, 2022; Cirak Karakas et al., 2022).

The main goal of this work is to investigate the seismic performance of RC buildings constructed under different design standards, with a particular focus on evaluating the effectiveness of RC jacketing as a retrofitting technique. To achieve this, the study employs numerical models using the OpenSees platform (McKenna et al., 2010) to analyze three distinct archetypes; an older pre-code frame, a modern code-conforming frame, and a retrofitted version of the older frame strengthened via RC jacketing in the first floor. Through the application of Incremental Dynamic Analysis and the

subsequent development of fragility curves, this investigation aims to quantify the probability of exceeding various damage states for each structural type. The comparative work will demonstrate the benefits of RC jacketing in resisting seismic damage and provide an evaluation to the trade-offs between retrofitting existing structures and constructing new ones under modern standards. This will offer practical recommendations for seismic design in high-risk earthquake regions.

Representative Frames Properties

To facilitate a direct comparison of seismic performance, three representative frames; old, modern, and retrofitted with RC jacketing, were designed with identical geometric configurations. The prototype is a five-story, two-dimensional RC frame with four bays. The story height is consistent at 4.0 meters for all floors. The beam spans are 5.0 meters for the two exterior bays and 3.0 meters for the two interior bays, as illustrated in Figure 1. The old frame was designed to represent old and existing buildings with pre-code construction practices, focusing solely on gravity loads. Its columns have a cross-section of 400x400 mm, reinforced with 16 mm diameter smooth steel bars. The specified concrete compressive strength is 12 MPa, characteristic of older construction materials. The modern frame adheres to current seismic design codes, incorporating performance design principles and enhanced detailing for ductility (Figure 2). While it shares the same 400x400 mm column dimensions as the old frame for direct comparison, it utilizes a higher concrete strength of 35 MPa and modern deformed steel reinforcement. The retrofitted frame is based on the old frame after the application of a reinforced concrete jacket to the first floor only. The original 400x400 mm column is retained as the core, with its material properties (12 MPa concrete, 16 mm smooth bars)

unchanged. A 60 mm thick RC jacket is added, using 35 MPa concrete and 20 mm diameter deformed steel reinforcement, resulting in a final column section of 520x520 mm. The geometric and reinforcement details for all three frame types are summarized in Figures 1 and 2.

Figure 1 The RC prototype frame representing old buildings

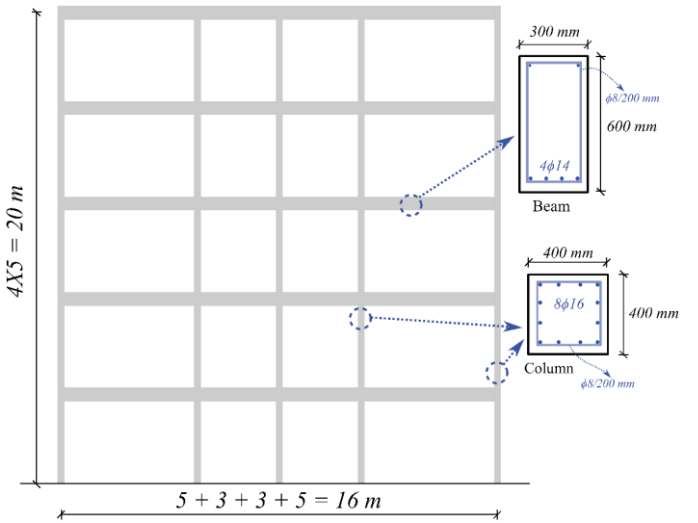
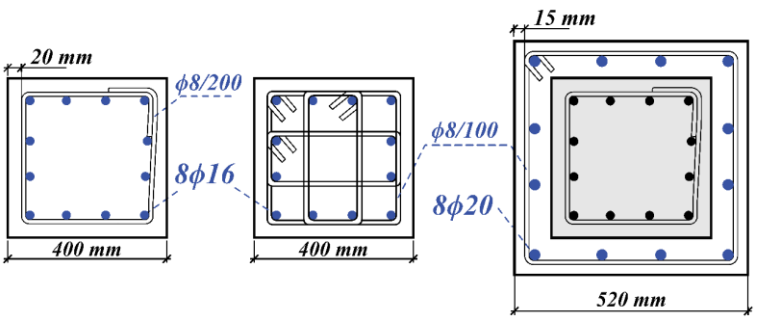


Figure 2 Column section used in the assessment of the RC frames



a) old *b) modern* *c) retrofitted*

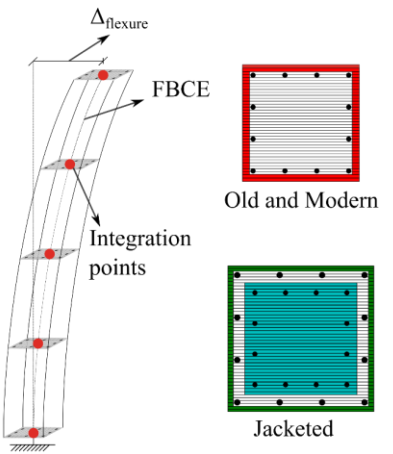
Numerical Model Development

The seismic performance assessment in this study utilizes numerical models of RC frames investigating old, modern, and retrofitted building types. The analysis is carried out within the Open System for Earthquake Engineering Simulation framework, OpenSees (McKenna et al., 2010), through the OpenSeesPy library (Zhu et al., 2018). To capture the material and geometric non-linearities inherent in RC frames under seismic loading, a distributed plasticity approach was adopted. Structural members (beams and columns) were modeled using force-based beam-column elements. This formulation is based on the iterative force method and satisfies equilibrium in a strong form along the element length, providing an accurate representation of plasticity spread without requiring fine mesh refinement, only 5 integration points are used for the elements (Figure 3). Geometric non-linearity, specifically P-Delta effects, was included using the PDelta geometric transformation to account for second-order effects from gravity loads acting on the deformed structure.

The cross-sections of the frame members were discretized using the fiber method. This approach divides the section into a number of concrete and steel fibers (Figure 3), each with its own uniaxial stress-strain relationship, automatically accounting for the interaction between axial force and bending moment. In addition, the selection of appropriate material models is crucial for accurately simulating the hysteretic behavior of RC members. To account for that, the numerical modeling of the concrete components utilized different uniaxial material models to accurately represent the behavior of each column type (Figure 4.a). For modeling modern columns, the unconfined cover concrete was represented using the Concrete02 model from the OpenSees library based on Kent & Park (1971), while the enhanced behavior of the confined core concrete was simulated with the comprehensive Concrete04 model developed

by Mander et al. (1988), which captures the increased strength and ductility from confinement. In contrast, for the old columns, the Concrete02 model was also employed, but with parameters calibrated to reflect their lower material properties, specifically defining a zero stress at an ultimate strain of 0.006 for the cover concrete and a residual stress of 20% at the ultimate strain for the core. To represent the strengthened jacketed columns, the model incorporated a layered approach where the cover concrete was again modeled with Concrete02, the partially confined concrete from the new jacket was calculated according to Mander et al. (1988), and the behavior of the fully confined core of the existing column was determined based on the model by Campione et al. (2014). Further details on the calculations regarding the retrofitted columns can be found in the respective source papers, with a comprehensive overview provided by Caglar et al. (2019).

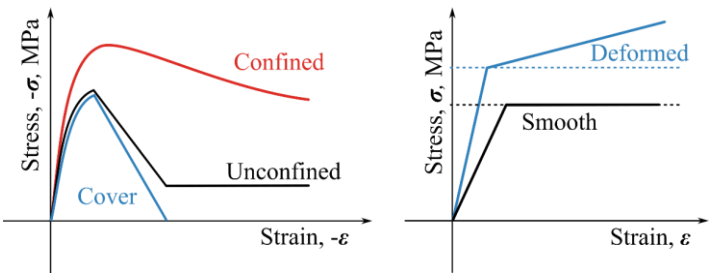
Figure 3 Force-based beam-column elements and fiber sections



Moreover, the reinforcing steel for all columns was modeled using the Giuffré-Menegotto-Pinto model as Steel02 in OpenSees, which employs a bi-linear relationship (Figure 4.b) to effectively capture key characteristics of steel's cyclic response, including the Bauschinger effect and isotropic strain hardening. To account for the bond-slip behavior in the numerical model of the columns, a simplified method was adopted, which modifies the steel material model by reducing its modulus of elasticity by a factor, α. This factor was selected based on previous research (Wang et al., 2019; Melo et al., 2020; Olabi, 2024), with a value of $\alpha = 0.3$ used for the smooth bars in the old columns with smooth bars and a value of $\alpha = 0.8$ for the deformed bars in the modern columns. The model for the jacketed columns consequently incorporated both of these factor values to represent the combined behavior of the existing column with smooth bars and the new jacket with deformed bars.

In addition, to ensure the numerical stability of the analysis when dealing with strain-softening materials, a regularization technique was applied. This approach modifies the material's post-peak stress-strain relationship based on the element's length to maintain constant fracture energy, thereby mitigating mesh dependency issues associated with localization phenomena.

Figure 4 Material models used in OpenSees numerical model



a) *b)*

Figure 5 Modified steel model to consider bar slip effect based on Wang et al. (2019)

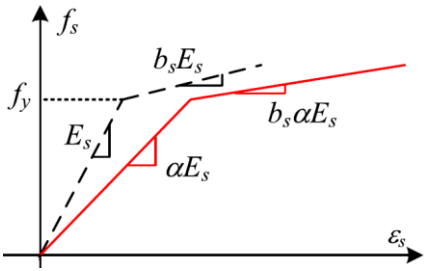
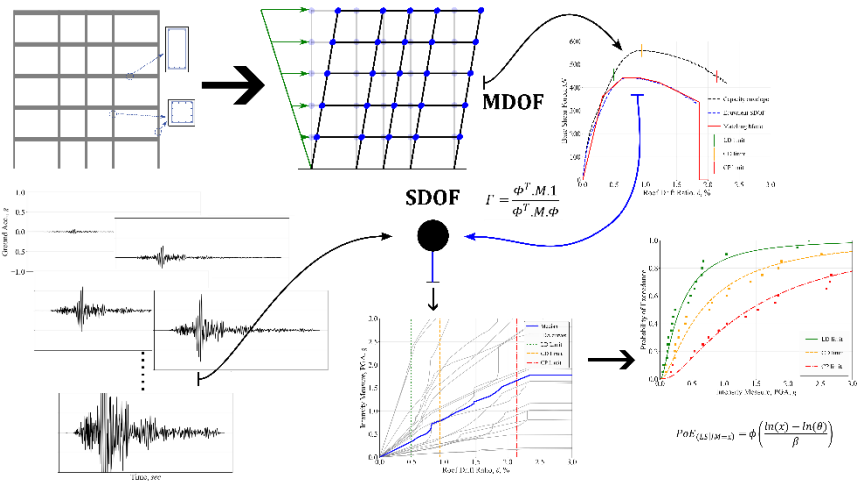


Figure 6 Fragility curves generation process



Fragility Curve Generation Methodology

The procedure employed in this study for the seismic performance assessment of RC frames is based on the N2 method proposed by Fajfar (2000). This method encompasses structural numerical modeling, definition of damage states, and selection of ground motion records. It then proceeds with structural analysis using Incremental Dynamic Analysis (IDA), concluding with the

statistical estimation of the fragility function parameters (Figure 6). To facilitate the Nonlinear time history analysis (NLTHA) and manage computational costs, the multi-degree-of-freedom (MDOF) system representing the RC frame is converted to an equivalent single-degree-of-freedom (SDOF) system.

This procedure starts with performing nonlinear static pushover analysis (NLSA) on the MDOF prototype structure to derive the capacity curve. A modal analysis is also is conducted in this step to determine the modal shapes matrix, Φ. The transformation factor, Γ, is calculated using Equation 1, where M is the mass matrix. As defined in the N2 framework (Fajfar, 2000), the pushover results for the MDOF frame (base shear vs. roof displacement) are converted to the equivalent SDOF system by dividing the curve by the transformation factor, Γ.

$$\Gamma = \frac{\Phi^T . M . 1}{\Phi^T . M . \Phi} \tag{1}$$

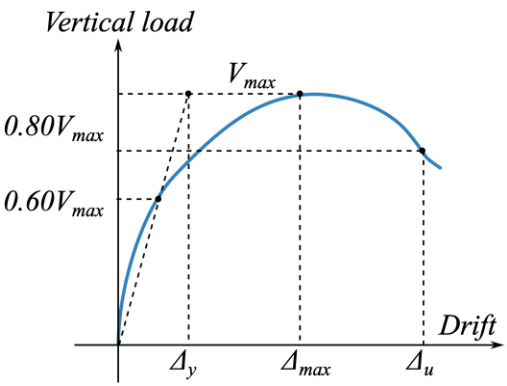
The next step involves developing a numerical model calibrated to match the equivalent SDOF capacity envelope in terms of initial stiffness (K), period, yield strength (V_y), maximum capacity (V_{max}), capping and ultimate displacement (Δ_{max}, Δ_u), post-capping degradation, and dissipated energy. Typically, this is performed using a uniaxial material assigned to zero-length element, and for this study, the HystereticSM material (Mazzoni, 2022) from the OpenSees library is utilized for this purpose.

Definition of damage limit states

Fragility curves quantify the probability of exceeding various damage states as a function of ground motion intensity measure (IM). The limit states (LS) correspond to performance levels determined according to the level of damage observed on the structure during nonlinear analysis procedure, such as from a

pushover curve. Moreover, these states are commonly specified using an engineering demand parameter (EDP) such as the roof displacement (Δ) or maximum inter-story drift ratio. In this work the roof drift ratio (δ) of the studied frames is selected as the EDP, and three limit states chosen for performance assessment as defined in the Türkiye Building Earthquake Code (TBEC, 2018). The yield displacement (Δ_y) corresponding to limited damage (LD) state, the capping displacement at maximum lateral load level defined as controlled damage (CD) state, and finally, the ultimate displacement (Δ_u) reached when the structure loses 20% of its peak strength is defined as the collapse prevention (CP) limit state. Figure 7 shows the displacement points as defined from ACI 374.2R (2013).

Figure 7 Limit states definition from the pushover capacity curve



Ground motion records

The performance analysis requires a suite of earthquake records selected to be representative of the seismic hazard characteristics of the site. Key parameters considered during selection include the magnitude range, distance from the causative fault, and local site conditions, such as soil type and average shear

wave velocity. Standard practice often involves scaling these records to a target response spectrum relevant to the building's site to ensure hazard consistency and spectral compatibility. For a robust dynamic analysis, guidelines typically recommend using a set of approximately 11 ground motions (GM). However, in this study, as the analyzed old frame is representative of typical old and existing buildings found throughout Türkiye, and all selected ground motions were sourced from recent Turkish earthquakes, the records were used without scaling to preserve their inherent characteristics. As shown in Table 1, five recent significant earthquake events in Türkiye are selected for this study (AFAD, 2022). A total of 20 individual record components was curated for the analysis, where these records were collected from the five earthquakes. For each event, two station locations were selected, the nearest to the epicenter and another station at a reasonable distance of approximately 100-150 km. For each of these stations, both horizontal components (North-South, N-S, and East-West, E-W) of the ground motion were included in the set to adequately capture the variability in seismic demand.

Table 1 Characteristics of the selected earthquake events

Event	M_w	Depth (km)	Station Code	Epicenter distance (km)	PGA (g)
Van 2011	6.7	19.0	TK0401 TK6503	121.0 42.2	0.0187 (N) 0.1819 (N)
Elaziğ 2020	6.8	8.0	TK2308 TK6304	23.8 120.6	0.2986 (E) 0.0784 (E)
Düzce 2022	5.9	6.8	TK2617 TK8105	96.4 13.9	0.0214 (E) 0.6037 (E)
Kahramanmaraş 2023	7.7	8.6	TK3135 TK4615	142.1 13.8	1.3991 (E) 0.5952 (E)
Balıkesir 2025	6.1	11.0	TK1015 TK1634	8.2 90.5	0.3062 (E) 0.0428 (E)

Incremental Dynamic Analysis

Nonlinear time history analysis (NLTHA) is necessary to properly model the inelastic structural behavior under seismic action. Incremental Dynamic Analysis (IDA) is performed using the selected suite of earthquake records to generate the required data for fragility curve generation. To achieve this, IDA involves repeatedly scaling each selected ground motion to multiple intensity measure (IM) levels and performing a nonlinear dynamic analysis at each level. The analysis records the maximum response parameters (EDP) for each IM level. In this study, the peak ground acceleration (PGA) and roof drift ratio (δ) are chosen as the IM and EDP, respectively. Additionally, the ground motion records are incrementally scaled to force the structure through the entire range of behavior, covering all of the defined limit states (LD, CD, and CP). The incrementing process stops when the onset of collapse is observed, identified typically by numerical non-convergence or global dynamic instability. Subsequently, the discrete data points of IM versus EDP obtained from these analyses are then interpolated, typically using cubic splines, to generate a continuous IDA curve for each record. The complete set of these curves provides the foundational data required for the subsequent development of seismic fragility curves.

Fragility functions estimation

A fragility function specifies the structure's probability of exceeding (PoE) a limit state (LS) as a function of the ground motion intensity measure (IM). The fragility function, shown in Equation 2, is modeled using a lognormal cumulative distribution function (CDF), ϕ. In the equation, θ is the median IM level at LS, and β is the standard deviation of $ln(IM)$ which called dispersion. Calibration is required to estimate these parameters (θ and β) from the structural analysis results. This process employs The Maximum Likelihood Estimation which involves defining a log-likelihood

objective function and using numerical optimization to find the parameter estimates that maximize the likelihood of having observed the collected IM data (Baker, 2015). The final fragility curve (PoE) is then calculated using the fitted parameters over a range of IM values. The fitted fragility curves generated via this strict probabilistic approach provide a comparative framework for evaluating the performance trends and seismic resilience across the different building types.

$$PoE_{(LS|IM=x)} = \phi\left(\frac{ln(x) - ln(\theta)}{\beta}\right) \quad (2)$$

Results and Discussion

The seismic performance of the three representative RC frames was evaluated through a series of numerical analyses. The results from the modal analysis, nonlinear static (pushover) analysis, and Incremental Dynamic Analysis (IDA) are presented and discussed, accomplishing in a comparison of the derived fragility curves.

Modal and pushover analysis

The dynamic properties of the frames, determined via modal analysis, are listed in Table 2. As seen from the table, the old frame exhibits the longest fundamental period, $T_1 = 1.538s$, indicating the highest flexibility. This is consistent with its design assumptions based only on gravity loads and the use of low-strength 12 MPa concrete with smooth reinforcement bars. On the other hand, the modern frame, despite identical column dimensions, is significantly stiffer with dominated first period equals $1.128s$. This can be attributed to the higher concrete strength (35 MPa) and deformed

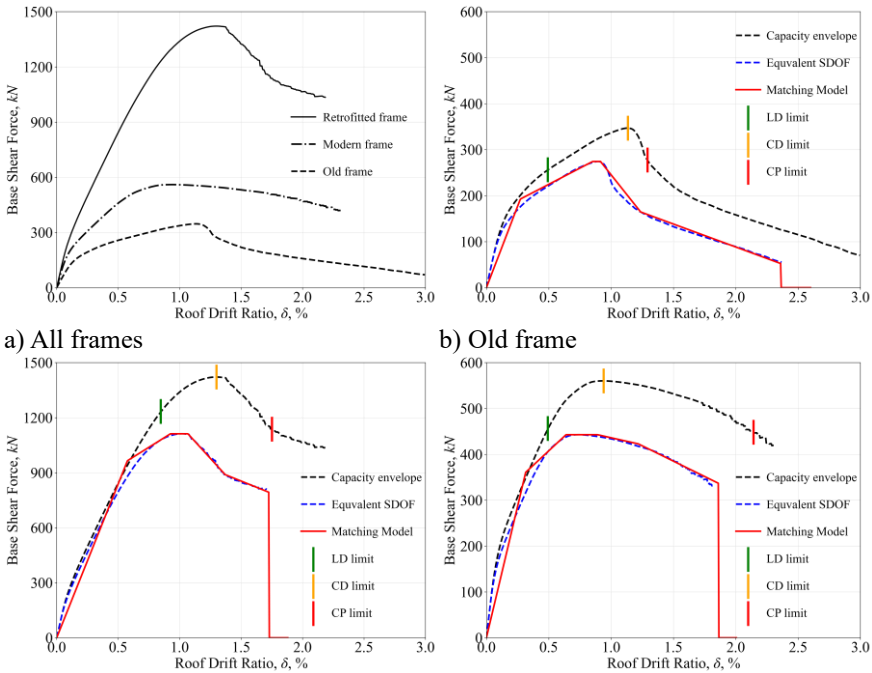
bars with less bond-slip effect. Moreover, the jacketed frame is the stiffest with $T_1 = 1.009s$, which is an expected consequence of the increased cross-sectional area (from 400x400 mm to 520x520 mm) and the addition of high-strength concrete and reinforcement from the RC jacket.

Table 2 The fundamental periods of the three frames

Frame	1st	2nd	3rd	4th	5th
Old	1.538	0.511	0.306	0.225	0.189
Modern	1.128	0.374	0.223	0.163	0.136
Jacketed	1.009	0.318	0.174	0.116	0.091

The lateral load-resisting capacity of the frames was determined using nonlinear static pushover analysis, with the resulting capacity curves shown in Figure 8. The old frame shows the lowest capacity, reaching a peak base shear of 346.9 kN. More importantly, it exhibits a rapid and severe strength degradation after its peak, which occurs at a roof drift ratio of approximately 1.25%. This behavior expresses low ductility and a brittle failure mode, which are characteristics of old and exciting pre-code structures built with smooth reinforcement and inadequate confinement. On the contrary, the modern frame demonstrates substantial improved performance with a higher peak strength at 560.4 kN and a much more ductile response, maintaining its lateral capacity over a larger drift range. The retrofitted frame shows a pronounced enhancement in performance. The RC jacketing increased the peak lateral strength to 1421.3 kN, more than four times that of the old frame and 2.5 times that of the modern frame. This clearly illustrates the effectiveness of RC jacketing in enhancing both strength and stiffness.

Figure 8 Capacity curve comparison of original frames, the equivalent SDOF, and the matching numerical model

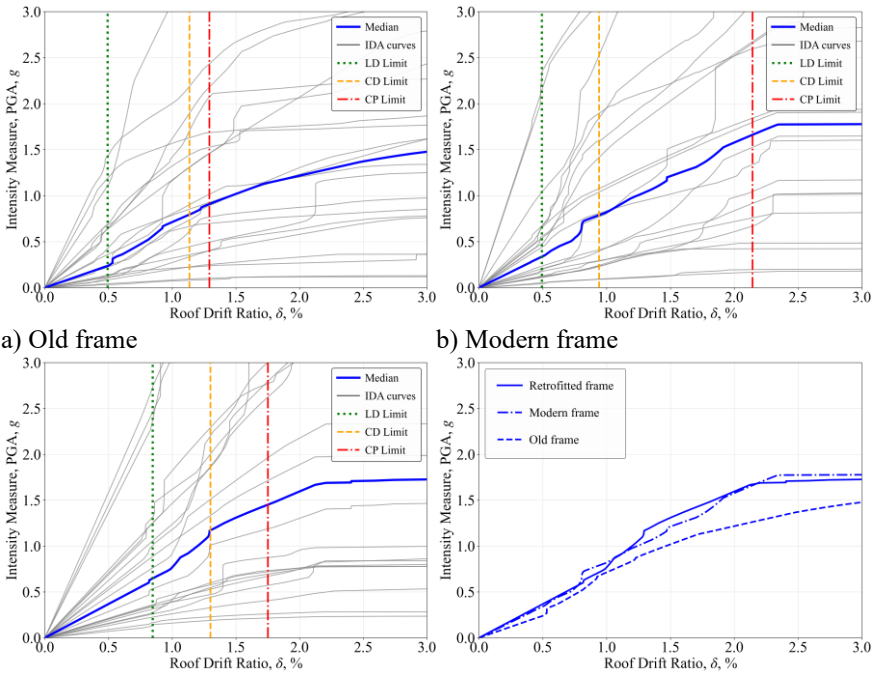


a) All frames b) Old frame

c) Retrofitted frame d) Modern frame

Figure 8.b-d shows the capacity envelopes alongside the equivalent SDOF curves with the numerically calibrated "Matching Models". These models, which utilize the HystereticSM uniaxial material (Mazzoni, 2022), accurately capture the key characteristics of the equivalent SDOF to the frames in terms of initial stiffness, peak strength, and post-capping degradation. The defined performance limit states (Limited Damage, Controlled Damage, and Collapse Prevention) are marked on these curves and form the basis for the subsequent fragility analysis.

Figure 9 IDA curves for three frame types and d) median curves comparison



a) Old frame b) Modern frame

c) Retrofitted frame d) median curves

IDA curves

The matching model of the SDOF systems were subjected to IDA using the 20 selected ground motion records. The results, plotting the intensity measure (IM) of PGA against the engineering demand parameter (EDP) of roof drift ratio (δ), are presented in Figure 9. The individual IDA curves (gray lines) for all three frames shown in the figure display a big variability lighting on the necessity of a probabilistic approach. The vertical lines indicate the roof drift ratios corresponding to the LD, CD, and CP limit states derived from the pushover analysis. Additionally, direct comparison of the median IDA curves is provided in Figure 9.d. The median curve for the old frame is the lowest, confirming its high vulnerability; where it

reaches large drift levels at relatively low PGA values. At the same time, the modern and retrofitted frames show vastly superior performance, requiring much higher seismic intensities to reach the same drift levels. It is worth noting that the median curves for the modern and retrofitted frames are in a remarkable proximity. This indicates that the RC jacketing retrofit strategy (even with strengthening the first floor only) successfully elevated the seismic performance of the vulnerable old frame to a level that is comparable to that of a new, code-compliant modern structure.

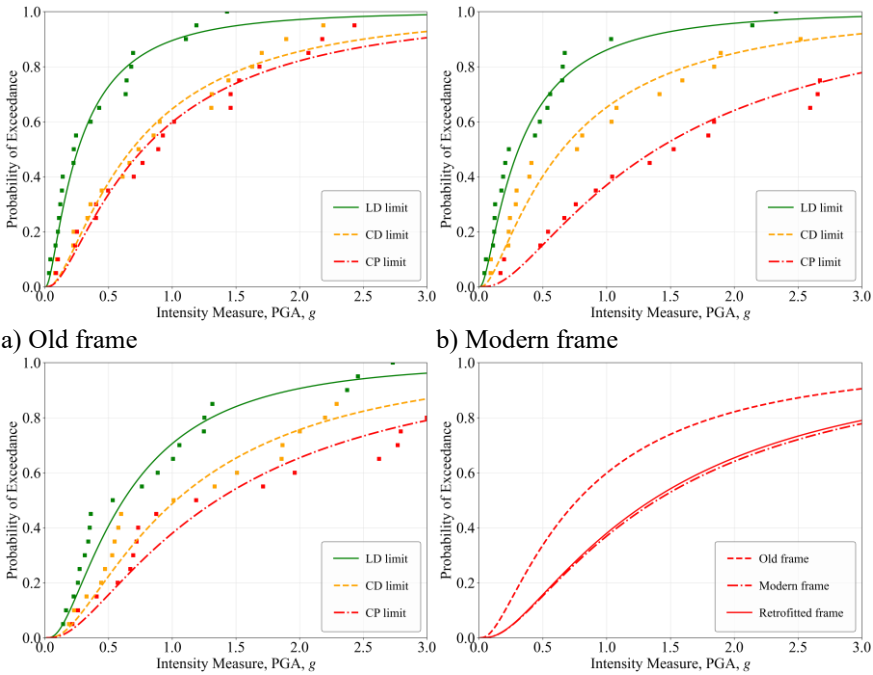
Fragility curves

The fragility curves, which represent the probability of exceeding each limit state (LD, CD, CP) for a given PGA, are the final output of the assessment. These curves, generated by fitting the lognormal CDF to the IDA results are shown in Figure 10. A curve positioned further to the right signifies better seismic performance, as a higher PGA is needed to induce the same probability of damage. For the old Frame (Figure 10.a), the curves are shifted significantly to the left. The LD curve rises steeply, indicating a high probability of damage (PoE > 80%) at a relatively low PGA. The CP curve shows a 50% probability of collapse at a PGA of approximately 1.0 g. On the other hand, modern frame curves (Figure 10.b) are shifted to the right quantifying the significant safety improvement provided by modern seismic codes. Similarly, the curves of the jacketed frame (Figure 10.c) are nearly identical to, and in the case of CP slightly to the right of, the curves obtained for the modern frame.

The comparison of the Collapse Prevention (CP) limit state for all three frames in Figure 10.d provides the most critical finding of this study. The fragility curves for the modern and retrofitted frames are almost perfectly aligned, while the curves of the old frame show a much higher probability of failure at any given PGA. This result systematically demonstrates that the RC jacketing was highly

effective despite of retrofitting the columns in the first floor only. It successfully transformed the vulnerable, pre-code structure into a resilient frame with a seismic risk profile statistically indistinguishable from that of a newly constructed, modern code-conforming building. This directly supports the objective of evaluating retrofitting as an important alternative to new construction for seismic risk limitation.

Figure 10 Fragility curves for three frame types and d) at CP limit state comparison



a) Old frame b) Modern frame

c) Retrofitted frame d) limit state @CP

Conclusions

This study investigated the seismic performance of reinforced concrete buildings under different design standards,

specifically evaluating the effectiveness of RC jacketing as a retrofitting technique. Three 5-story, 4-bay RC frames were modeled in OpenSees to represent an old pre-code structure, a modern code-compliant structure, and a strengthened jacketed version of the old frame. The old frame was characterized by low-strength concrete (12 MPa) and smooth reinforcement, designed only for gravity loads. The modern frame used higher-strength materials (35 MPa concrete and deformed bars), while the jacketed frame involved adding a 60 mm RC jacket to the columns in the first floor of the old frame. The methodology involved modal analysis, nonlinear static (pushover) analysis, and Incremental Dynamic Analysis using 20 ground motion records from recent Turkish earthquakes. The results were used to generate probabilistic fragility curves for Limited Damage (LD), Controlled Damage (CD), and Collapse Prevention (CP) limit states.

The results showed that the pre-code old frame was the less stiff of the three frames and exhibited the lowest lateral capacity with rapid strength degradation, confirming its high vulnerability and brittle failure mode. At the same time, the modern frame was significantly stiffer and stronger with a high ductile response consistent with current seismic codes. The RC jacketed frame showed a dramatic improvement in performance, becoming the stiffest and increasing its lateral strength by over 300% compared to the old frame that represents existing RC buildings.

The fragility analysis provided the most critical conclusion since the collapse fragility curves for the retrofitted frame and the modern frame were nearly identical. This quantitatively demonstrates that RC jacketing is a highly effective strategy, successfully upgrading the seismic resilience of the vulnerable, pre-code structure to a level of safety comparable to that of a new, modern code-conforming building.

References

ACI 374.2R. (2013). Guide for Testing Reinforced Concrete Structural Elements Under Slowly Applied Simulated Seismic Loads. In 374.2 R-13. American Concrete Institute.

Adibi, M., & Talebkhah, R. (2022). Development of seismic fragility curves for the existing RC building with plain bars. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 26(10), 4709–4724. https://doi.org/10.1080/19648189.2020.1864667

AFAD. (2022). Earthquake Catalog. https://deprem.afad.gov.tr/event-catalog

Aprile, A., & Monti, G. (2022). Advanced Methods for Structural Rehabilitation. Buildings, 12(1), 79. https://doi.org/10.3390/buildings12010079

Aydogdu, H. H., Demir, C., Kahraman, T., & Ilki, A. (2023). Evaluation of rapid seismic safety assessment methods on a substandard reinforced concrete building stock in Istanbul. Structures, 56, 104962. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.104962

Baker, J. W. (2015). Efficient Analytical Fragility Function Fitting Using Dynamic Structural Analysis. Earthquake Spectra, 31(1), 579–599. https://doi.org/10.1193/021113EQS025M

Bilgin, H., Biglari, M., & Hysenlliu, M. (2025). Seismic fragility of masonry building stock in the Southwestern Balkans. Bulletin of Earthquake Engineering. https://doi.org/10.1007/s10518-025-02296-6

Caglar, N., Sezen, H., & Olabi, M. N. (2019). Numerical evaluation of core concrete quality on the response of concrete jacketed columns. Revista De La Construccion, 18(2), 301–310. https://doi.org/10.7764/RDLC.18.2.301

Caglar, N., Vural, I., Kirtel, O., Saribiyik, A., & Sumer, Y. (2023). Structural damages observed in buildings after the January 24, 2020 Elazığ-Sivrice earthquake in Türkiye. Case Studies in Construction Materials, 18, e01886. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e01886

Campione, G., Fossetti, M., Giacchino, C., & Minafò, G. (2014). RC columns externally strengthened with RC jackets. Materials and Structures, 47(10), 1715–1728. https://doi.org/10.1617/s11527-013-0146-x

Cardone, D. (2016). Fragility curves and loss functions for RC structural components with smooth rebars. Earthquakes and Structures, 10(5), 1181–1212. https://doi.org/10.12989/EAS.2016.10.5.1181

Cirak Karakas, C., Palanci, M., & Senel, S. M. (2022). Fragility based evaluation of different code based assessment approaches for the performance estimation of existing buildings. Bulletin of Earthquake Engineering, 20(3), 1685–1716. https://doi.org/10.1007/s10518-021-01292-w

Demir, A., Günay, S., Marinković, M., Dilsiz, A., Bektaş, N., Khalil, Z., Arslan, M. E., Altunisik, A. C., Caglar, N., Mosalam, K., & Sezen, H. (2024). 2022 Düzce, Türkiye earthquake: Advances in the past 2 decades, lessons learned, and future projections. Bulletin of Earthquake Engineering, 22(11), 5835–5862. https://doi.org/10.1007/s10518-024-01984-z

Ersoy, U., Tankut, A. T., & Suleiman, R. E. (1993). Behavior of jacketed columns. ACI Structural Journal, 90(3), 288–293.

Fajfar, P. (2000). A Nonlinear Analysis Method for Performance-Based Seismic Design. Earthquake Spectra, 16(3), 573–592. https://doi.org/10.1193/1.1586128

Gkournelos, P. D., Triantafillou, T. C., & Bournas, D. A. (2021). Seismic upgrading of existing reinforced concrete buildings: A state-of-the-art review. Engineering Structures, 240, 112273. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112273

Kent, D. C., & Park, R. (1971). Flexural members with confined concrete. Journal of the Structural Division, 97(7), 1961–1990.

Mander, J. B., Priestley, M. J. N., & Park, R. (1988). Theoretical stress-strain model for confined concrete. Journal of Structural Engineering, 114(8), 1804–1826. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1988)114:8(1804)

Manfredi, V. (2025). Collapse Analyses of Pre- and Low-Code Italian RC Building Types. Buildings, 15(8), 1263. https://doi.org/10.3390/buildings15081263

Mazzoni, S. (2022). HystereticSM Material, OpenSees documentation. https://opensees.github.io/OpenSeesDocumentation/user/manual/material/uniaxialMaterials/HystereticSM.html

McKenna, F., Scott, M. H., & Fenves, G. L. (2010). Nonlinear finite-element analysis software architecture using object composition. Journal of Computing in Civil Engineering, 24(1), 95–107. https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000002

Melo, J., Varum, H., & Rossetto, T. (2020). Numerical modeling of RC columns and a modified steel model proposal for elements with plain bars. Frontiers in Built Environment, 6, 586690. https://doi.org/10.3389/fbuil.2020.586690

Olabi, M. N. (2024). Parametric Evaluation of Slip Models for Reinforced Concrete Columns with Smooth Bars. In 5th

International Engineering Research Symposium: Proceeding Book (pp. 128–136). Düzce University.

Oz, I., & Omur, M. (2025). Evaluating the Seismic Fragility and Code Compliance of Turkish Reinforced Concrete Buildings After the 6 February 2023 Kahramanmaraş Earthquake. Applied Sciences, 15(10), 5554. https://doi.org/10.3390/app15105554

Raza, S., Khan, M. K. I., Menegon, S. J., Tsang, H.-H., & Wilson, J. L. (2019). Strengthening and Repair of Reinforced Concrete Columns by Jacketing: State-of-the-Art Review. Sustainability, 11(11), 3208. https://doi.org/10.3390/su11113208

Rubini, G., Calvi, G. M., & Gentile, R. (2025). Direct loss-based seismic retrofit of reinforced concrete frames. Bulletin of Earthquake Engineering, 23(1), 327–357. https://doi.org/10.1007/s10518-024-02027-3

Serdar Kirçil, M., & Polat, Z. (2006). Fragility analysis of mid-rise R/C frame buildings. Engineering Structures, 28(9), 1335–1345. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2006.01.004

TBEC. (2018). Türkiye Building Earthquake Code. Disaster and Emergency Management Presidency (AFAD), Ministry of Public Works and Settlement.

Vandoros, K. G., & Dritsos, S. E. (2008). Concrete jacket construction detail effectiveness when strengthening RC columns. Construction and Building Materials, 22(3), 264–276. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.08.019

Wang, Z.-H., Li, L., Zhang, Y.-X., & Zheng, S.-S. (2019). Reinforcement model considering slip effect. Engineering Structures, 198, 109493. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109493

Zhang, Y., Fung, J. F., Cook, D., Johnson, K. J., & Sattar, S. (2024). Benefit–Cost Analysis for Earthquake-Resilient Building Design and Retrofit: State of the Art and Future Research Needs. Natural Hazards Review, 25(3), 03124001. https://doi.org/10.1061/NHREFO.NHENG-1910

Zhu, M., McKenna, F., & Scott, M. H. (2018). OpenSeesPy: Python library for the OpenSees finite element framework. SoftwareX, 7, 6–11. https://doi.org/10.1016/j.softx.2017.10.009

BÖLÜM 4

BOŞLUKLU BETONARME DÖŞEMELER VE KULLANIM ALANLARI

FIRAT KIPÇAK[1]

Giriş

Betonarme sistemlerde döşemeler düşey yüklerin taşınmasında ve yatay yüklerin aktarılmasında önemli rol oynayan taşıyıcı elemanlardır. Yapıların taşıyıcı sistemini ve güvenliğini etkileyen döşemeler, aynı zamanda yapı ağırlığının önemli bir bölümünü oluşturmaktadır. Literatürde, betonarme binalar için zati ağırlığın %40–60'ını döşemelerin oluşturduğu ifade edilmektedir (Pawar et al., 2022; Yardim, 2008). Bu ağırlık, özellikle deprem etkisinin önemli olduğu yapılarda doğrudan kütle–ivme ilişkisini etkilemektedir. Bu durum döşemelerin mühendislik tasarımında kritik bir rol aldığını göstermektedir. Geleneksel dolu betonarme döşemeler, basit üretim ve geniş kullanım alanlarına sahip olmakla birlikte, kat sayısı yüksek ve geniş alan kaplayan yapılarda hem ekonomik hem de performans açısından uygulanabilir çözümler sunabilmektedir (Kıpçak et al., 2023, 2025). Özellikle geniş açıklıklı yapılarda artan yükler nedeniyle döşeme kalınlığının artırılması

[1] Dr. Öğr. Üyesi, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Van Meslek Yüksekokulu, İnşaat Bölümü, Orcid: 0000-0003-3849-7545

gereksinimi ortaya çıkmaktadır. Bu bağlamda taşıyıcı elemanların kesitlerinin büyümesi, malzeme kullanımının artması ve nihayetinde yapı maliyetlerinin yükselmesi sorunları ortaya çıkmaktadır (Sagadevan & Rao, 2019). Bu sorunlar döşeme sistemlerinde daha hafif ve performanslı çözümlerin üretilmesini zorunlu kılmıştır. Boşluklu döşeme sistemleri, bu sorunların bir sonucu olarak geliştirilmiş olup, döşemelerde beton ve donatı malzeme yerleşiminin yeniden düzenlenmesi esasına dayanmaktadır. Eğilme etkisinde betonun katkısının sınırlı olduğu, tarafsız eksene yakın kesit bölgelerinde kontrol edilebilir boşluklar oluşturularak zati ağırlık azaltılmaktadır. Basınç ve çekme gerilmelerinin yüksek olduğu üst ve alt liflerde beton sürekliliği korunmaktadır (Khouzani et al., 2020; Seung Hun Kim, 2011). Bu teknik taşıma kapasitesinde kabul edilebilir düzeyde azalmalar ile önemli ağırlık tasarrufu elde edilmesine imkân sağlamaktadır.

Boşluklu döşemeler 1950'li yıllarda asmolen ve kaset döşeme sistemleriyle tasarıma dahil olmuştur (Ziverts, 1964). Zamanla prefabrik teknikleri, hafif dolgulu malzemeler ve üretim teknolojileri sayesinde modern boşluklu yapısını almıştır. 1990'lı yıllardan günümüze kadar küresel boşluklu sistemler Avrupa'da yaygınlaşmıştır. Polistiren ve plastik şekil oluşturucu küre elemanların kullanımıyla boşluklu döşemelerde önemli adımlar atılmıştır (Chung et al., 2022; Seung Hun Kim, 2011; Yardim, 2008). Türkiye'de ise boşluklu döşeme uygulamaları sınırlı kalmaktadır. Bu tür döşemelerin yerini Asmolen ve kaset döşemeler almaktadır. Günümüzde bu sistemler kübik, tüp tipi, küresel, halka tipi, elipsoit ve petek tipi boşluklu döşemeler gibi geometrik özelliklerine göre sınıflandırılmaktadır (Khouzani et al., 2019; Seung Hun Kim, 2012; C.-H. Lee et al., 2019). Boşluklu sistemeler boşluk geometrisi, boşluk oranı ve donatı yerleşimi ile farklı yapısal özelliklere sahiptir. Boşluklu döşeme sistemlerinin mühendislik açısından en önemli yeniliği, yapı ağırlığının azaltılması ve dolayısıyla deprem

etkilerinin düşürülmesi ve elemanların optimize edilebilmesi yenilikleridir. Ayrıca bu sistemler mimari esneklik, daha geniş açıklık geçme olanağı, ısı ve ses yalıtımının sağlanması gibi ikincil kazanımlar da sağlamaktadır. Ancak boşluklu döşemelerin tasarımında kesme ve zımbalama dayanımı, gerilme yığılmaları gibi önemli tasarım ilkelerinin dikkatli bir şekilde ele alınmasını gerekmektedir (Seung Hun Kim, 2012; Viana et al., 2017). Boşluk oranı, boşluk geometrisi, boşlukların döşeme içindeki yerleşimi, donatı oranı ve kesme donatısı gibi birçok parametrenin etkisi ile davranış değişmektedir (Seung Hun Kim, 2011; Pawar et al., 2022).

Deneysel ve nümerik çalışmalar, genel olarak boşluk oranı ile taşıma kapasitesi arasında ters orantı olduğunu göstermiştir (Al-Gasham et al., 2019; Chung et al., 2022; Khouzani et al., 2020; Kıpçak et al., 2023; C.-H. Lee et al., 2019). Deneysel ve nümerik çalışmalara göre boşluk oranının %20–38 aralığında artması halinde yük kapasitesinde %7 ve %56 aralığında azalma meydana geldiği görülmüş, ancak süneklik ve deformasyon kapasitelerinde ise artış olduğu belirlenmiştir (Al-Gasham et al., 2019; Chung et al., 2022; Khouzani et al., 2020; Kıpçak et al., 2023; C.-H. Lee et al., 2019). Ancak taşıma kapasitesi döşeme ağırlığı ile oranlandığında ve daha sonra boşluk oranına göre değerlendirdiğinde değişken performanslar elde edilmektedir (Kıpçak et al., 2025). Boşluklu döşemede performans büyük ölçüde boşluk şekli ve donatı düzenine bağlıdır. Bu durum, yalnızca mimari veya ekonomik kaygılarla değil, mühendislik yaklaşımıyla tasarlanmasını gerektirmektedir.

Boşluklu döşeme sistemlerinin kullanım alanları, konutlar, ofis yapıları, prefabrik yapılar, otoparklar ve endüstriyel tesisler gibi geniş bir alana yayılmaktadır (Fanella et al., 2017; Viana et al., 2017). Özellikle geniş açıklık içeren eğitim yapıları, alışveriş merkezleri, ofis binaları ve sağlık tesisleri gibi yapılarda mekânsal genişliğin arttırılması ve kolon/perde sayısının azaltılması amacıyla tercih edilmektedir. Otopark ve endüstriyel yapılarda ise düşey

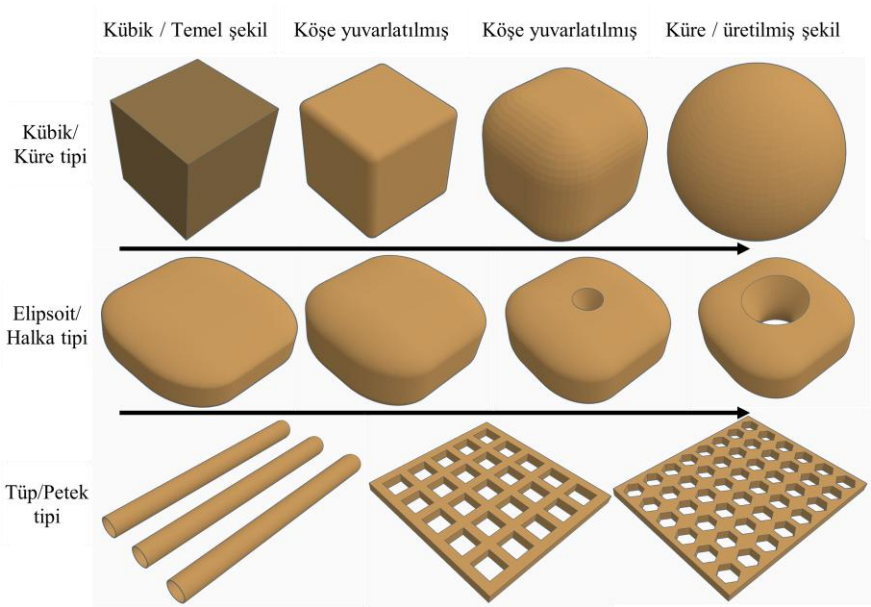
yükün yüksek olması nedeniyle yüksek döşeme kalınlığı gereksinimi, boşluklu sistemlerle ekonomik çözümlere ulaşmaktadır. Konut yapılarında, ısı–ses performansın iyileştirilmesi ve mimari estetik düz bir döşeme yapısının elde edilmesi boşluklu döşemelerin öne çıkan kullanım nedenleri arasında yer almaktadır. Ayrıca prefabrik yapı sistemlerinde, polistiren veya kompozit boşluk oluşturucular kullanılarak üretim süresi kısaltılmakta ve şantiye işçiliği azaltılmaktadır. Deprem etkilerinin yüksek olduğu bölgelerde tasarım ilkelerinin açık bir şekilde tanımlanması önem taşımaktadır. Türkiye'deki mevcut yönetmeliklerde boşluklu döşemelere özgü ayrıntılı tasarım kurallarının sınırlı olması, gelecek bilimsel çalışmaların değerini artırmaktadır. Bu kitap bölümünde, boşluklu betonarme döşemeler ve kullanım alanları konu başlığında yapısal sistem özellikleri, davranış şekilleri, tasarım parametreleri ve uygulama potansiyelleri ele alınmaktadır. Amaç, bilimsel ve mühendislik uygulamaları çalışmalarına ilişkin bütüncül ve teknik kaynak oluşturmaktır.

2. Boşluklu Betonarme Döşeme Sistemlerinin Sınıflandırılması

Boşluklu döşemeler kesit içerisinde oluşturulan boşlukların geometrisi, boşluk konumu ve kapasiteye olan etkileri esas alınarak farklı başlıklar altında sınıflandırılmaktadır. İç bölümlerde bulunan döşemelerin açıklıklarında döşeme altında çekme gerilmeleri, döşeme üstünde basınç gerilmeleri gerçekleşir. Aynı döşemelerin mesnetlenme bölümlerinde ise gerilmeler yer değiştirir. Balkon ve çıkma döşemelerinde ise durum farklıdır. Balkon veya çıkma açıklığında ve mesnet bölgelerinde çekme gerilmeleri üstte basınç gerilmeleri altta oluşur. Bu gerilme dağılımlarına göre boşluk konumu ayarlanır ve optimize edilir. Çoğunlukla boşluklu döşemelerde boşluklar kesit ortasında konumlandırılır. Boşluğun kesit altında konumlandırıldığı döşemelerde asmolen döşeme davranışı görülmektedir. Bu bağlamda kesit altında oluşan çekme gerilmelerinin uygun tasarlanması gerekmektedir. Bu kitap

bölümünde kesit ortasında konumlandırılan boşluk tipleri boşluk geometrisine göre sınıflandırılmıştır. Bu sınıflandırma, eğilme, kesme ve süneklik davranışlarının belirlenmesi için önem taşımaktadır. Boşluk oluşturucular plastik, köpük, karton, polistiren veya benzeri polimer esaslı malzemeler ile sağlanmaktadır (Chung et al., 2018; Ziverts, 1964). Bu malzemeler uygun üretim koşulları ile standart özellikler göstermektedir. Farklı tasarım kriterlerine göre şekil şekillendirilip döşeme içine konumlandırılır ve gerekli aparatlar veya iç içe geçme bağlantıları ile döşeme içinde sabitlenir. Şekil 1'de döşemlerde kullanılan boşluk şekilleri verilmiştir.

Şekil 1. Döşemlerde kullanılan boşluk şekilleri



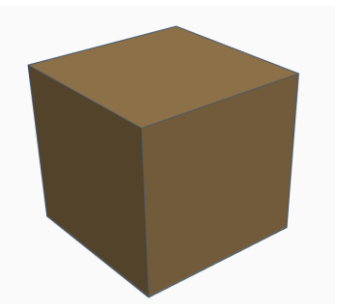
Boşlukların beton kesit içerisindeki konumu, kesitin kesme kapasitesini zayıflatabilmekte ve özellikle kolon çevresinde zımbalama riskini artırabilmektedir (Allawi & Jabir, 2016; Chung et al., 2015, 2018). Ayrıca boşluk yerini korumak ve beton dökümü sırasında boşluk oluşturucuların kaymasını önlemek için ek donatı gerekmektedir. Bu nedenlerle kesme donatısı düzenlemesi, kolon başlık veya tabla yapılması veya bu bölümde boşluk kullanılmaması

tasarımları yapılmaktadır (Chung et al., 2018; Khouzani et al., 2019; Viana et al., 2017). Zımbalama riskinin yüksek olması durumunda ise ilave kayma donatıları yerleştirilmektedir (Khouzani et al., 2020; Kıpçak et al., 2025).

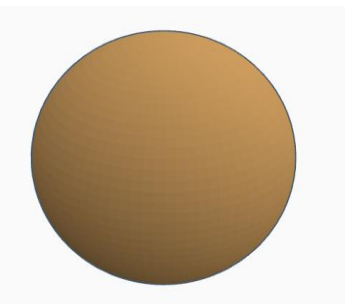
2.1. Kübik veya Küresel Boşluklu Döşemeler

Beton içerisine yerleştirilen kübik veya küresel boşluk oluşturucu elemanlar aracılığıyla oluşturulan sistemlerdir. Boşluk oluşturucular çoğunlukla alt ve üst donatı katmanları arasında konumlandırılarak betonun çekme ve basınç gerilmelerinin sınırlı olduğu orta bölgelerde kullanılır. Bu sayede hacim azaltılarak döşeme kalınlığı korunurken, zati ağırlıkta azalma elde edilebilir (Seung Hun Kim, 2011; Sagadevan & Rao, 2019). Al-Gasham ve diğ. tarafından yapılan çalışmada küresel boşluklu döşemelerde %19 ve %25 boşluk oranlarında yük kapasitesi sırasıyla %7 ve %11 oranında düştüğü kaydedilmiştir (Al-Gasham et al., 2019). Kübik veya küresel boşlukların geometrik avantajı ile simetrik ve düzenli yerleşimi sayesinde döşemenin iki doğrultuda simetrik çalışması sağlanabilir.

Şekil 2. Kübik ve küresel boşluk tipi



a) Kübik tipi



b) Küre tipi

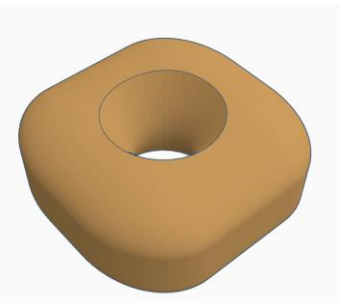
Bu durumda geometrik yapı döşemenin iki doğrultuda yatay rijitliğini sürdürmesine olanak tanımaktadır. Ayrıca düşük kapasite

kayıpları ile plak döşemelere yakın eğilme kapasiteleri elde edilebilmektedir (Al-Gasham et al., 2019). Bu tür döşemeler konut, ofis, alışveriş merkezleri ve sinema salonları gibi yapıların döşemelerinde kullanılmaktadır.

2.2. Halka Tipi Boşluklu Döşemeler

Kübik ve küresel boşluklu döşemelerden farklı olarak boşluk elemanlarının merkezinde beton geçişine olanak sağlayan boşluk tipidir. Bu sayede bir miktar daha beton sürekliliği korunmaya çalışır. Bu sistemlerde boşluklar, ortası delikli veya beton çekirdekli bir geometriye sahiptir. Alt ve üst beton tabakaları birbirine bağlanmaktadır. Böylece döşeme kesitinde kesme güvenliği arttırılmaya çalışılmaktadır (Amer M. Ibrahim et al., 2013; Chung et al., 2015). Deneysel ve nümerik çalışmalar, halka tipi boşluklu döşemelerin beton geçişine izin verilmeyen küresel boşluklu döşemeler ile karşılaştırıldığında eğilme ve kesme kapasitelerini belirli bir miktar koruyabildiğini göstermektedir (Chung et al., 2015). Chung ve diğ. tarafından yapılan çalışmada, halka tipi boşluklu döşemelerde %38 boşluk oranında sadece %2, halka olmayıp içi boşluklu döşemelerde ise %22 kapasite kaybı belirlenmiştir (Chung et al., 2022). Küre tipine göre özellikle kesme çatlaklarının ilerleme şekli üzerinde olumlu etkiler oluşturduğu ve sünek davranışı arttırdığı rapor edilmiştir (Chung et al., 2022).

Şekil 3. Halka boşluk tipi



Bu nedenle halka tipi boşluklu döşemeler küresel ve kübik boşluklu döşemeler yerine belirli durumlarda tercih edilmektedir. Yüksek tasarım yüklerine maruz kalan döşemelerde güvenli bir alternatif olarak değerlendirilebilmektedir. Bu tür döşemeler küre ve kübik türü boşluklu döşemelerin kullanım alanları ile aynıdır.

2.3 Tüp Tipi Boşluklu Döşemeler

Çoğunlukla döşeme boyunca tek doğrultuda konumlandırılan silindirik veya prizmatik tüpler ile oluşturulan boşluklu döşemelerdir. Bu sistemler, temel olarak tek doğrultulu çalışan döşemelerde kullanılmaktadır (Kankeri et al., 2018; C. H. Lee et al., 2021). Tüp boşlukların konumu yatay ve eğilme rijitliklerini etkilerken ağırlığıda önemli ölçüde düşürmektedir. Lee ve diğ. çalışmasında ise tüp tipi boşluklu döşemelerde %30.8 boşluk oranında %7 kapasitesi kaybı görülmüştür (C.-H. Lee et al., 2019). Tüp tipi sistemlerin öne çıkan özelliklerinden biri, süneklik ve deplasman kapasitelerini belirli oranda korumasıdır (C.-H. Lee et al., 2019). Özellikle tek yönde açıklığın fazla olduğu köprü, viyadük ve endüstriyel yapıların döşemlerinde tercih edilmektedir. Ayrıca otoparklar ve düzenli aks sistemine sahip büyük açıklıklı yapılarda kullanılmaktadır.

Şekil 4. Tüp boşluk tipi

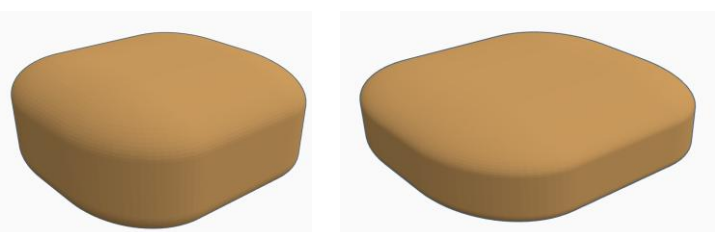
Hareketli yüklerin yoğun olduğu yapılarda, bu sistemlerin servis performansı açısından avantaj sağladığı farklı kaynaklarda

rapor edilmiştir (Kankeri et al., 2018; C. H. Lee et al., 2021; C.-H. Lee et al., 2019).

2.4 Elipsoit Boşluklu Döşemeler

Elipsoit boşluklu döşemeler eğik boşluk geometrileri sayesinde yüksek boşluk oranlarına ulaşmak için tercih edilmektedir. Döşeme ağırlığında belirgin azalma sağlaması ile kesme ve zımbalama dayanımı hassasiyetinde kübik, küre ve halka tipi boşluklu döşemelere benzer davranır. Khouzani ve diğ. araştırmasında elipsoit %37.5 boşluklu döşemelerde %56 kapasite kaybı görülmüştür (Khouzani et al., 2020). Bu tür döşemelerde boşluk oranı yüksek olması sebebiyle kapasite kayıpları daha belirgindir (Khouzani et al., 2019; Viana et al., 2017). Bu nedenle genellikle özel tasarım gerektiren projelerde değerlendirilmektedir. Ayrıca artan deneysel çalışmalar ile yeni kompozit malzemelerin eklenmesi ve döşemelerin güçlendirilmesi ile gelecek tasarımlarda kullanılması beklenmektedir (Khouzani et al., 2019, 2020).

Şekil 5. Yassı ve Elipsoit boşluk tipi



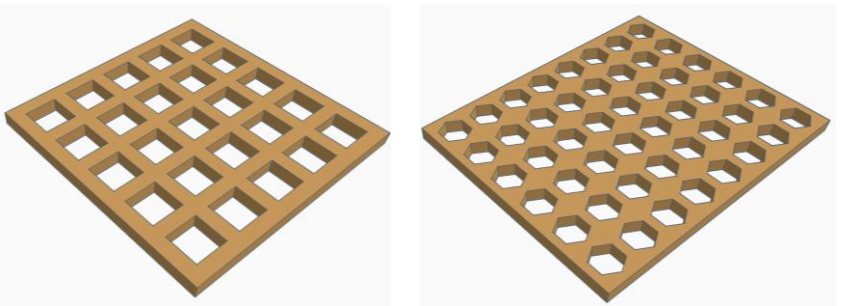
a) Yassı tipi b) elipsoit tipi

2.5 Petek Geometrili Boşluklu Döşemeler

Bu tür boşluklu döşemeler petek tipi ortası veya kenarı boşluk oluşturacak şekilde iki türde oluşturulmaktadır. Boşluk kısımlar kenarlarında bırakılan beton bağlantılar sayesinde alt ve üst beton tabakalarının birlikte çalışmasını sağlanır (S. H. Kim et al., 2008; Seung Hun Kim, 2012). Beton bağlantılar kesit içerisinde

alternatif yük aktarım kısımları oluşturarak döşemenin yük ve süneklik kapasitelerine belirli bir miktarda destek oluşturmaktadır. Kıpçak ve diğ. çalışmasında petek tipi polistiren boşluk oluşturucu köpüklerin kullanıldığı boşluklu döşemelerde %10 boşluk oranında %29 kapasite kaybının yaşandığı kaydedilmiştir (Kıpçak et al., 2023). Literatürde, bu tür döşemelerin iki doğrultuda eşit davranması sayesinde deprem etkisi altında daha dengeli ve sünek bir davranış sergilediği belirlenmiştir (S. H. Kim et al., 2008; Seung Hun Kim, 2012). Bu tür döşemeler iki doğrultuda boşluk oluşturması ve simetrik davranması sayesinde konut, ofis, alışveriş merkezleri ve sinema salonları gibi yapılarda tercih edilmektedir.

Şekil 6. Petek geometrili boşluk tipi



a) Kare tipi b) Altıgen tipi

3. Yapısal Davranış ve Tasarım Parametreleri

Türkiye'de yürürlükte olan mevcut yönetmeliklerde TS 500 ve TBDY-2018, Avrupa'da ve Amerika'da sırasıyla kullanılan Eurocode-2 ve ACI 318 gibi uluslararası yönetmeliklerde de boşluklu döşemelere özgü detaylı tasarım kuralları bulunmamaktadır (ACI318-19, 2019; Eurocode-2, 2004; TBDY, 2018; TS 500, 2000). Bu nedenle uygulamada deneysel veriler ve dolu döşemeler için verilen kapasite denklemleri dikkate alınarak boşluklu döşemeler için tasarımlar yapılmaktadır.

Deneysel ve nümerik çalışmalar boşluk oranı arttıkça genel olarak döşeme ağırlığının belirgin şekilde azaldığını göstermiştir. Bununla birlikte nihai eğilme kapasitesinde boşluk şekline, oranına, konumuna ve malzemesine göre farklı oranlarda düşüşler oluşmaktadır (Khouzani et al., 2020). Boşluklu döşemelerde kesme dayanımı, döşemenin en önemli tasarım konularından biridir. Boşlukların beton kesitini zayıflatması nedeniyle çatlaklarının dağılımı değişmekte ve kesme kapasitesinde azalma meydana gelmektedir (Khouzani et al., 2020; Viana et al., 2017).

4. Kullanım Alanları

Boşluklu döşemeler plak döşemelere göre kapasite kayıplarını önlemek için çoğunlukla plak döşemeden daha kalın yapılmaktadır. Bu sistemler, derin kiriş gerektirmediği için düz bir tavan görünümü elde edilmektedir. Bu sayede mimari ve akustik kazanımlar sağlamaktadır. Boşluk geometrisi, taşıma kapasitesi ve üretim teknolojisine bağlı olarak farklı kullanım alanları bulunmaktadır. Kübik, küresel ve halka tipi boşluklu döşemeler iki doğrultuda çalışması ve plak davranışı göstermeleri nedeniyle çok katlı konut yapılarında, ofis binaları ve alışveriş merkezlerinde tercih edilmektedir (Fanella et al., 2017; Viana et al., 2017). Ayrıca geniş açıklıklı düz döşeme çözümleri sağlamakta ve yapının kullanım fonksiyonlarını arttırmak için önemli bir avantaj oluşturmaktadır. Tüp tipi boşluklu döşemeler, tek doğrultuda çalıştıkları için uzun açıklıklı ve düzenli aks sistemlerinde çoğunlukla kullanılmaktadır. Bu tür döşemeler, endüstriyel tesisler, otopark yapıları, depo binaları, alt ve üst geçitler ve köprü gibi yapılarda tercih edilmektedir. Elipsoit ve yassı tip boşluklu döşemeler, yüksek boşluk oranları sağlamaları sayesinde çoğunlukla düşey yükün düşük olduğu döşemelerde kullanılmaktadır. Bu döşemelerde ağırlığın düşürülmesi önceliklidir. Kesme dayanımı ve göçme mekanizmaları konularında zayıf kaldıkları için dikkatli tasarım gerekli olmaktadır. Çoğunlukla kısa ve orta açıklıklı yapılarda veya özel tasarım

gerektiren mühendislik projelerinde kullanılmaktadır. Petek tipi boşluklu döşemeler, deprem etkisinin yüksek olduğu yapılarda, konut ve ofis türü yapılarda tercih edilmektedir. Bu sistemler, iki doğrultuda çalışması ve düşük boşluk oranına sahip olması nedeniyle birçok yapı çeşidinde kullanılabilir. Prefabrik ve yarı prefabrik yapı türlerinde üretim kolaylığı bu tür döşemelerin uygulanabilirliğini arttırmıştır. Genel olarak değerlendirildiğinde, boşluklu döşemeler yalnızca mimari ve ekonomik kriterler değil aynı zamanda deprem performansı ve yapım teknolojisi de dikkate alınarak tasarlanmaktadır. Sonuç olarak boşluklu döşemeler yapım türüne göre kendine avantajları doğrultusunda farklı yapı tipleri için çözümler sunmaktadır.

3. Sonuç

Bu kitap bölümü kapsamında boşluklu betonarme döşeme sistemlerinin temel tasarım amaçları, davranış özellikleri ve kullanım alanları değerlendirilmiştir. Bu tür döşemeler ilk olarak yapı ağırlığını azaltma ve malzeme verimliliğini artırma amacıyla ortaya çıkmıştır. Bu döşemelerde yalnızca zati yüklerin azaltılmasını değil, beraberinde deprem kuvvetlerinin düşürülmesi ve açıklıkların büyütülmesi amaçlanmaktadır. Bu sayede daha performanslı ve kullanım konforu yüksek yapılar yapılmaktadır. Boşluklu döşemelerin boşluk oranı, boşluk geometrisi, kullanılan malzeme, kesit içindeki konumu, donatı düzeni ve kesme yükü aktarım şeklinden etkilendiği ortaya konmuştur. Taşıma kapasitesi ile boşluk oranı arasında doğrusal bir oranın olmaması nedeniyle yürürlükteki yönetmeliklerle tasarımın sonuçlandırılması yetersiz kalmaktadır. Bu bağlamda deneysel ve nümerik araştırma sonuçlarına bakılmaktadır. Kübik, küresel, halka, tüp ve petek tipi boşlukların her biri farklı gerilme dağılımı ve göçme mekanizması sergilemektedir. Alt ve üst beton tabakaları arasında sağladığı mekanik bağ sayesinde çift doğrultuda eşit davranış gösteren boşluklu döşemelerin daha yüksek süneklik ve deformasyon

kapasitesine sahip olduğu görülmektedir. Yaklaşık %15 ve %25 aralığında boşluk oranlarının ağırlık azalımı, eğilme ve kesme dayanımı arasında dengeli bir çözüm sunmaktadır. Bu oranların aşılması durumunda kapasite kayıplarının hızla arttığı sonucuna varılmıştır. Günümüz uygulamalarda, Türkiye'deki uygulamalara kıyasla özellikle Avrupa ve Amerika'da küre ve benzeri boşluklu tasarımınlar yaygınlaşmıştır. Türkiye'de plak döşemlere alternatif olarak çoğunlukla asmolen ve kaset döşemeler tercih edilmektedir. Boşluk oluşturucu malzemelerin yaygınlığı ve tasarım alışkanlığı nedeniyle boşluklu döşemeler uygulamada daha dar bir alanda kalmaktadır. Bu konudaki deneysel veri eksikliği, standart ve yönetmeliklerde boşluklu döşemelere özgü tasarım kurallarının bulunmaması, tecrübeli mühendis, usta ve işçilerin bulunmaması sebebiyle boşluklu döşemelerin kullanımı sınırlı kalmıştır. Mevcut yerel TS 500 ve TBDY-2018, uluslararası Eurocode-2 ve ACI 318 yönetmeliklerinde açık düzenlemelerin yer almaması bu konudaki tasarımları sınırlamaktadır. Bu veya diğer uluslararası yönetmeliklerde boşluklu döşemeler için yapılacak kapasite hesapları denklemleri ve yöntemleri bu döşemelerin hesaplanmasını kolaylaştıracaktır. Hafif yapı tasarımı, deprem güvenliği, büyük açıklık ihtiyacı ve günümüz mühendislik yapıları dikkate alındığında boşluklu döşemelerin kullanımı belirginleşmektedir. Konut, eğitim, ofis, otopark yapıları ve endüstriyel tesisler gibi çeşitli kullanım alanları göz önüne alındığında bu döşemelerin potansiyeli ortaya çıkmaktadır. Bu bağlamda, gelecekte yerli deneysel, parametrik ve nümerik çalışmaların artırılması, ulusal yönetmeliklerde tasarım kurallarının eklenmesi bu sistemlerin güvenli bir şekilde inşa edilmesini sağlayacaktır.

Kaynakça

ACI318-19. (2019). Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary. In American Concrete Institute. ACI, American Concrete Institute 2019.

Al-Gasham, T. S., Hilo, A. N. & Alawsi, M. A. (2019). Structural Behavior of Reinforced Concrete One-Way Slabs Voided by Polystyrene Balls. Case Studies in Construction Materials, 11. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00292

Allawi, A. A. & Jabir, H. A. (2016). Experimental Behavior of Laced Reinforced Concrete One Way Slab under Static Load. Journal of Engineering, 22(5). https://doi.org/10.31026/j.eng.2016.05.04

Amer M. Ibrahim, Nazar K. Ali & Wissam D. Salman. (2013). Flexural Capacities of Reinforced Concrete Two-Way Bubbledeck Slabs of Plastic Spherical Voids. Diyala Journal of Engineering Sciences, 6(2). https://doi.org/10.24237/djes.2013.06202

Chung, J. H., Bae, B. Il, Choi, H. K., Jung, H. S. & Choi, C. S. (2018). Evaluation of Punching Shear Strength of Voided Slabs Considering the Effect of the Ratio b_0/d. Engineering Structures, 164. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.02.085

Chung, J. H., Choi, H. K., Lee, S. C. & Choi, C. S. (2015). One-Way Shear Strength of Circular Voided Reinforced Concrete Floor Slabs. Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Structures and Buildings, 168(5). https://doi.org/10.1680/stbu.14.00044

Chung, J. H., Jung, H. S. & Choi, H. K. (2022). Flexural Strength and Stiffness of Donut-Type Voided Slab. Applied Sciences (Switzerland), 12(12). https://doi.org/10.3390/app12125782

Eurocode-2. (2004). Eurocode-2 Design of Concrete Structures. European Committee for Standardization.

Fanella, D. A., Mahamid, M. & Mota, M. (2017). Flat Plate–Voided Concrete Slab Systems: Design, Serviceability, Fire Resistance, and Construction. Practice Periodical on Structural Design and Construction, 22(3). https://doi.org/10.1061/(asce)sc.1943-5576.0000322

Kankeri, P., Suriya Prakash, S. & Pachalla, S. K. S. (2018). Experimental and Numerical Studies on Efficiency of Hybrid Overlay and Near Surface Mounted FRP Strengthening of Pre-cracked Hollow Core Slabs. Structures, 15. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2018.05.003

Khouzani, M. A., Zeynalian, M., Hashemi, M., Mostofinejad, D. & Farahbod, F. (2019). Investigation of Flexural and Shear Behaviors of Biaxial Voided Slabs Containing Steel Cages. Structural Concrete, 21(1). https://doi.org/10.1002/suco.201900129

Khouzani, M. A., Zeynalian, M., Hashemi, M., Mostofinejad, D. & Farahbod, F. (2020). Study on Shear Behavior and Capacity of Biaxial Ellipsoidal Voided Slabs. Structures, 27. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.07.017

Kim, S. H., Lee, K. K., Lee, H. S., Lee, K. J. & Kang, I. S. (2008). Bending and Shear Strength of I-Slab With Polystyrene Forms. Key Engineering Materials, 385–387. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.385-387.353

Kim, Seung Hun. (2011). Flexural behavior of void RC and PC slab with polystyrene forms. Key Engineering Materials, 452–453. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.452-453.61

Kim, Seung Hun. (2012). Shear strength of void slab with polystyrene forms. Applied Mechanics and Materials, 217–219. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.217-219.626

Kıpçak, F., Erdil, B., Tapan, M. & Karaşin, A. (2023). The Effect of Voids on Flexural Capacity of Reinforced Concrete Slabs. Periodica Polytechnica Civil Engineering, 67(4). https://doi.org/10.3311/PPci.21988

Kıpçak, F., Tapan, M., Erdil, B. & Karaşin, A. (2025). Investigation of Flexural Behavior of Voided and Crosstie Reinforced Slabs. The Structural Design of Tall and Special Buildings, 34(14), e70078. https://doi.org/https://doi.org/10.1002/tal.70078

Lee, C. H., Mansouri, I., Bae, J. & Ryu, J. (2021). Current and New Approaches to Predict the Deflections of One-Way Flexural Members With a Focus on Composite Steel Deck Slabs Voided by Circular Tubes. Materials, 14(2). https://doi.org/10.3390/ma14020421

Lee, C.-H., Mansouri, I., Kim, E., Hwang, K.-S. & Woo, W.-T. (2019). Flexural Strength of One-Way Composite Steel Deck Slabs Voided by Circular Paper Tubes. Journal of Structural Engineering, 145(2). https://doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0002259

Pawar, A. J., Mathew, N. S., Dhake, P. D. & Patil, Y. D. (2022). Flexural behavior of Two-Way voided slab. Materials Today: Proceedings, 65. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.500

Sagadevan, R. & Rao, B. N. (2019). Experimental and Analytical Investigation of Punching Shear Capacity of Biaxial Voided Slabs. Structures, 20. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2019.03.013

TBDY. (2018). Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (Turkey Building Earthquake Regulation). Republic of Turkey Ministry of Environment and Urbanization.

TS 500. (2000). Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları (Requirements for Design and Construction of Reinforced Concrete Structures). In Türk Standartları Enstitüsü.

Viana, J. C. M., Matos, J. M. & da Câmara, N. (2017). “COBIAX” Voided Slabs and Post-Tensioned Flat Slabs: Competitive Analyses. https://api.semanticscholar.org/CorpusID:219570792

Yardim, Y. (2008). Development of Lightweight Composite Slab System for Residential Building. University Putra Malaysia.

Ziverts, G. J. (1964). A Study of Cardboard Voids For Prestressed Concrete Box Slabs. PCI Journal, 9(4). https://doi.org/10.15554/pcij.08011964.33.60

BÖLÜM 5

ÇİMENTOLU MACUN DOLGULAR VE MADEN ATIKLARIN SÜRDÜRÜLEBİLİR KULLANIMI

Bayram ATEŞ[1]
Mohammad Azim Eirgash[2]

Giriş

Madencilik sektörü, modern endüstriyel sistemlerin temel hammaddelerini sağlayan ve küresel ekonomik büyümede kritik rol oynayan stratejik bir sektördür. Artan nüfus ve sanayileşme ile mineral kaynaklara olan talep sürekli artmakta; bu durum madencilik faaliyetlerinin ölçeğini ve yoğunluğunu önemli ölçüde artırmaktadır (Azapagic, 2004). Ancak madencilik faaliyetleri yüksek miktarda atık üretimi ile karakterizedir. Cevher zenginleştirme süreçleri sonucunda ortaya çıkan ince taneli atıklar, dünya genelinde en büyük hacimli endüstriyel atık akımlarından birini oluşturmaktadır (Blight, 2010). Bu atıklar genellikle yüksek su içeriğine sahip olup uzun süreli depolama gerektirmektedir. Geleneksel olarak maden atıkları yüzeyde inşa edilen atık barajlarında depolanmaktadır. Ancak bu

[1] Dr, Karadeniz Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0002-1251-7053
[2] Dr, Karadeniz Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0001-5399-115X

sistemler stabilite problemleri, ağır metal sızıntısı ve asidik maden drenajı (AMD) gibi ciddi çevresel riskler taşımaktadır. Özellikle sülfürlü minerallerin oksidasyonu sonucu oluşan AMD, yeraltı ve yüzey su kaynaklarının kirlenmesine neden olan en kritik çevresel problemlerden biridir (Akcil & Koldas, 2006). Bu bağlamda, sürdürülebilir madencilik ve döngüsel ekonomi yaklaşımları doğrultusunda, maden atıklarının yeniden değerlendirilmesi giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Bu yaklaşım, atıkların yalnızca bertaraf edilmesi gereken bir yük değil, aynı zamanda mühendislik uygulamalarında kullanılabilecek bir kaynak olduğunu ortaya koymaktadır.

Bu çerçevede geliştirilen çimentolu macun dolgu (ÇMD) teknolojisi, maden atıklarının yeraltında değerlendirilmesini sağlayan en önemli yöntemlerden biridir. ÇMD, ince taneli maden atıkları, bağlayıcı ve sudan oluşan, yüksek katı içerikli ve pompalanabilir bir dolgu malzemesidir (Fall & ark., 2010). Bu sistem sayesinde, atıkların önemli bir kısmı yeraltına geri kazandırılmakta, yüzey atık depolama ihtiyacı azaltılmakta, yeraltı boşlukları stabilize edilmekte, çevresel riskler minimize edilmektedir. Ayrıca son yıllarda yapılan çalışmalar, uçucu kül, granüle yüksek fırın cürufu ve kireçtaşı gibi endüstriyel atıkların ÇMD sistemlerinde bağlayıcı ikamesi olarak kullanılabileceğini göstermiştir (Belem & Benzaazoua, 2008; Yılmaz & ark., 2011).

Maden Sektöründe Atık Yönetimi

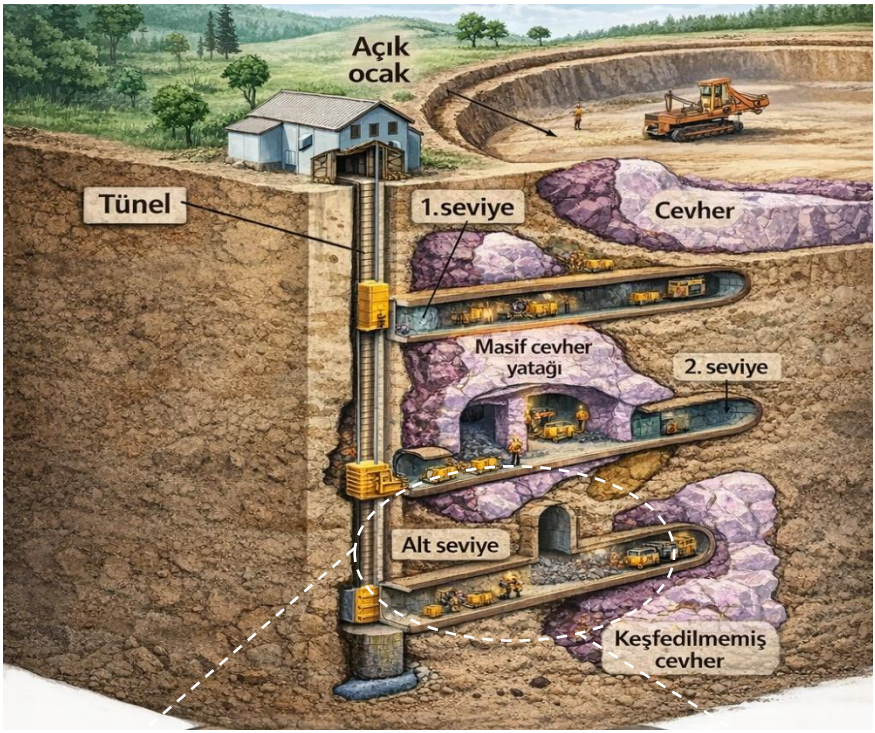
Madencilik sektörü, enerji üretimi, altyapı, ulaşım ve sanayi üretimi için gerekli olan hammaddelerin sağlanmasında kritik rol oynamaktadır. Bu sektör, özellikle gelişmekte olan ülkelerde ekonomik büyümenin önemli bir bileşeni olarak kabul edilmektedir. Ancak madencilik faaliyetleri yüksek hacimli atık üretimi ile gerçekleşmektedir. Cevherin ekonomik olarak değerlendirilebilir kısmı genellikle toplam kazı hacminin küçük bir bölümünü

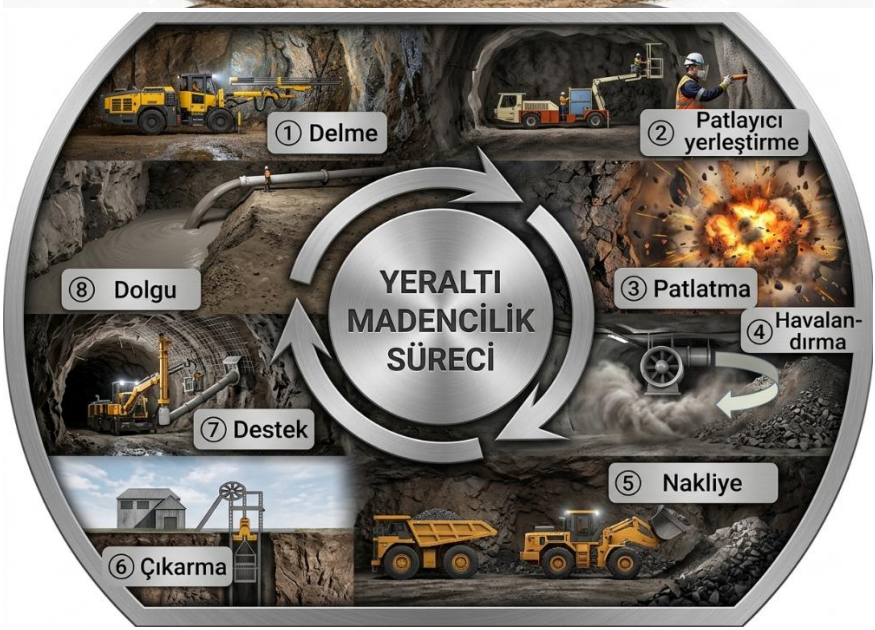
oluştururken, geri kalan büyük hacim atık olarak ortaya çıkmaktadır (Azapagic, 2004).

Yeraltı Madenciliğinde Dolgu Yöntemleri ve Mühendislik Yaklaşımları

Yeraltı madenciliği, delme, patlatma, havalandırma, kazı ve oluşan boşlukların doldurulması gibi ardışık ve birbirine bağlı süreçlerden oluşan bir üretim döngüsüdür (bkz. Şekil 1). Bu süreçler içerisinde dolgu uygulamaları, hem jeoteknik stabilitenin sağlanması hem de güvenli ve sürdürülebilir üretimin devamı açısından kritik bir öneme sahiptir. Dolgu, yeraltı üretimi sırasında oluşan boşlukların kontrol altına alınması amacıyla bu boşluklara yerleştirilen malzeme olarak tanımlanmakta olup (Thomas & ark., 1979), aynı zamanda atık yönetimi ve mühendislik performansını iyileştiren çok yönlü bir uygulama niteliği taşımaktadır. Dolgu teknolojilerinin gelişimi incelendiğinde, ilk uygulamaların iri taneli malzemelere dayalı kaya dolgusu ile başladığı, ardından hidrolik dolgu sistemlerinin geliştirildiği görülmektedir. Ancak bu yöntemlerin sınırlamaları, yüksek katı içerikli ve homojen yapıya sahip çimentolu macun dolgu (ÇMD) sistemlerinin geliştirilmesine yol açmıştır. Günümüzde ÇMD, üstün mekanik özellikleri ve operasyonel avantajları nedeniyle en gelişmiş dolgu yöntemi olarak kabul edilmektedir (Landriault, 2001). Literatürde yer alan çalışmalar, dolgu türü seçiminde jeolojik koşullar, üretim yöntemi ve maliyet gibi faktörlerin belirleyici olduğunu ortaya koymakta; ayrıca modern ÇMD sistemlerinin mühendislik performansı ve sürdürülebilirlik açısından önemli üstünlükler sunduğunu göstermektedir (Qin & ark., 2024).

Şekil 1 Yeraltı madenciliğinde üretim ve hazırlık safhaları





Yeraltı madenciliğinde üretim boşluklarının güvenli şekilde doldurulması, hem operasyonel süreklilik hem de kaya kütlesi stabilitesi açısından kritik bir mühendislik gerekliliğidir. Dolgu uygulamaları; taşıma kapasitesinin artırılması, deformasyonların sınırlandırılması ve cevher geri kazanımının iyileştirilmesi gibi önemli işlevler üstlenmektedir. Bu kapsamda dolgu yöntemleri genel olarak kaya dolgu, hidrolik dolgu ve çimentolu macun dolgu (ÇMD) olmak üzere üç ana grupta incelenmektedir. Kaya dolgu, iri taneli malzemelerin bağlayıcı kullanılmadan yerleştirilmesine dayanan, düşük maliyetli ve yüksek drenaj kapasitesine sahip bir yöntemdir; ancak düşük dayanım ve yüksek boşluk oranı gibi dezavantajları bulunmaktadır. Hidrolik dolgu ise ince taneli atıkların su ile taşınmasına dayanmakta olup büyük hacimlerin doldurulmasına olanak tanırken, yüksek su içeriği nedeniyle düşük dayanım ve segregasyon sorunları gösterebilmektedir. Çimentolu macun dolgu ise ince taneli atıkların bağlayıcı ve su ile karıştırılmasıyla elde edilen, yüksek katı içeriğine (%70–85) sahip ve homojen yerleştirilebilen bir sistemdir (Fall & ark., 2010). Bu özellikleri sayesinde ÇMD, günümüzde hem mühendislik performansı hem de sürdürülebilirlik açısından en gelişmiş dolgu yöntemi olarak öne çıkmaktadır.

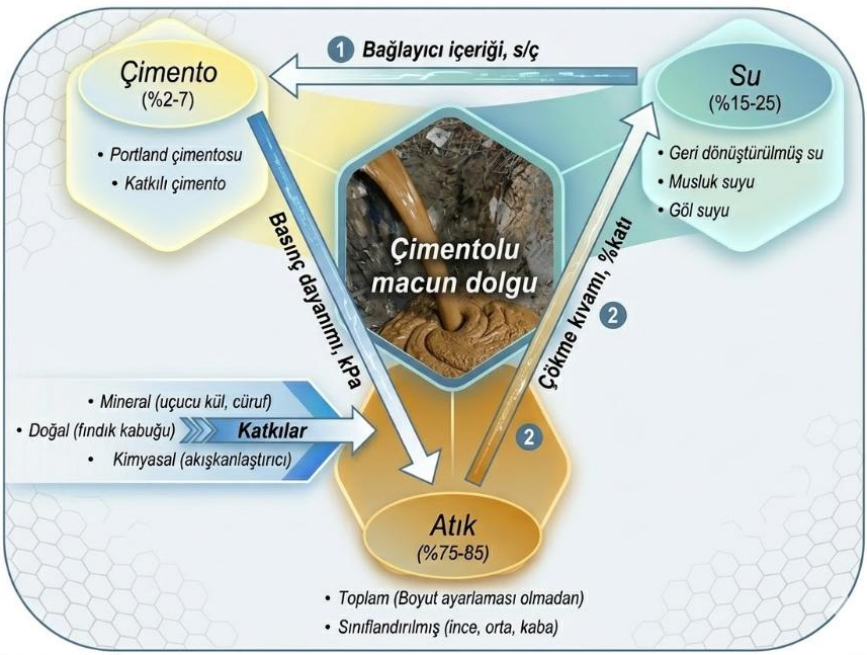
Çimentolu Macun Dolgu

Modern madencilik uygulamalarında, ekonomik değeri olan minerallerin üretiminin ardından geriye kalan atık malzemeler çoğunlukla yeraltı boşluklarına ya da açık ocak alanlarına geri yerleştirilmektedir. Bu geri doldurma yaklaşımı, özellikle kes-doldur, alt seviyeli kazı yöntemleri ve açık ocak işletmeciliği gibi farklı madencilik tekniklerinde yaygın biçimde uygulanmaktadır (Lu & ark., 2018). Dolgu sistemleri, maden atıklarının uzun vadeli yönetimi açısından çevresel etkileri azaltan, ekonomik açıdan uygun ve teknik olarak olgunlaşmış çözümler arasında yer almaktadır. Bunun yanı sıra, dolgu malzemesi pasif bir destek mekanizması

oluşturarak çevre kaya kütlesinin stabilitesine katkı sağlamaktadır. Özellikle bağlayıcı olarak çimento kullanılan sistemler, çimentolu maden dolgusu veya çimentolu macun dolgu (ÇMD) olarak tanımlanmaktadır.

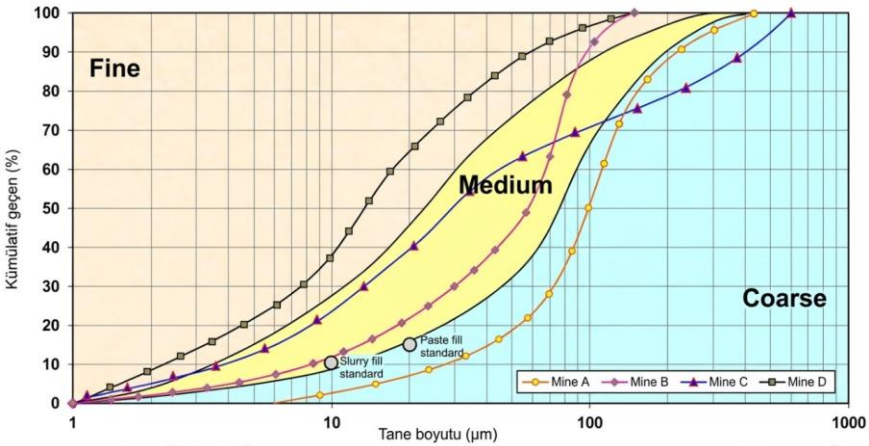
Çimentolu macun dolgu (ÇMD), belirli bir akma gerilimi ve viskozite aralığında davranış gösteren, homojen yapıda, ayrışmaya karşı dirençli ve yüksek yoğunluklu bir dolgu malzemesidir. Bu özellikleri sayesinde, yeraltı duraklarına, atık depolama alanlarına, açık ocaklara ve zemin çökme bölgelerine etkin bir şekilde taşınabilmektedir (bkz. Şekil 2). Kullanılan atığın tane boyutu dağılımı ve özgül ağırlığına bağlı olarak, özellikle sert kaya metal madenlerinde ÇMD'nin yoğunluğu genellikle ağırlıkça %75–85 aralığında değişmektedir (Keskin & ark., 2024).

Şekil 2 Çimentolu macun dolgu karışımı diyagramı ve ana bileşenleri



ÇMD belirgin bir kritik akış hızına sahip olmadığından, uygun koşullar altında boru hattı içerisinde birkaç saat (yaklaşık 4–5 saat) boyunca hareketsiz kalabilmekte ve bu durum hat işletimi açısından avantaj sağlamaktadır. Ancak, durgun haldeki dolgunun yeniden akışa geçirilmesi için yeterli akma geriliminin oluşturulması gerekmektedir. Akışın yeniden başlatılması sırasında gerekli olan yüksek akma gerilimi, yetersiz pompalama kapasitesi veya enerji sağlanması durumunda boru hattında tıkanmalara yol açabilmekte; bu da hem ekonomik kayıplara hem de üretim gecikmelerine neden olabilmektedir. Bu nedenle, dolgu malzemesinin akma geriliminin doğru şekilde belirlenmesi, işlenebilirliğin değerlendirilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Bu kapsamda, ASTM C143 standardına göre gerçekleştirilen çökme deneyi, dolgunun kıvam ve işlenebilirlik özelliklerinin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Kararlı ve sürekli bir ÇMD akışı sağlanabilmesi için, kullanılan atık malzemenin belirli bir ince tane içeriğine sahip olması gerekmektedir. Literatürde, genellikle 20 mikron altı ince fraksiyonun en az %15 civarında olması önerilmektedir (Hustrulid & Bullock, 2001). İnce taneler, boru hattı duvarları ile temas ederek bir tür kaygan tabaka oluşturmakta ve böylece iri tanelerin çökelmeden, daha yüksek hızlarda ve ayrışma olmaksızın taşınmasına olanak sağlamaktadır. Bu mekanizma sayesinde ÇMD, hidrolik dolgu ve kaya dolgu gibi geleneksel yöntemlere kıyasla ayrışmayan bir davranış sergileyerek önemli operasyonel avantajlar sunmaktadır. ÇMD üretiminde kullanılan atıkların tane boyutu dağılımı, dolgunun hem pompalanabilirliğini hem de nihai mukavemetini doğrudan etkilemektedir. Bu kapsamda, ince, orta ve iri taneli fraksiyonların uygun oranlarda dengelenmesi gerekmektedir (bkz. Şekil 3). Dolgu tasarımında temel hedef; yeterli akış özelliklerini koruyarak iletim performansını artırmak, aynı zamanda ince tane oranını optimize ederek çimento tüketimini azaltmak ve böylece maliyetleri düşürmektir.

Şekil 3 Çimentolu macun dolgu uygulamaları için farklı maden atıklarının tane boyutu dağılım analizi



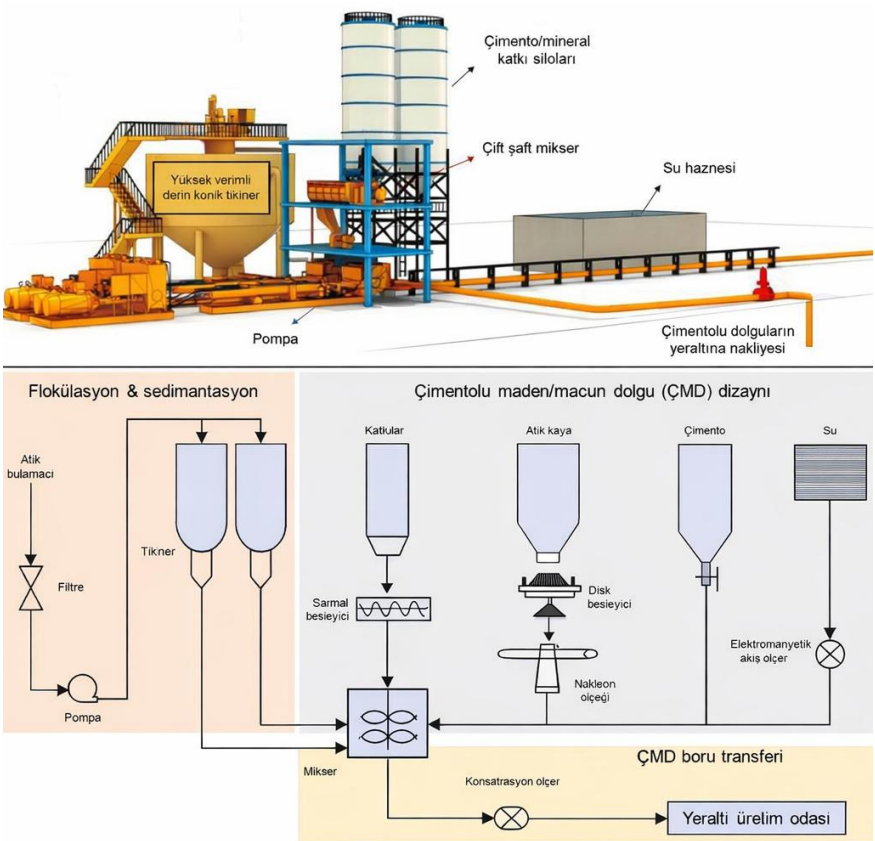
Genel olarak, bir ÇMD sistemi; susuzlaştırma, karıştırma, boru hattı ile iletim ve yerleştirme/izleme aşamalarından oluşmaktadır. Bu süreçlerin her biri, dolgunun performansı ve işletme verimliliği açısından kritik olup, izleyen bölümlerde ÇMD'nin üretim, taşınma ve yerleştirme süreçleri ayrıntılı olarak ele alınacaktır.

ÇMD Üretiminde Susuzlaştırma, Karıştırma ve İletim Mekanizmaları

Macun dolgu; maden/baraj atıkları, bağlayıcı, katkı maddeleri ve sudan oluşan çok bileşenli bir karışım olup, kullanım amacına bağlı olarak kum ve elyaf gibi takviyelerle güçlendirilebilmektedir (Zhou et al., 2020). Karışımın performansı, özellikle atıkların tane boyu dağılımı ve mineralojik özelliklerine bağlı olup, ince tanelerin yüksek su tutma kapasitesi dayanımı olumsuz etkileyebilmektedir. Buna karşılık kum ilavesi, yoğunluğu artırarak su/çimento oranını düzenlemekte ve mukavemeti iyileştirmektedir. Bağlayıcı olarak genellikle Portland çimentosu tercih edilmekle birlikte, maliyet ve çevresel etkileri azaltmak

amacıyla uçucu kül ve cüruf gibi alternatif puzolanik malzemeler de kullanılmaktadır. Karışım suyu ise farklı kaynaklardan temin edilebilmekte olup, kimyasal özelliklerinin kontrol edilmesi önem taşımaktadır. Tipik bir ÇMD üretim sistemi; yoğunlaştırma, depolama, karıştırma ve pompalama ünitelerinden oluşmaktadır (bkz. Şekil 4).

Şekil 4 Çimentolu macun dolgu üretim sisteminin şematik gösterimi



Kaynak: Qi & Fourie, 2019; Wang & ark., 2023

ÇMD üretiminde atıkların susuzlaştırılması, katı içeriğinin artırılması ve istenen reolojik özelliklerin sağlanması açısından kritik bir aşamadır. Bu amaçla konvansiyonel veya derin konik

yoğunlaştırıcılar, siklonlar ve filtre sistemleri kullanılmaktadır. Kimyasal katkılarla desteklenen geleneksel yoğunlaştırıcılar genellikle %55–70 katı içeriğine sahip bulamaç üretirken, daha yüksek yoğunluklu dolgu elde etmek için siklon–filtre kombinasyonları tercih edilebilmektedir (Qi & Fourie, 2019). Ancak yüksek işletme maliyetleri nedeniyle son yıllarda derin konik yoğunlaştırıcılar ön plana çıkmış olup, bu sistemler yüksek tutma süresi ve gelişmiş sıkıştırma bölgesi sayesinde daha yüksek katı oranına sahip bulamaç üretimine olanak sağlamaktadır. Karıştırma aşaması ise ÇMD üretiminin en kritik adımlarından biridir. Tüm bileşenler, yeraltına sevk edilmeden önce sürekli karıştırıcılar içerisinde uygun oranlarda homojen hale getirilir. Genellikle çift şaftlı ve çok bıçaklı karıştırıcılar kullanılarak, susuzlaştırılmış atıkların etkin biçimde parçalanması ve karışımın uniform hale gelmesi sağlanır. Sistem kontrolü çoğunlukla karıştırıcı motorunun güç tüketimi üzerinden izlenir. Nihai hedef, boru hattında tıkanmaya neden olmadan yüksek katı içeriği ve yeterli akma gerilimine sahip stabil bir macun dolgu elde etmektir.

Üretilen macun dolgu, yeraltı duraklarına genellikle yerçekimi, pompalama veya bu iki sistemin birlikte kullanıldığı yöntemlerle iletilmektedir. Birçok tesiste, yüksek pompalama basınçlarından kaçınmak ve boru hattındaki sürtünme kayıplarını azaltmak amacıyla yerçekimiyle çalışan akış sistemleri tercih edilmektedir. Dağıtım sisteminin tasarımında boru hattı ağı, boru çapı ve malzeme türü kritik olup, hat içinde oluşabilecek yüksek basınçlar tıkanma ve boru hasarlarına yol açabilmektedir. Bu tür durumlar bakım süresini uzatarak üretim kayıplarına neden olmaktadır. Ancak topoğrafyanın uygun olmadığı koşullarda, gerekli enerji ihtiyacını karşılamak için pompa sistemlerinin kullanılması kaçınılmazdır. Dolgu operasyonu sonrasında veya planlı duruşlar öncesinde, boru hatlarının basınçlı su ve hava ile temizlenmesi gerekmektedir. Aksi takdirde, hat içerisinde biriken macun malzeme

zamanla kesit daralmasına, basınç artışına ve hatta boru patlamalarına neden olabilir. Bu durum, ciddi operasyonel aksaklıklar ve üretim gecikmeleriyle sonuçlanabilmektedir.

Dolgu Barikatlarının Tasarımı, Kontrolü ve Operasyonel Yönetimi

Cevher üretimi sonrasında, yeraltı duraklarında macun dolgunun tutulabilmesi için çekme noktalarında barikatların inşa edilmesi gerekmektedir. Uygulamada genellikle ilk aşamada daha yüksek çimento içeriğine (%5–7) sahip bir tıkaç dolgu belirli bir yüksekliğe kadar yerleştirilmekte, ardından daha düşük bağlayıcı oranına (%2–5) sahip ana dolgu ile doldurma işlemi tamamlanmaktadır. Barikat üzerine etkiyen basıncı sınırlamak amacıyla, tıkaç dolgunun yaklaşık 2–7 gün kürlenmesine izin verilmektedir (Yılmaz, 2018). Bu kademeli dolgu yaklaşımı, durakların daha kontrollü ve etkin şekilde doldurulmasına olanak sağlamaktadır. Dolgunun başlangıçtaki akışkan yapısını tutmak için en yaygın kullanılan sistem, kesit boyunca inşa edilen çelik donatılı püskürtme beton barikatlardır. Bu yapılar genellikle ahşap kalıp, ankrajlı donatı elemanları ve belirli kalınlıkta püskürtme beton tabakasından oluşmakta olup, dolgunun güvenli şekilde tutulmasını sağlamaktadır.

Macun dolgu tasarımında, dayanımın yanı sıra barikatların dolgu sırasında oluşan basınçlara güvenli şekilde karşı koyabilmesi kritik bir gerekliliktir. Bu nedenle dolgu içerisindeki gerçek gerilmelerin, toprak basınç hücreleri ve barikat üzerine yerleştirilen ölçüm sistemleri ile izlenmesi önem taşımaktadır. Her dolgu uygulaması saha koşullarına bağlı olarak farklılık gösterdiğinden, süreç; mühendisler, operatörler, denetçiler ve diğer paydaşlar arasında koordinasyon gerektiren çok disiplinli bir yapıdadır. Bu kapsamda hazırlanan bir macun dolgu yönetim planı, ortak bir bilgi tabanı oluşturarak üretimden yerleştirmeye kadar tüm aşamaların

etkin ve güvenli şekilde yürütülmesini sağlar. Aynı zamanda bu plan, tesis işletimi, kontrol stratejileri ve yeraltı dağıtım sistemlerine ilişkin temel bilgileri de içermelidir.

Literatürde yapılan çalışmalar, çimentolu macun dolgu (ÇMD) uygulamalarında tüm madenler için geçerli tek bir optimum karışım tasarımının bulunmadığını ortaya koymaktadır (Fahey & ark., 2009). Bu nedenle, uygun karışım oranları her saha için; dolgu elemanının özellikleri ve yerinde test koşulları dikkate alınarak ayrı ayrı belirlenmelidir (Khudyakov & Vashchenko, 2020). ÇMD performansını belirleyen faktörler genel olarak iki ana grupta değerlendirilmektedir. Bunlardan ilki, dolgunun bileşimini oluşturan malzemelere ve kür sürecindeki etkileşimlerine bağlı iç parametrelerdir (Deschamps & ark., 2008). İkinci grup ise dolgunun yeraltına yerleştirildikten sonraki davranışını etkileyen dış parametreleri kapsamaktadır. Bu kapsamda dolgu–kaya etkileşimi, kür koşulları, konsolidasyon, drenaj, yeraltı suyu etkileri ve dinamik yükler önemli rol oynamaktadır (Yilmaz & ark., 2015; Mbonimpa & ark., 2019; Libos & ark., 2021).

Çimentolu Macun Dolguların Tasarım Prensipleri

Çimentolu macun dolgu (ÇMD), yüksek oranda atık malzeme (%70–85), bağlayıcı (%3–7, genellikle Portland çimentosu) ve sudan oluşan kompozit bir karışım olup, bileşen oranları hedeflenen mekanik ve reolojik özelliklere göre belirlenmektedir (Koohestani & ark., 2021). Karışım performansı üzerinde özellikle atıkların tane boyutu dağılımı ve özgül yüzey alanı etkili olmakta; ince taneli fraksiyonun (<20 μm) yeterli düzeyde olması, hem ayrışmanın önlenmesi hem de dayanım gelişimi açısından kritik rol oynamaktadır. Bu bağlamda, ince taneli oranının genellikle %15'in üzerinde olması ve optimum dayanım için %25–30 aralığında bulunması önerilmektedir (Landriault, 2001; Fall & ark., 2005). Bağlayıcı olarak farklı puzolanik malzemeler

kullanılabilmekle birlikte, en yaygın tercih Portland çimentosudur. Çimento miktarı yalnızca maliyeti değil, aynı zamanda C-S-H oluşumu üzerinden dayanım gelişimini de doğrudan etkilemektedir. Ayrıca karışımın pompalanabilirliği ve hidratasyon süreçleri açısından su/çimento oranı önemli olup genellikle 2.7–20.2 aralığında değişmektedir (Belem & Benzaazoua, 2008; Fall & ark., 2010). Bu nedenle, uygun mühendislik özelliklerine sahip ÇMD üretimi için bileşenlerin özelliklerinin detaylı analiz edilmesi ve karışım tasarımının optimize edilmesi gerekmektedir.

Çimentolu Macun Dolgularda Maden Atıklarının Değerlendirilmesi

Çimentolu macun dolgu (ÇMD) uygulamalarının gelişimiyle birlikte, dolgu malzemesi olarak kullanılabilecek farklı endüstriyel katı atıkların değerlendirilmesine yönelik çalışmalar artmıştır. Kullanılan atık türü, çoğunlukla maden sahasına yakınlığı ve erişilebilirliği ile belirlenmektedir. Literatürde, ÇMD üretiminde en yaygın kullanılan malzemenin değirmen atıkları olduğu, bunu kömür gangı, kum, kaya agregası, inşaat-yıkım atıkları ve atık kaya gibi diğer malzemelerin izlediği görülmektedir. Değirmen atıklarının yüksek kullanım oranı, zenginleştirme süreçleri sonucu büyük miktarlarda üretilmeleri ile ilişkilidir. Buna karşılık iri taneli atıkların daha sınırlı kullanımı, uygun granülometriye ulaşmak için ek kırma ve eleme işlemlerine ihtiyaç duyulmasından kaynaklanmaktadır. Bu ilave işlemler, dolgu üretim maliyetlerini artırarak uygulamada ekonomik bir dezavantaj oluşturmaktadır. Şekil 5, 1990 yılından günümüze kadar çimentolu macun dolgu (ÇMD) uygulamalarında farklı endüstriyel katı atık türlerinin kullanım dağılımını ortaya koymaktadır.

Şekil 5 ÇMD uygulamalarında katı atıklarının kullanım oranları

Kaynak: Behera & ark., 2021'den türetilmiştir.

Cevher türüne bağlı olarak değirmen atıkları farklı özellikler gösterebilmekte olup, demir, silika, nikel, altın-gümüş, bakır-altın, tungsten, kırmızı çamur, tantal-niyobyum, uranyum ve kurşun-çinko kökenli atıklar ÇMD uygulamalarında küresel ölçekte değerlendirilen başlıca malzemeler arasında yer almaktadır. Bununla birlikte literatürde, özellikle bakır-altın, altın-gümüş, altın, bakır-çinko ve bakır esaslı atıkların daha yaygın kullanıldığı; nikel, tantal-niyobyum, uranyum ve kurşun-çinko kökenli atıkların ise sınırlı sayıda çalışmada ele alındığı görülmektedir. Herhangi bir atığın ÇMD karışımlarında kullanılabilmesi için fiziksel, kimyasal ve mineralojik özelliklerinin detaylı şekilde incelenmesi gerekmektedir. Özellikle özgül ağırlık, tane boyu dağılımı ve yoğunluk gibi fiziksel parametreler dolgu performansını doğrudan etkilemektedir. Özgül ağırlık, cevher tipine bağlı olarak değişmekte ve bağlayıcı miktarının belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır (Zheng & ark., 2016). Ayrıca atıkların inceliği ve yoğunluğu; su ihtiyacı, dayanım gelişimi, mikroyapısal özellikler ve maliyet üzerinde belirleyici etkiye sahiptir (Abdul-Hussain & Fall, 2011).

Tane boyu dağılımı ve buna bağlı özgül yüzey alanı, ÇMD performansında kritik bir faktördür. İnce tanelerin artması, yüzey alanını büyüterek hidratasyon reaksiyonlarına katılan su miktarını artırmakta ve karışım davranışını etkilemektedir (Sun & ark., 2021; Wang & ark., 2024). Özellikle 20 µm'den küçük ince fraksiyonun oranı, dolgunun gözenekliliği, drenajı ve mekanik dayanımı üzerinde önemli rol oynamaktadır. Bu bağlamda, atıklar ince fraksiyon oranına göre kaba (%15–35), orta (%35–60) ve ince (>%60) olarak sınıflandırılmaktadır (Qi & ark., 2018). İnce fraksiyonun yeterli düzeyde olması, karışım bileşenlerinin ayrışmasını önleyerek su tutma kapasitesini artırmakta, serbest suyun drenajını sınırlamakta ve iri tanelerin taşınmasını kolaylaştırmaktadır. Bu nedenle, gerekli akış özelliklerinin sağlanabilmesi için ÇMD karışımlarında ince fraksiyon oranının (<20 µm) genellikle %15'in üzerinde olması önerilmektedir (Haiqiang & ark., 2016).

Maden atıklarının tane boyu dağılımını tanımlamak amacıyla literatürde farklı sınıflandırma yaklaşımları geliştirilmiştir. Bu kapsamda en yaygın kullanılan modeller arasında güç yasası, modifiye A&A ve Rosin–Rammler (R–R) modelleri yer almaktadır (Mehdipour & Khayat, 2018). Bunun yanı sıra, gradasyonun daha etkin temsil edilebilmesi için üniformluk katsayısı ($C_u = D_{60}/D_{10}$) ve derecelenme katsayısı ($C_c = D_{30}^2/(D_{60} \times D_{10})$) gibi parametreler de kullanılmaktadır. Bu katsayılar, D_{10}, D_{30} ve D_{60} karakteristik tane çaplarına bağlı olarak hesaplanmaktadır (Lamorski & ark., 2014). Literatürde raporlanan verilere göre maden atıklarının özgül ağırlıkları 2.7–4.13, tane boyutları 0.1–500 µm, medyan çap (D_{50}) 16.2–46.9 µm, C_u değeri 4.33–16.6 ve C_c değeri ise 2.42–8.46 aralığında değişmektedir.

Maden atıkları genellikle pürüzlü ve köşeli tane yapısına sahip olduğundan, dolgunun boru hatlarıyla taşınması sırasında önemli aşınma ve ekipman yıpranmasına neden olmaktadır; bu

durum hem hat dayanımını azaltmakta hem de işletme maliyetlerini artırmaktadır. Parçacık şekli aynı zamanda dolgunun konsolidasyon ve oturma davranışını da doğrudan etkilemektedir (Mishra & Das, 2010). Atıkların mineralojik özellikleri, ÇMD'nin mekanik ve reolojik performansında belirleyici rol oynamaktadır (Qi and Fourie, 2019). Özellikle kil mineralleri ve kuvars içeriğinin yüksek olması su tutma kapasitesini ve aşındırıcılığı artırırken, sülfür açısından zengin atıklar uzun vadede asidik reaksiyonlar yoluyla C-S-H yapısını zayıflatarak dayanımı olumsuz etkileyebilmektedir (Rao & Reddy, 2006). Değirmen atıklarında yaygın olarak kuvars, hematit, kalsit, dolomit ve pirit gibi mineral fazlar bulunmakta (Behera & ark., 2021) ve bu atıkların kimyasal bileşimi çoğunlukla SiO_2, CaO, Al_2O_3, MgO ve Fe_2O_3 oksitlerinden oluşmaktadır. Bu bileşenler dolgunun dayanım gelişiminde kritik rol oynarken, gözlenen farklılıklar cevher türüne ve jeolojik koşullara bağlı olarak değişiklik göstermektedir.

Belediye Katı Atıklarının Sürdürülebilir Yönetimi

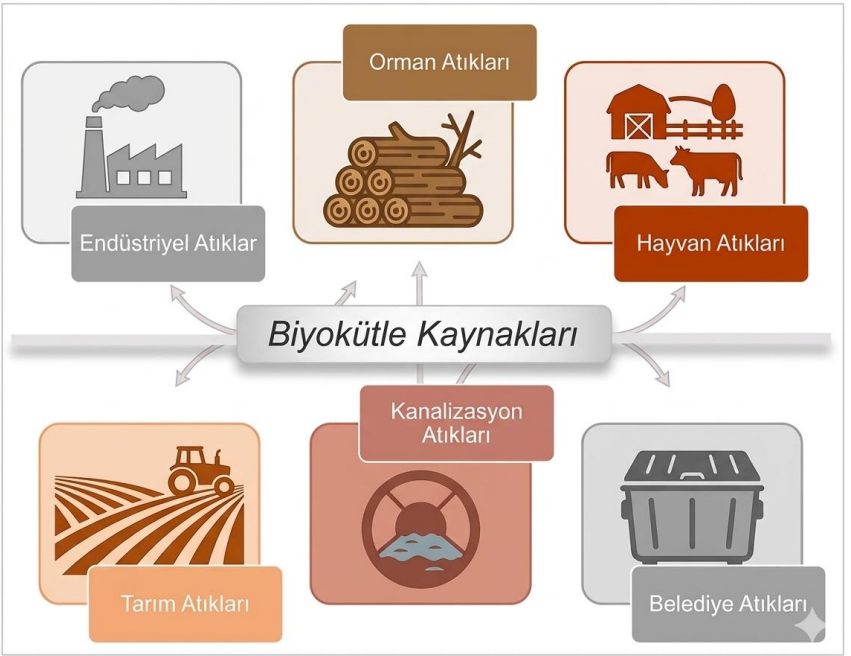
Belediye katı atıkları, evsel, bahçe, endüstriyel ve tehlikeli atıkları kapsayan geniş bir bileşen grubundan oluşmakta olup, kentleşme ve nüfus artışına bağlı olarak hızla artmaktadır. Dünya Bankası verilerine göre günlük küresel üretim milyonlarca tona ulaşmış ve bu miktarın önümüzdeki yıllarda önemli ölçüde artacağı öngörülmektedir (Kaza & ark., 2018). Ülkeler arasında üretim miktarları farklılık göstermekle birlikte, ABD ve Çin gibi ülkelerde katı atıkları üretimi oldukça yüksek seviyelerdedir ve geri dönüşüm oranları istenilen düzeyde değildir (OECD, 2007; EPA, 2011). Bu durum, sürdürülebilir atık yönetimi için alternatif değerlendirme yöntemlerinin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır (Obe & ark., 2017). Katı atık yönetiminde yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biri yakma teknolojisidir. Bu yöntem, atık hacmini ve ağırlığını önemli ölçüde azaltmasının yanı sıra enerji geri kazanımı imkânı sunmaktadır (Zhang & ark., 2021). Günümüzde modern yakma

tesisleri, enerji üretimi ile entegre çalışmakta ve çevresel faydalar sağlamaktadır. Katı atıkların yakılması sırasında oluşan başlıca yan ürünler taban külü ve uçucu küldür. Bunlardan taban külü, toplam külün büyük bir kısmını (%75–80) oluşturan ve genellikle gözenekli yapıya sahip ana katı faz olarak tanımlanmaktadır.

Biyokütle Kaynaklı Atıkların Değerlendirilmesi

Biyokütlenin termik santrallerde yakılması, fosil yakıtlara kıyasla daha sürdürülebilir ve verimli bir elektrik üretim yöntemi olarak öne çıkmaktadır (Briones-Hidrovo & ark., 2021). Küresel ölçekte biyokütleye dayalı enerji üretimi hızla artmakta olup, toplam kurulu güç yaklaşık 130 GW seviyesine ulaşmış ve özellikle Asya, Afrika ve Amerika kıtalarında yoğunlaşmıştır. Bu sistemlerde enerji üretimi, kömür yakma süreçlerine benzer şekilde gerçekleştirilmekte; ancak yakıt olarak bitkisel ve organik kökenli biyokütle kaynakları kullanılmaktadır (IRENA, 2012). Biyokütle kaynakları; orman ve odun atıkları, tarımsal artıklar, kentsel ahşap atıkları ve gıda işleme yan ürünleri gibi çeşitli malzemeleri içermekte olup genel olarak otlar, odunsu bitkiler, su bitkileri ve gübreler şeklinde sınıflandırılmaktadır (bkz. Şekil 6). Bu malzemeler, fotosentez yoluyla depolanan güneş enerjisini içermeleri nedeniyle yenilenebilir enerji kaynağı olarak değerlendirilmektedir. Nitekim biyokütle enerjisi, küresel enerji arzında önemli bir paya sahip olup toplam enerji tüketiminin yaklaşık %10'unu karşılamakta ve yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde en büyük katkıyı sağlamaktadır (IRENA, 2013).

Şekil 6 Biyokütle tabanlı atıkların genel sınıflandırması



Son yıllarda biyokütleden enerji üretim teknolojileri önemli ölçüde gelişmiş olup, doğrudan yakma ve gazlaştırma gibi yöntemler yaygın olarak kullanılmaktadır. Küresel ölçekte biyokütle enerjisinin büyük kısmı katı biyokütleden sağlanmakta, daha küçük bir bölümü ise sıvı biyoyakıtlar ve biyogazdan elde edilmektedir. Kombine ısı ve güç sistemlerinde biyokütle kullanımının verimliliği %70–90 aralığına ulaşmış ve teknolojik ilerlemelerle birlikte artmaya devam etmektedir (Eisentraut & Brown, 2012). Ayrıca biyokütlenin enerji potansiyelinin gelecekte önemli ölçüde artarak 2050 yılına kadar yıllık 300 EJ seviyesine ulaşması beklenmektedir (IEA, 2012). Biyokütlenin enerji üretiminde daha verimli kullanılabilmesi için kurutma, peletleme, torrefaksiyon ve piroliz gibi çeşitli ön işlem yöntemleri uygulanmaktadır. Bu işlemler, biyokütlenin taşınmasını ve yanma performansını iyileştirirken, özellikle akışkan yataklı kazan sistemleri yüksek verim ve düşük emisyon avantajlarıyla öne

çıkmaktadır. Bununla birlikte, biyokütle yakımının önemli dezavantajlarından biri kül oluşumudur. Yanma sürecinde taban külü ve uçucu kül olmak üzere iki ana kül türü ortaya çıkmaktadır. Taban külü daha iri ve ağır partiküllerden oluşurken, uçucu kül ince partiküller halinde gaz akımıyla taşınmakta ve özel filtre sistemleri ile tutulmaktadır (Modolo & ark., 2013). Kül miktarı ve özellikleri; kullanılan biyokütle türüne, yakma tekniğine ve işletme koşullarına bağlı olarak değişmekte olup, otsu biyokütlelerin odunsu kaynaklara kıyasla daha fazla kül ürettiği bilinmektedir (Koppejan & Van Loo, 2012).

Biyokütle Atıklarının Özellikleri

Biyokütle termik santrallerinde oluşan kül kalıntıları, taban külü (BBA) ve uçucu kül (BFA) olarak iki ana grupta incelenmektedir. Bu küller, biyokütlenin yanması sonrası oluşan oksitlenmiş mineraller ile belirli oranda yanmamış organik bileşenler içermektedir. Söz konusu organik içerik; karbonhidratlar, lignin, lipitler ve proteinlerden oluşmakta olup biyokütlenin çoğunlukla lignoselülozik karakterde olduğu bilinmektedir (Wang & Tester, 2023). Kül miktarı ve özellikleri; biyokütle türü, yakma sistemi ve işletme koşullarına bağlı olarak değişiklik göstermektedir (Munawar & ark., 2021). Fiziksel açıdan, BBA genellikle daha iri ve yoğun partiküllerden oluşurken, BFA baca gazlarıyla taşınan ince taneli fraksiyonu temsil etmektedir. Biyokütle küllerinin tane şekilleri genellikle düzensiz olup, kömür küllerine kıyasla daha düşük yanma sıcaklıkları nedeniyle küresel yapı göstermez. Partikül boyutu BFA için genellikle <200 μm iken, BBA'da mm mertebesine ulaşabilmektedir. Yoğunluk ve tane boyu gibi özellikler, kullanılan biyokütle türüne bağlı olarak önemli değişkenlik göstermektedir (Eliche-Quesada & ark., 2021).

Biyokütle atıklarının nem içeriği de önemli bir parametre olup genellikle %30 eşik değeri esas alınmaktadır (Ravindiran &

ark., 2022). Kimyasal olarak ise biyokütle küllerinin bileşimi; Si, Ca, Al, Fe, K ve Mg gibi elementlerce zengin olup, bu içerik biyokütlenin kaynağı ve yanma koşullarına bağlı olarak değişmektedir (Cruz & ark., 2019). Bu nedenle, biyokütle külünün özellikleri oldukça değişken olup her bir atık türü için ayrı değerlendirme yapılması gerekmektedir.

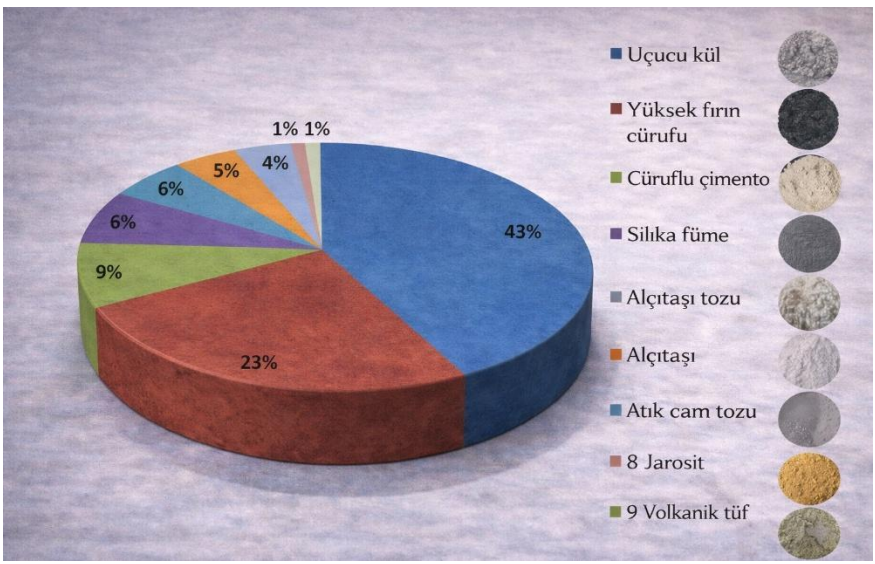
Biyokütle uçucu külleri (BFA), kömür uçucu külüne benzer şekilde kimyasal bileşimine göre C ve F sınıflarına ayrılabilmekte olup bu sınıflandırma özellikle CaO içeriğine dayanmaktadır; yaklaşık %8 ve üzeri CaO içeren küller C sınıfı, daha düşük CaO içeriğine sahip olanlar ise F sınıfı olarak değerlendirilmektedir (Agrela & ark., 2019). Biyokütle yakımı sonucu oluşan küller, Pb, Cd, Cr, Cu, As, Ni ve Zn gibi potansiyel olarak zararlı elementlerin yanı sıra çeşitli bitkisel kökenli mineralleri de içermektedir. Bu durum, külün mühendislik uygulamalarındaki kullanımını etkilerken aynı zamanda çevresel ve sağlık açısından dikkatle değerlendirilmesini gerektirmektedir. Mineralojik açıdan bu küller; silikat, sülfat, fosfat, karbonat ve klorür gibi farklı fazlardan oluşmakta ve bu yapı, yanma sırasında gerçekleşen oksidasyon ve ayrışma reaksiyonlarının bir sonucudur (Vassilev & ark., 2013). Literatürde farklı biyokütle türlerinden elde edilen küllerin mineral bileşimlerinin önemli ölçüde değiştiği görülmektedir. Örneğin zeytin atıklarında arkanit ve kalsit, odunsu atıklarda kuvars ve portlandit, tarımsal atıklarda ise kuvars ve albit gibi fazlar rapor edilmiştir (Beltrán & ark., 2016). Bu farklılıklar, külün özelliklerinin biyokütle kaynağı ve yakma koşullarına bağlı olarak değiştiğini göstermektedir.

Macun Dolgu Karışımlarında Bağlayıcı Türleri ve Etkileri

Çimentolu macun dolguların (ÇMD) mekanik performansı, bağlayıcının türü ve miktarına doğrudan bağlıdır (Xu & ark., 2020). Bu sistemlerde en yaygın bağlayıcı Portland çimentosu olup

genellikle %3–7 oranında kullanılmakta ve dayanım gelişiminde belirleyici rol oynamaktadır. Ancak çimento miktarının artışı maliyetleri önemli ölçüde yükseltmekte ve toplam dolgu maliyetinin %30–70'ini oluşturabilmektedir (Fall & Samb, 2008; Wu & ark., 2024). Ayrıca çimento üretimi, yüksek CO_2 emisyonları ve çevresel etkiler nedeniyle sürdürülebilirlik açısından sınırlayıcıdır (Gao & ark., 2015). Bu nedenle, ekonomik ve çevresel açıdan daha uygun çözümler kapsamında uçucu kül, cüruf ve diğer puzolanik malzemeler alternatif bağlayıcı olarak değerlendirilmektedir (bkz. Şekil 7). Literatürde özellikle uçucu kül ve cürufun yaygın şekilde kullanıldığı ve önemli bir paya sahip olduğu görülmektedir (Behera & ark., 2021).

Şekil 7 ÇMD sistemlerinde Portland çimentosuna alternatif bağlayıcılar



Kaynak: Behera & ark., 2021'den türetilmiştir

Uçucu kül (UK), termik santral kaynaklı bir yan ürün olup genellikle küresel şekilli ferro-alümino-silikat taneciklerinden oluşmaktadır (Blissett & Rowson, 2012). CSA A3001 standardına

göre UK; düşük (<%8 CaO), orta (%8–20 CaO) ve yüksek (> %20 CaO) kireç içerikli olarak sınıflandırılırken, ASTM C618'e göre C ve F tipi olarak ayrılmaktadır. Bu ayrım, toplam oksit içeriğine (SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3) bağlı olup, C tipi küller daha yüksek kalsiyum içeriği nedeniyle hem bağlayıcı hem de puzolanik özellik gösterirken, F tipi küller düşük CaO içeriğiyle daha çok puzolanik karakter sergilemektedir (Yazıcı & Arel, 2012; Giergiczny, 2019). TS EN 197-1'e göre ise UK'lar silisli (V) ve kalkerli (W) olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. C tipi uçucu külün Portland çimentosu (PÇ) yerine kullanımı maliyetleri azaltmakla birlikte mekanik özelliklerde bazı düşüşlere neden olabilmektedir; ancak sülfat etkisine karşı uzun vadede olumlu katkılar sağlayabilmektedir (Ali & ark., 2021). Ayrıca PÇ ile birlikte kullanımı, özellikle uzun kür sürelerinde dayanım gelişimini desteklemektedir (Cavusoglu & ark., 2021). Sülfür açısından zengin atıkların, hidratasyon ürünlerini bozarak dolgu dayanımını olumsuz etkilediği de bilinmektedir (Jafari & ark., 2021). Yüksek fırın cürufu (YFC) ise demir-çelik üretiminin camsı yapıda bir yan ürünü olup ince taneli ve reaktif bir malzemedir. PÇ ile birlikte kullanıldığında hidratasyon süreçlerini destekleyerek ek C-S-H oluşumuna katkı sağlamakta ve dayanım gelişimini iyileştirmektedir (Ustabaş & ark., 2021). Bununla birlikte, gözenek yapısını incelterek hidrolik iletkenliği azaltmakta ve dolgu yoğunluğunu artırmaktadır (Kou & ark., 2020). Sonuç olarak, UK ve YFC gibi alternatif bağlayıcılar, özellikle sülfür içeriği yüksek atıklarla hazırlanan ÇMD'lerde hem uzun vadeli dayanımı artırmakta hem de maliyetlerin düşürülmesine katkı sağlamaktadır.

Macun Dolgularda Kimyasal Katkıların Mühendislik Özelliklerine Etkisi

Kimyasal katkı maddeleri, beton ve harç teknolojisinde yaygın olarak kullanılan ve karışım performansını artırmayı amaçlayan bileşenlerdir. Benzer şekilde, çimentolu macun dolgular (ÇMD) daha düşük çimento içeriğine sahip olmasına rağmen, bu

katkıların kullanımı dolgu performansını iyileştirme ve maliyetleri azaltma açısından önemli avantajlar sağlamaktadır (Mangane & ark., 2018; Saedi & ark., 2021). ÇMD uygulamalarında karşılaşılan sorunların büyük bölümü hazırlama, taşıma ve yerleştirme aşamalarında ortaya çıktığından, kimyasal katkılar optimum karışım tasarımının geliştirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Bu katkılar; dayanım artışı (erken ve uzun vadede), kohezyonun iyileştirilmesi, su içeriği ve ayrışmanın azaltılması, pompalanabilirlik ve işlenebilirliğin artırılması ile büzülme ve çatlak oluşumunun azaltılması gibi çok yönlü faydalar sağlamaktadır (Koohestani & ark., 2018; Jiang & ark., 2020). Literatürde, kimyasal katkı içeren dolguların katkısız sistemlere kıyasla önemli ölçüde daha yüksek dayanım değerlerine ulaştığı, ayrıca su ihtiyacının azaldığı ve akış özelliklerinin iyileştiği rapor edilmiştir (Quattara & ark., 2018; Ouffa & ark., 2022). Bu nedenle, özellikle sülfür içeriği yüksek atıklar için katkı kullanımı, hem dayanım ve dayanıklılığı artırmakta hem de çimento tüketimini ve işletme maliyetlerini azaltmaktadır. Bununla birlikte, katkıların etkinliği doğru dozaj ve uygun karışım tasarımına bağlı olup, yanlış kullanım durumunda olumsuz sonuçlar ortaya çıkabilmektedir.

ÇMD’de Su/Çimento Oranı ve Performans İlişkisi

Çimentolu macun dolgular (ÇMD) için karışım suyu; belediye/musluk, proses, yeraltı ve yüzey suları gibi farklı kaynaklardan temin edilebilmektedir. Su, hidratasyon süreci ve dolgu mikroyapısı üzerinde doğrudan etkili olup genellikle su/çimento (s/ç) oranı veya katı içeriği ile ifade edilmektedir. Çimentonun etkin şekilde hidrate olabilmesi için minimum s/ç oranının yaklaşık 0.4 olması gerekirken, ÇMD’lerde pompalanabilirlik gereksinimi nedeniyle bu oran genellikle 2.7–20.2 aralığında değişmektedir (Belem & Benzaazoua, 2008). Bununla birlikte, aşırı su kullanımı kılcal boşluk oranını artırarak dayanımı olumsuz etkileyebilmektedir (Qi & Fourie, 2019).

Karışım suyunun miktarı kadar kimyasal kalitesi de kritik öneme sahiptir. pH, redoks potansiyeli, elektriksel iletkenlik ve iyon konsantrasyonları (özellikle SO_4^{2-} ve Ca^{2+}) hidratasyon sürecinin sağlıklı ilerlemesini belirlemektedir. Yüksek sülfat içeriği, bağlayıcı sistemle etkileşime girerek dayanım gelişimini olumsuz etkileyebilir ve özellikle cüruf bazlı bağlayıcılar bu duruma daha hassastır (Benzaazoua & ark., 2002). ÇMD karışımlarında önemli bir su kaynağı olan gözenek suyu, toplam suyun büyük bir kısmını oluşturmakta ve özellikle sülfürlü cevherlerin işlenmesi sonucu sülfatça zengin ortamlar oluşabilmektedir. Bu durumda temiz su kullanımı sülfat konsantrasyonunu seyrelterek performansı iyileştirebilmektedir (Wu & ark., 2015; Li & ark., 2020). Ayrıca maliyet ve çevresel nedenlerle geri kazanılmış proses suyu tercih edilse de, literatürde musluk veya yüzey suyu kullanımıyla daha yüksek dolgu stabilitesi elde edildiği belirtilmektedir (Ouellet & ark., 2007).

Macun Dolgu Sistemlerinde Boru Hattı Taşıma Mekanizmaları

Yerüstü dolgu tesisinde optimum karışım oranlarına göre hazırlanan ÇMD bulamacı, boru hatları aracılığıyla yeraltı üretim odalarına iletilmektedir. Bu hidrolik taşıma yöntemi; sürekli kullanım imkânı, düşük bakım gereksinimi ve çevresel avantajları nedeniyle yaygın olarak tercih edilmektedir (Kumar & ark., 2003; Ravelet & ark., 2013). Taşıma sistemleri genel olarak yerçekimi, pompalama veya bu iki yöntemin kombinasyonu şeklinde uygulanmakta olup, günümüzde kurulum ve işletme kolaylığı nedeniyle özellikle pompalama/yerçekimi sistemleri öne çıkmaktadır (Belem & Benzaazoua, 2008; Qi & ark., 2018). Taze ÇMD bulamacı, yüksek katı içeriğine sahip Newtonyen olmayan bir akışkan olup, boru içi akışı büyük ölçüde reolojik özellikleri tarafından belirlenmektedir. Bu kapsamda akma gerilmesi ve viskozite, taşınabilirliği kontrol eden temel parametrelerdir (Roshani & Fall, 2020). Katı içeriği, tane boyu dağılımı, su miktarı ve

kimyasal katkılar gibi faktörler reolojik davranışı doğrudan etkilemektedir. Özellikle yüksek katı oranı viskoziteyi artırırken, ince taneli ve köşeli parçacık yapısı akış direncini yükseltmekte ve boru aşınmasına neden olabilmektedir. Karışım suyunun miktarı ve kimyasal özellikleri de reolojide belirleyicidir. Artan su içeriği akışkanlığı iyileştirirken, suyun pH değeri parçacıklar arası etkileşimleri ve zeta potansiyelini değiştirerek akma gerilmesini etkileyebilmektedir. Ayrıca katkı maddeleri, özellikle akışkanlaştırıcılar, parçacıklar arası itme kuvvetlerini artırarak akışı iyileştirmekte; buna karşılık sıcaklık artışı hidratasyon sürecini hızlandırarak viskozite ve akma gerilmesini yükseltebilmektedir.

Macun Dolguların Dayanım ve Elastisite Özelliklerinin Değerlendirilmesi

Çimentolu macun dolguların (ÇMD) temel amacı yeraltında stabiliteyi sağlamak olduğundan, mekanik dayanım tasarımın en kritik parametrelerinden biridir (Fall & ark., 2007). Bu kapsamda, hem pratik hem de ekonomik olması nedeniyle tek eksenli basınç dayanımı (UCS) testleri en yaygın kullanılan yöntemdir ve dolgu performansının değerlendirilmesinde temel ölçüt olarak kabul edilmektedir (Qi & ark., 2018). Bununla birlikte, bazı durumlarda akma dayanımı, elastisite modülü ve çekme dayanımı gibi ilave mekanik özellikler de dikkate alınabilmektedir. Gerekli dayanım değerleri, dolgunun kullanım amacına ve saha koşullarına bağlı olarak değişmektedir. Örneğin, atık depolama amacıyla kullanılan dolgular için erken yaşta yaklaşık 150–300 kPa UCS yeterli görülürken (Bloss, 2002), yapısal destek amacıyla kullanılan sistemlerde bu değerin 4 MPa'nın üzerine çıkması gerekebilmektedir (Grice, 1998). ÇMD'lerin dayanım gelişimi; bağlayıcı türü ve miktarı, su/çimento oranı, katkı maddeleri ile kür koşulları gibi birçok parametrenin etkisi altındadır (Ghirian & Fall, 2016). Bu nedenle uygun tasarım dayanımı, kullanım amacı ve çevresel koşullar dikkate alınarak belirlenmelidir.

Kaynakça

Abdul-Hussain, N., & Fall, M. (2011). Unsaturated hydraulic properties of cemented tailings backfill that contains sodium silicate. Engineering geology, 123(4), 288-301.

Agrela, F., Cabrera, M., Morales, M. M., Zamorano, M., & Alshaaer, M. (2019). Biomass fly ash and biomass bottom ash. In New trends in eco-efficient and recycled concrete (pp. 23-58). Woodhead Publishing.

Akcil, A., & Koldas, S. (2006). Acid mine drainage (AMD): Causes, treatment and case studies. Journal of Cleaner Production, 14(12–13),1139–1145.https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2004.09.006

Ali, B., Yilmaz, E., Tahir, A., Gamaoun, F., El Ouni, M., & Murtaza Rizvi, S. (2021). The durability of high-strength concrete containing waste Tire steel fiber and coal fly ash. Advances in Materials Science and Engineering, 2021, 7329685.

ASTM C 143. (2008). Standard Test Method for Slump of Hydraulic - Cement Concrete, Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, West Conshohocken, PA.

Azapagic, A. (2004). Developing a framework for sustainable development indicators for the mining and minerals industry. Journal of Cleaner Production, 12(6), 639–662. https://doi.org/10.1016/S0959-6526(03)00075-1

Behera, S. K., Mishra, D. P., Singh, P., Mishra, K., Mandal, S. K., Ghosh, C. N., Kumar, R., & Mandal, P. K. (2021). Utilization of mill tailings, fly ash and slag as mine paste backfill material: Review and future perspective. Construction and Building Materials, 309, 125120.

Belem, T., & Benzaazoua, M. (2008). Design and application of underground mine paste backfill technology. Geotechnical and

Geological Engineering, 26*(2),* 147–174. https://doi.org/10.1007/s10706-007-9154-3

Benzaazoua, M., Belem, T., & Bussiere, B. (2002). Chemical factors that influence the performance of mine sulphidic paste backfill. Cement and concrete research, 32(7), 1133-1144.

Blight, G. E. (2010). Geotechnical engineering for mine waste storage facilities. CRC Press.

Blissett, R. S., & Rowson, N. A. (2012). A review of the multi-component utilisation of coal fly ash. Fuel, 97, 1-23.

Bloss, M. (2002). Below ground disposal (mine backfill). Paste and thickened tailings: A guide, 103-126.

Briones-Hidrovo, A., Copa, J., Tarelho, L. A., Gonçalves, C., da Costa, T. P., & Dias, A. C. (2021). Environmental and energy performance of residual forest biomass for electricity generation: Gasification vs. combustion. Journal of Cleaner Production, 289, 125680.

Cavusoglu, I., Yilmaz, E., & Yilmaz, A. O. (2021b). Sodium silicate effect on setting properties, strength behavior and microstructure of cemented coal fly ash backfill. Powder Technology, 384, 17-28.

Cruz, N. C., Silva, F. C., Tarelho, L. A., & Rodrigues, S. M. (2019). Critical review of key variables affecting potential recycling applications of ash produced at large-scale biomass combustion plants. Resources, Conservation and Recycling, 150, 104427.

Deschamps, T., Benzaazoua, M., Bussière, B., Aubertin, M., & Belem T. (2008). Microstructural and geochemical evolution of paste tailings in surface storage. Minerals Engineering, 21 (4), 341–353.

Eisentraut, A., & Brown, A. (2012). Technology roadmap: bioenergy for heat and power. Technology Roadmaps, 2, 1-41.

Eliche-Quesada, D., Felipe-Sesé, M. A., & Fuentes-Sánchez, M. J. (2021). Biomass bottom ash waste and by-products of the acetylene industry as raw materials for unfired bricks. Journal of Building Engineering, 38, 102191.

Fahey, M., Helinski, M., & Fourie, A.B. (2009). Some aspects of the mechanics of arching in the paste backfilled stopes. Canadian Geotechnical Journal, 46 (11), 1322-1336.

Fall, M., Benzaazoua, M., & Saa, E. G. (2010). Mix proportioning of underground cemented tailings backfill. Tunnelling and Underground Space Technology, 25(3), 267–276. https://doi.org/10.1016/j.tust.2009.11.005

Fall, M., & Samb, S. S. (2008). Pore structure of cemented tailings materials under natural or accidental thermal loads. Materials Characterization, 59(5), 598-605.

Fall, M., & Pokharel, M. (2010). Coupled effects of sulphate and temperature on the strength development of cemented tailings backfills: Portland cement-paste backfill. Cement and Concrete Composites, 32(10), 819-828.

Fourie, A.B., Fahey, H., & Helinski, M. (2007). Using effective stress theory to characterize the behaviour of backfill. CIM Bulletin, 100 (1103), 1-9 (Paper 27).

Gao, T., Shen, L., Shen, M., Chen, F., Liu, L., & Gao, L. (2015). Analysis on differences of carbon dioxide emission from cement production and their major determinants. Journal of Cleaner Production, 103, 160-170.

Ghirian, A., & Fall, M. (2016). Long-term coupled behaviour of cemented paste backfill in load cell experiments. Geomechanics and geoengineering, 11(4), 237-251.

Giergiczny, Z. (2019). Fly ash and slag. Cement and Concrete Research, 124, 105826.

Haiqiang, J., Fall, M., & Cui, L. (2016). Yield stress of cemented paste backfill in sub-zero environments: experimental results. Minerals Engineering, 92, 141-150.

Hustrulid, W. A., & Bullock, R. L. (Eds.). (2001). Underground mining methods: Engineering fundamentals and international case studies. SME.

IRENA (International Renewable Energy Agency), 2012. Renewable energy technologies: cost analysis series. Wind power. Volume 1: Power sector Issue 5/5. Biomass for power generation.

IRENA, W. 2013. Statistical issues: bioenergy and distributed renewable energy. New York, USA.

Jafari, M., Shahsavari, M., & Grabinsky, M. (2021). Drained triaxial compressive shear response of cemented paste backfill (CPB). Rock Mechanics and Rock Engineering, 54 (6), 3309-3325.

Jiang, H.Q., Fall, M., Yilmaz, E., Yang, L., & Ren, L. (2020). Effect of mineral admixtures on flow properties of fresh cemented paste backfill: Assessment of time dependency and thixotropy. Powder Technology, 372, 258-266.

Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P., & Van Woerden, F. (2018). What a waste 2.0: a global snapshot of solid waste management to 2050. World Bank Publications.

Keskin, T., Yilmaz, E., Sari, M., Kasap, T., & Guner, U.G. (2024). A review on reusability, recyclability and circular practices of metallic mine tailings. Minerals.

Khudyakov, A. Y., & Vashchenko, S. V. (2020). Analysis of known dependences and the construction of new compaction equations for the fine-fraction materials of the mining and

metallurgical complex. Refractories and Industrial Ceramics, 60(6), 618-626.

Koohestani, B., Mokhtari, P., Yilmaz, E., Mahdipour, F., & Darban, A. K. (2021). Geopolymerization mechanism of binder-free mine tailings by sodium silicate. Construction and Building Materials, 268, 121217.

Koppejan, J. and Van Loo, S. (2012) The handbook of biomass combustion and co-firing. Routledge.

Koohestani, B., Darban, A. K., Darezereshki, E., Mokhtari, P., Yilmaz, E., & Yilmaz, E. (2018). The influence of sodium and sulfate ions on total solidification and encapsulation potential of iron-rich acid mine drainage in silica gel. Journal of Environmental Chemical Engineering, 6(2), 3520-3527.

Kou, Y., Jiang, H., Ren, L., Yilmaz, E., & Li, Y. (2020). Rheological properties of cemented paste backfill with alkali-activated slag. Minerals, 10(3), 288.

Landriault, D. (2001). Backfill in underground mining. Underground mining methods: engineering fundamentals and international case studies, 601-614.

Li, X., Bai, C., Qiao, Y., Wang, X., Yang, K., & Colombo, P. (2022a). Preparation, properties and applications of fly ash-based porous geopolymers: A review. Journal of cleaner production, 359, 132043

Libos, I., Cui, L., & Liu, X. (2021). Effect of curing temperature on time-dependent shear behavior and properties of polypropylene fiber-reinforced cemented paste backfill. Construction and Building Materials, 311, 125302.

Lu, H., Qi, C., Chen, Q., Gan, D., Xue, Z., & Hu, Y. (2018). A new procedure for recycling waste tailings as cemented paste

backfill to underground stopes and open pits. Journal of Cleaner Production, 188, 601-612.

Mangane, M. B. C., Argane, R., Trauchessec, R., Lecomte, A., & Benzaazoua, M. (2018). Influence of superplasticizers on mechanical properties and workability of cemented paste backfill. Minerals Engineering, 116, 3-14.

Mbonimpa, M., Kwizera, P., & Belem, T. (2019). Mine backfilling in the permafrost, part II: effect of declining curing temperature on the short-term unconfined compressive strength of cemented paste backfills. Minerals 9 (3), 172.

Mehdipour, I., & Khayat, K. H. (2018). Understanding the role of particle packing characteristics in rheo-physical properties of cementitious suspensions: A literature review. Construction and Building Materials, 161, 340-353.

Mishra, D. P., & Das, S. K. (2010). A study of physico-chemical and mineralogical properties of Talcher coal fly ash for stowing in underground coal mines. Materials characterization, 61(11), 1252-1259.

Modolo, R. C. E., Ferreira, V. M., Tarelho, L. A., Labrincha, J. A., Senff, L., & Silva, L. (2013). Mortar formulations with bottom ash from biomass combustion. Construction and Building Materials, 45, 275-281.

Munawar, M. A., Khoja, A. H., Naqvi, S. R., Mehran, M. T., Hassan, M., Liaquat, R., & Dawood, U. F. (2021). Challenges and opportunities in biomass ash management and its utilization in novel applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 150, 111451.

Obe, R. K. D., De Brito, J., Lynn, C. J., & Silva, R. V. (2017). Sustainable construction materials: municipal incinerated bottom ash. Woodhead Publishing.

OECD Annual Report, 2007. The Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), Paris, France.

Ouattara, D., Belem, T., Mbonimpa, M., & Yahia, A. (2018). Effect of superplasticizers on the consistency and unconfined compressive strength of cemented paste backfills. Construction and Building Materials, 181, 59-72.

Ouellet, S., Bussière, B., Aubertin, M., & Benzaazoua, M. (2007). Microstructural evolution of cemented paste backfill: Mercury intrusion porosimetry test results. Cement and Concrete Research, 37(12), 1654-1665.

Ouffa, N., Trauchessec, R., Benzaazoua, M., Lecomte, A., & Belem, T. (2022). A methodological approach applied to elaborate alkali-activated binders for mine paste backfills. Cement and Concrete Composites, 127, 104381.

Qi, C., Fourie, A., & Chen, Q. (2018). Neural network and particle swarm optimization for predicting the unconfined compressive strength of cemented paste backfill. Construction and Building Materials, 159, 473-478.

Qi, C., Chen, Q., Fourie, A., & Zhang, Q. (2018). An intelligent modelling framework for mechanical properties of cemented paste backfill. Minerals Engineering, 123, 16-27.

Qin, H., Cao, S., & Yilmaz, E. (2024). Grain-size composition effect on flexural response and pore structure of cementitious tail-rock fills with fiber reinforcement. Developments in the Built Environment, 20, 100558.

Rao, S. M., & Reddy, B. V. (2006). Characterization of Kolar gold field mine tailings for cyanide and acid drainage. Geotechnical & Geological Engineering, 24, 1545-1559.

Ravelet, F., Bakir, F., Khelladi, S., & Rey, R. (2013). Experimental study of hydraulic transport of large particles in

horizontal pipes. Experimental Thermal and Fluid Science, 45, 187-197.

Ravindiran, G., Saravanan, P., Jeyaraju, R. M., & Josephraj, J. (2022). Water—Conventional and novel treatment methods. In Solar-Driven Water Treatment (pp. 37-66). Academic Press.

Roshani, A., & Fall, M. (2020). Rheological properties of cemented paste backfill with nano-silica: Link to curing temperature. Cement and Concrete Composites, 114, 103785.

Saedi, A., Jamshidi-Zanjani, A., & Darban, A. K. (2021). A review of additives used in the cemented paste tailings: Environmental aspects and application. Journal of Environmental Management, 289, 112501.

Sun, X., Zhao, Y., Tian, Y., Wu, P., Guo, Z., Qiu, J., Xing, J, & Xiaowei, G. (2021). Modification of high-volume fly ash cement with metakaolin for its utilization in cemented paste backfill: The effects of metakaolin content and particle size. Powder Technology, 393, 539-549.

Thomas, E., Nantel, J., & Notely, K. (1979). Fill Technology in Underground Metalliferous Mines (International Academic Services, Ed.). Canada: International Academic Services.

Ustabas, I., Erdogdu, S., Omur, I., & Yilmaz, E. (2021). Pozzolanic effect on the hydration heat of cements incorporating fly ash, obsidian, and slag additives. Advances in Civil Engineering, 2021.

Wang, K., & Tester, J. W. (2023). Sustainable management of unavoidable biomass wastes. Green Energy and Resources, 1(1), 100005.

Wang, Z., Wu, A., Wang, S., & Hu, X. (2024). Effect and mechanism of time-dependent and economical expansion materials

in improving the active roof-contact for cemented paste backfill. Construction and Building Materials, 439, 137339.

Wang, X. Q., Wan, W., Yao, Z. L., Gao, R. G., Lu, Z. X., Tang, X. Y., & Fan, B. J. (2023). Study on strength characteristics and thickening characteristics of classified-fine cemented backfill in gold mine. Scientific Reports, 13(1), 8361.

Wu, A., Wang, Y., Wang, H., Yin, S., & Miao, X. (2015). Coupled effects of cement type and water quality on the properties of cemented paste backfill. International Journal of Mineral Processing, 143, 65-71.

Wu, A., Wang, Y., Xiao, B., Wang, J., & Wang, L. (2024). Key theory and technology of cemented paste backfill for green mining of metal mines. Green and Smart Mining Engineering, 1(1), 27-39.

Xu, W., Zhang, Y., Zuo, X., & Hong, M. (2020). Time-dependent rheological and mechanical properties of silica fume modified cemented tailings backfill in low temperature environment. Cement and Concrete Composites, 114, 103804.

Yazici, S., & Arel, H.S. (2012). Effects of fly ash fineness on the mechanical properties of concrete. Sadhana, 37(3), 389-403.

Yilmaz, E., Belem, T., & Benzaazoua, M. (2011). Effect of curing time and binder type on the strength and stress–strain behavior of cemented paste backfill. Engineering Geology, 123(1–2), 45–54. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2011.06.007

Yilmaz, E., Belem, T., & Benzaazoua, M. (2015). Specimen size effect on strength behavior of cemented paste backfills subjected to different placement conditions. Engineering Geology, 185, 52-62.

Zhang, Y., Wang, L., Chen, L., Ma, B., Zhang, Y., Ni, W., & Tsang, D. C. (2021b). Treatment of municipal solid waste

incineration fly ash: State-of-the-art technologies and future perspectives. Journal of Hazardous Materials, 411, 125132.

Zheng, J., Zhu, Y., & Zhao, Z. (2016). Utilization of limestone powder and water-reducing admixture in cemented paste backfill of coarse copper mine tailings. Construction and Building materials, 124, 31-36.

Zhou, N., Zhang, J., Ouyang, S., Deng, X., Dong, C., & Du, E. (2020). Feasibility study and performance optimization of sand-based cemented paste backfill materials. Journal of Cleaner Production, 259, 120798.

BİDGE