

İNŞAATTA DİJİTALLEŞME VE MODERN UYGULAMALAR

Editör
ATILA KUMBASAROĞLU



BİDGE Yayınları

**İNŞAATTA DİJİTALLEŞME VE MODERN
UYGULAMALAR**

Editör: ATİLA KUMBASAROGLU

ISBN: 978-625-372-715-4

1. Baskı

Sayfa Düzeni: Gözde YÜCEL

Yayınlama Tarihi: 2025-06-25

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.

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



ÖNSÖZ

İnşaat sektörü, son yıllarda dijital teknolojilerin etkisiyle önemli bir dönüşüm geçirmekte ve bu dönüşüm süreci, yalnızca tasarım ve uygulama aşamalarında değil; aynı zamanda yönetim, analiz ve sürdürülebilirlik perspektiflerinde de köklü değişiklikler yaratmaktadır. Bu kitap, dijitalleşmenin inşaat mühendisliği üzerindeki etkilerini ele alan yenilikçi çalışmaları bir araya getirerek literatürde önemli bir boşluğu doldurmayı amaçlamaktadır.

Kitapta yer alan bölümler, yapay zekâ destekli yönetim yaklaşımlarından deniz yapılarında sayısal analizlere ve iklim değişikliğine uyum sağlayan esnek üstyapı sistemlerine kadar geniş bir teknik ve tematik çeşitlilik sunmaktadır. Bu kapsamda, bilgi teknolojilerinin proje yönetim süreçlerine entegrasyonu, modelleme teknikleri ve veri temelli karar verme süreçlerine yönelik güncel uygulamalar detaylı biçimde sunulmaktadır.

Modern inşaat uygulamalarının dijitalleşme ekseninde yeniden tanımlandığı günümüzde, bu kitabın araştırmacılar, uygulayıcı mühendisler ve karar vericiler için hem yol gösterici hem de ilham verici bir kaynak olması hedeflenmiştir.

Katkı sunan değerli yazarlara ve emeği geçen tüm bilim insanlarına teşekkür eder, kitabın akademik çevrelere faydalı olmasını temenni ederiz.

Doç. Dr. ATİLA KUMBASAROĞLU

ERZİNCAN BİNALİ YILDIRIM ÜNİVERSİTESİ

İÇİNDEKİLER

ARTIFICIAL INTELLIGENCE FOR SUSTAINABLE AND AUTOMATED CONSTRUCTION MANAGEMENT: EMERGING PARADIGMS AND PRACTICES	1
---	---

CASİM YAZICI

Karayolu Esnek Üstyapılarının İklim Değişikliğine Uyumu	24
---	----

İHSAN GÜZEL

DYNAMIC ANALYSIS OF DOCK PILES UNDER THE EFFECTS OF DIFFERENT SEA WAVES AND SEDIMENT MOVEMENT	52
---	----

MUHAMMET ENSAR YİĞİT, ÜMİT GÖKKUŞ GÖKKUŞ

BÖLÜM 1

ARTIFICIAL INTELLIGENCE FOR SUSTAINABLE AND AUTOMATED CONSTRUCTION MANAGEMENT: EMERGING PARADIGMS AND PRACTICES

CASİM YAZICI¹

Introduction

The construction industry, historically characterized by its reliance on manual processes and reactive decision-making, is undergoing a profound transformation with the integration of Artificial Intelligence (AI). In the face of accelerating urbanization, resource scarcity, and environmental imperatives, construction engineering management must evolve toward smarter, more sustainable systems. AI serves as a catalyst in this shift, facilitating the transition from traditional, fragmented workflows to automated and intelligent operations that prioritize sustainability, efficiency, and resilience (Golkarfard et al., 2025).

The incorporation of AI in construction management enables predictive analytics, process automation, and real-time decision support. These capabilities are particularly vital in managing large-

¹ Ağrı İbrahim Çeçen Üniversitesi, Doğubayazıt Ahmedi Hani Meslek Yüksekokulu, İnşaat Bölümü, Orcid: 0000-0002-2061-4275

scale infrastructure projects that are susceptible to uncertainties in cost, schedule, labor availability, and environmental constraints (Regona et al., 2023). AI models trained on historical and sensor-based data can forecast construction delays, optimize resource allocation, and evaluate carbon emissions during various project phases. These functions are central to achieving the sustainability targets aligned with global frameworks such as the United Nations Sustainable Development Goals (SDGs).

Recent scholarly efforts have emphasized the role of digital ecosystems that combine AI with complementary technologies such as Building Information Modeling (BIM), Internet of Things (IoT), and blockchain. These integrated platforms support lifecycle-based management, data transparency, and stakeholder collaboration. Moreover, the emergence of digital twins as virtual replicas of construction assets allows for the dynamic simulation of construction scenarios, energy performance, and risk factors, thereby enabling proactive management (Zheng et al., 2019).

Despite these advancements, several challenges hinder widespread AI adoption in construction. These include fragmented data environments, lack of standardized protocols, cybersecurity vulnerabilities, and cultural resistance within firms (Dagou and Gurgun, 2024). Addressing these barriers requires a multidisciplinary approach that blends technical innovation with organizational learning, regulatory support, and ethical governance.

This chapter offers a comprehensive examination of AI-driven methodologies and their contribution to automated and sustainable construction engineering management. Drawing from current literature, real-world applications, and emerging digital paradigms, the discussion will explore how AI technologies can enhance operational performance, environmental accountability, and long-term resilience in construction systems.

While the preceding sections provide a comprehensive review of existing applications of artificial intelligence in sustainable construction, there remains a need for a structured framework that organizes these technologies based on their functional role and sustainability impact. To address this gap, the author proposes a conceptual classification that groups AI applications into four core functional domains: Design Optimization, Resource Management, Construction Site Automation, and Post-construction Intelligence.

This proposed framework serves to bridge the connection between technical AI capabilities and sustainability objectives, offering a practical lens for both researchers and practitioners to identify relevant tools and assess their contributions. Table 1 presents an overview of this classification, highlighting specific AI methods, sustainability impacts, and illustrative applications within each domain.

Table 1. Author’s proposed classification of AI applications in sustainable construction.

Functional Domain	AI Method	Sustainability Impact	Example Application
Design Optimization	Generative Design, Machine Learning	Energy efficiency, low-carbon design	AI-driven HVAC configuration
Resource Management	Predictive Analytics	Material efficiency, waste reduction	Procurement forecasting
Construction Site Automation	Computer Vision, Robotics	Safety improvement, time savings	Drone-based site inspection
Post-construction Intelligence	Digital Twins, IoT	Lifecycle performance optimization	Predictive maintenance scheduling

Digital Transformation in Construction Management

Digital transformation in construction management has become an essential enabler of operational efficiency, sustainability, and strategic competitiveness. Traditionally reliant on fragmented

and paper-based workflows, the construction sector is now rapidly adopting digital technologies to manage increasing complexity and to meet pressing environmental and economic demands. Artificial Intelligence (AI) stands at the forefront of this transition, offering powerful capabilities for automation, analytics, and decision-making when integrated with systems such as Building Information Modeling (BIM), Internet of Things (IoT), and cloud platforms (Shyalika and Silva, 2021).

At the core of this transformation is the development of cyber-physical ecosystems, where real-time data from sensors, digital models, and operational records are synthesized to support continuous monitoring and adaptive control. The digital twin paradigm exemplifies this integration, enabling construction professionals to virtually replicate project elements, test various scenarios, and optimize designs and processes before implementation. When enhanced with AI algorithms, digital twins can proactively identify risks, suggest corrective actions, and improve sustainability outcomes throughout the lifecycle of a building or infrastructure system (Zheng et al., 2019).

Moreover, AI-powered platforms are instrumental in streamlining resource allocation, forecasting demand fluctuations, and automating tasks that are repetitive or error-prone. These tools are particularly beneficial for construction scheduling, procurement, and workforce planning, allowing for greater transparency and accountability across supply chains (Dagou and Gurgun, 2024). In parallel, the incorporation of cloud-based collaborative environments promotes stakeholder integration and facilitates real-time communication across geographically distributed teams.

Despite these advancements, full-scale implementation of digital transformation strategies continues to face several challenges. These include the lack of interoperability between software platforms, cybersecurity vulnerabilities, high initial investment

costs, and resistance from industry actors accustomed to conventional methods. Overcoming these barriers requires a holistic strategy that blends technological infrastructure with organizational change management, workforce upskilling, and policy alignment (Zhou et al., 2024).

The future of digital transformation in construction lies in achieving convergence between human intelligence and machine intelligence, in alignment with the values of Industry 5.0. This emerging paradigm not only embraces automation and efficiency but also prioritizes human-centric values such as inclusivity, adaptability, and ethical responsibility. In this context, AI is evolving from a tool of operational enhancement to a co-evolutionary partner in decision-making and sustainable development.

AI Applications in Sustainable Construction

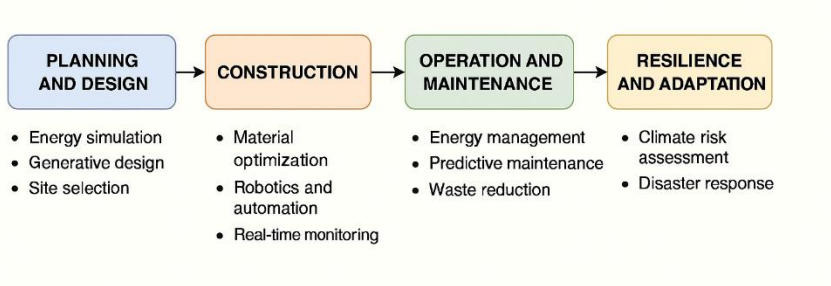
The application of Artificial Intelligence (AI) in sustainable construction practices has introduced transformative capabilities for achieving environmental, economic, and social objectives across the lifecycle of built environments. AI technologies such as machine learning, deep learning, and reinforcement learning are being leveraged to optimize material selection, energy efficiency, structural design, and waste minimization (Dagou and Gurgun, 2024).

Machine learning algorithms have demonstrated efficacy in predicting energy consumption patterns and optimizing heating, ventilation, and air conditioning (HVAC) systems. These systems dynamically adjust performance based on real-time occupancy and climatic data, significantly reducing operational energy demand in buildings. Moreover, AI-driven generative design tools support architects and engineers in exploring thousands of sustainable design alternatives that meet environmental regulations and minimize lifecycle carbon emissions (Zheng et al., 2019).

AI also plays a critical role in construction waste management. By analyzing historical project data and identifying inefficiencies in procurement, storage, and material usage, AI tools can inform circular construction practices and reduce embodied carbon. For instance, computer vision systems integrated with drones are being used to monitor waste generation on-site and suggest corrective interventions.

In the context of sustainable infrastructure, AI contributes to climate-resilient construction by supporting flood modeling, heat vulnerability assessment, and structural adaptation planning. Neural networks and fuzzy logic models, trained on historical climate and geospatial datasets, can forecast climate risks and inform site-specific resilience strategies (Regona et al., 2023). Figure 1 below presents a conceptual model of AI applications across the design, construction, and operation phases of sustainable buildings.

Figure 1. AI integration points across sustainable construction phases



In summary, AI applications in sustainable construction are multifaceted and span from predictive analytics and generative design to carbon tracking and resilience planning. As regulatory pressures and stakeholder expectations intensify, the deployment of AI technologies will continue to grow, necessitating robust data infrastructures, interdisciplinary expertise, and ethical governance frameworks.

Automation and Robotics in Construction Engineering

The integration of automation and robotics into construction engineering has significantly transformed how projects are planned, executed, and managed. As labor shortages, safety demands, and productivity challenges escalate, the construction industry is turning to intelligent automation to enhance precision, accelerate timelines, and improve sustainability outcomes (Davila Delgado et al., 2019). These technologies, when guided by AI-driven control systems, redefine traditional workflows by automating repetitive, hazardous, and high-precision tasks.

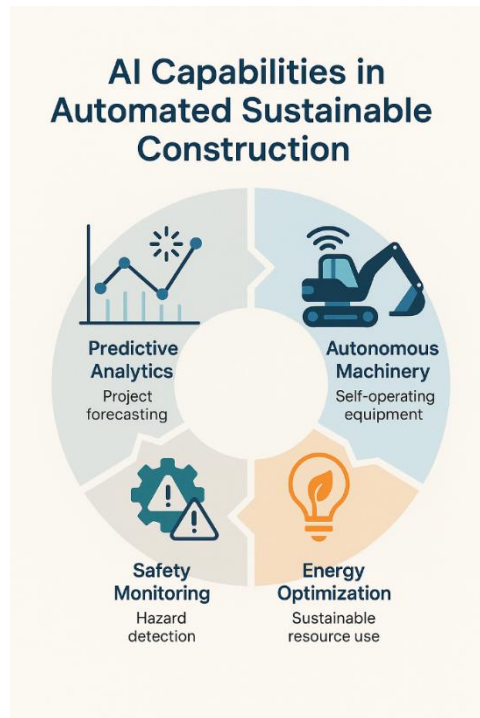
Robotics in construction spans several domains, including bricklaying robots, autonomous excavation machinery, robotic arms for rebar tying, and mobile robotic platforms for inspection. These systems are increasingly being deployed on sites to reduce human error, improve site safety, and ensure consistent quality. For instance, robotic 3D printing technologies allow for the fabrication of complex concrete structures with minimal formwork and material waste, contributing directly to sustainability goals (Shyalika and Silva, 2021).

One of the most impactful developments is the use of autonomous mobile robots equipped with AI-enabled navigation systems. These robots can carry out tasks such as layout marking, progress tracking, and material transport, while continuously adapting to dynamic site conditions through computer vision and sensor data fusion.

Moreover, the integration of robotic systems with Building Information Modeling (BIM) and digital twin platforms enables synchronized execution and real-time feedback loops between the physical site and its digital representation. This synergy facilitates predictive maintenance, automated documentation, and continuous performance optimization. As illustrated in Figure 2, the integration

of robotics and AI technologies can be mapped across all key phases of the construction project lifecycle. During the design phase, AI algorithms aid in generative modeling and performance simulations. In the pre-construction stage, robotic systems can be utilized for layout planning and automated scheduling. Execution phases see the deployment of bricklaying robots, autonomous vehicles, and 3D printing technologies to enhance precision and reduce waste. Finally, in post-construction operations, AI-enabled drones and robotic sensors support real-time inspection, facility monitoring, and predictive maintenance. This holistic automation roadmap demonstrates the increasing reliance on intelligent systems for improving safety, efficiency, and environmental outcomes in modern construction engineering.

Figure 2. Robotic and AI-assisted automation stages across the construction lifecycle, from design to post-construction.



The widespread adoption of robotics in construction is not without its challenges. High initial investment, interoperability concerns, workforce retraining needs, and regulatory gaps continue to act as barriers. Addressing these requires not only technological advancement but also institutional and educational reforms aimed at preparing a hybrid human-machine workforce (Fasoyinu et al., 2025).

In conclusion, AI-guided automation and robotics offer transformative potential for sustainable construction engineering. As these technologies mature, their integration will reshape construction delivery models, making them safer, more efficient, and more environmentally responsible.

Data-Driven Decision Making in AI-Enabled Construction Management

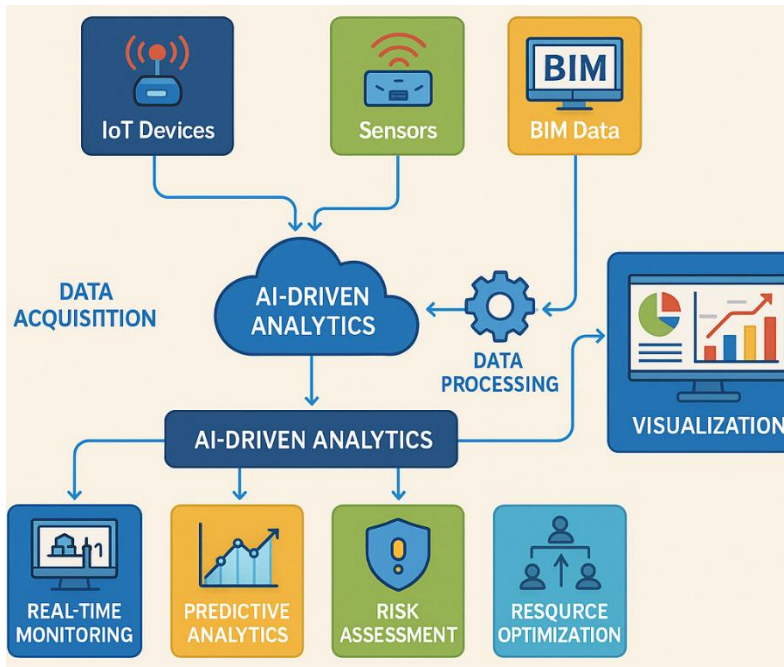
The rise of artificial intelligence in construction management has ushered in an era where data is the cornerstone of informed and strategic decision-making. Traditional construction practices, often reliant on intuition and static reports, are being replaced by dynamic, data-driven frameworks that leverage vast datasets generated across project lifecycles. From design inception to post-occupancy evaluation, AI algorithms analyze sensor data, BIM outputs, weather patterns, supply chain metrics, and workforce information to support proactive and optimized decisions (Soltanmohammadlou et al., 2019).

At the heart of this transformation is the integration of Internet of Things (IoT) devices with AI platforms. IoT sensors embedded in construction equipment, materials, and structures continuously stream data related to environmental conditions, structural stress, equipment performance, and worker safety. These data points are collected in real time, processed through AI models,

and translated into actionable insights that inform scheduling, procurement, and maintenance strategies.

A key advantage of AI-enabled decision support systems (DSS) lies in their predictive capabilities. For example, machine learning models can forecast potential project delays by analyzing historical project durations, workforce fluctuations, and external risk factors. Similarly, predictive models can optimize energy consumption by analyzing site-specific data and proposing operational adjustments before inefficiencies materialize (Grover et al., 2020). Figure 3 illustrates a conceptual model of an AI-driven data flow architecture tailored for construction decision-making environments. The figure outlines how raw data from various sources such as IoT sensors, BIM platforms, and construction equipment is collected, preprocessed, and fed into analytical engines powered by machine learning algorithms. These engines perform real-time analysis and generate insights, which are then visualized through interactive dashboards to support strategic planning, resource allocation, risk management, and operational adjustments. Finally, the model demonstrates how actionable outputs are communicated to decision execution layers, enabling dynamic and data-informed responses throughout the construction lifecycle.

Figure 3. Architecture of AI-driven data flow for real-time and predictive decision-making in construction projects.



However, the increasing reliance on data analytics brings challenges related to data standardization, quality control, and cybersecurity. Construction firms must invest in secure data infrastructure and adopt standardized data protocols to ensure interoperability and integrity. Moreover, ethical concerns surrounding data ownership, consent, and algorithmic transparency must be addressed to foster stakeholder trust (Golkarfard et al., 2025). Ultimately, data-driven decision-making in AI-enabled construction management empowers stakeholders with timely, evidence-based insights. It fosters resilience, adaptability, and sustainability by allowing managers to anticipate disruptions, minimize waste, and align operations with environmental and economic goals.

Challenges and Ethical Considerations in AI-Driven Construction

The integration of artificial intelligence (AI) in construction management presents both groundbreaking opportunities and complex challenges. While AI promises enhanced efficiency, predictive capabilities, and sustainability, its implementation is constrained by technical, organizational, and ethical limitations. Understanding and addressing these challenges is essential for responsible AI adoption in the built environment (Dagou and Gurgun, 2024).

A major technical barrier is the lack of standardized, high-quality data. AI systems require large volumes of structured data for training and validation, yet construction projects are often characterized by fragmented information sources, inconsistent formats, and incomplete records. This undermines model accuracy and generalizability. Furthermore, legacy systems and limited interoperability between digital platforms exacerbate data silos and hinder real-time integration (Zhou et al., 2024).

Another critical concern is the ethical dimension of AI deployment. The opacity of algorithmic decision-making, often referred to as the "black box" problem, raises concerns about accountability and fairness. Decisions related to labor allocation, safety risks, or procurement—if made by AI—must be explainable and traceable to prevent discrimination or error propagation. Algorithmic bias, which may arise from historical data reflecting past inequities, poses a risk of perpetuating unfair practices if not properly mitigated (Bahangulu and Owusu-Berko, 2025).

Moreover, the collection and use of personal or project-sensitive data raise serious questions about privacy and consent. Construction sites increasingly rely on wearable sensors, surveillance systems, and biometric data to monitor safety and

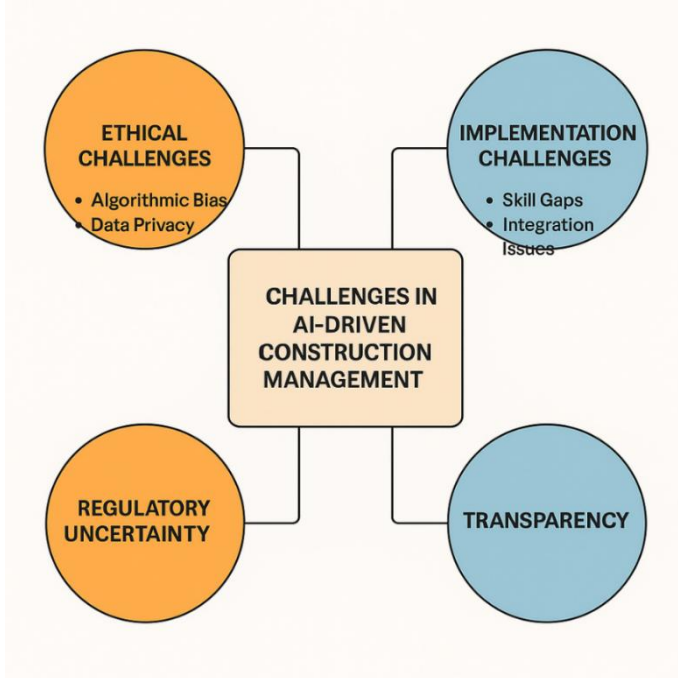
productivity. Without robust data governance frameworks, such surveillance can become intrusive or abusive. Stakeholders must ensure transparency, informed consent, and compliance with data protection regulations (Kalluri, 2022).

In the European context, the General Data Protection Regulation (GDPR) provides a comprehensive legal framework governing the collection, processing, and storage of personal data, which is particularly relevant in AI-enabled construction sites using wearable sensors, biometric access systems, or facial recognition cameras. Non-compliance with GDPR can result in legal penalties and reputational damage, highlighting the necessity of integrating privacy-by-design principles into system architectures. Additionally, professional bodies such as the Chartered Institute of Building (CIOB) and the American Society of Civil Engineers (ASCE) emphasize ethical responsibilities regarding algorithmic transparency, data stewardship, and worker autonomy in their codes of conduct. These guidelines advocate for human oversight, informed consent, and fairness in AI-driven decision-making processes (Venkatraj et al., 2023).

On an organizational level, resistance to change, lack of digital literacy, and fear of job displacement inhibit AI adoption. While AI can augment human capabilities, there is a pressing need to retrain and upskill the workforce to adapt to AI-augmented roles. Regulatory uncertainty also hampers innovation, as many jurisdictions lack comprehensive guidelines for the ethical deployment of AI in construction contexts. Figure 4 summarizes the primary ethical and implementation challenges associated with AI-driven construction management. It categorizes concerns such as data privacy, algorithmic bias, lack of transparency, and accountability in automated decision-making. In addition, it highlights practical barriers including limited digital literacy, organizational resistance, inadequate regulatory frameworks, and the

absence of standardized data governance protocols. By visualizing these interconnected issues, the figure emphasizes the need for responsible AI adoption that aligns with both technological feasibility and ethical imperatives in the construction sector (Huang et al., 2018).

Figure 4. Key ethical and practical implementation challenges associated with AI adoption in construction management.



In response to these challenges, a multidisciplinary approach is necessary. Ethical AI frameworks must be co-developed by engineers, ethicists, policymakers, and industry leaders to ensure inclusivity, transparency, and accountability. Initiatives such as human-in-the-loop architectures, algorithm auditing, and value-sensitive design can help align AI applications with societal values and legal expectations.

Future Trends and Strategic Roadmap for AI in Sustainable Construction

As artificial intelligence (AI) continues to shape the future of the construction industry, emerging technologies are expected to further elevate its role in achieving sustainable and efficient project delivery. The convergence of AI with technologies such as digital twins, edge computing, federated learning, and explainable AI (XAI) signals a paradigm shift in how construction operations will be conceived, executed, and maintained (Yoşumaz, 2025).

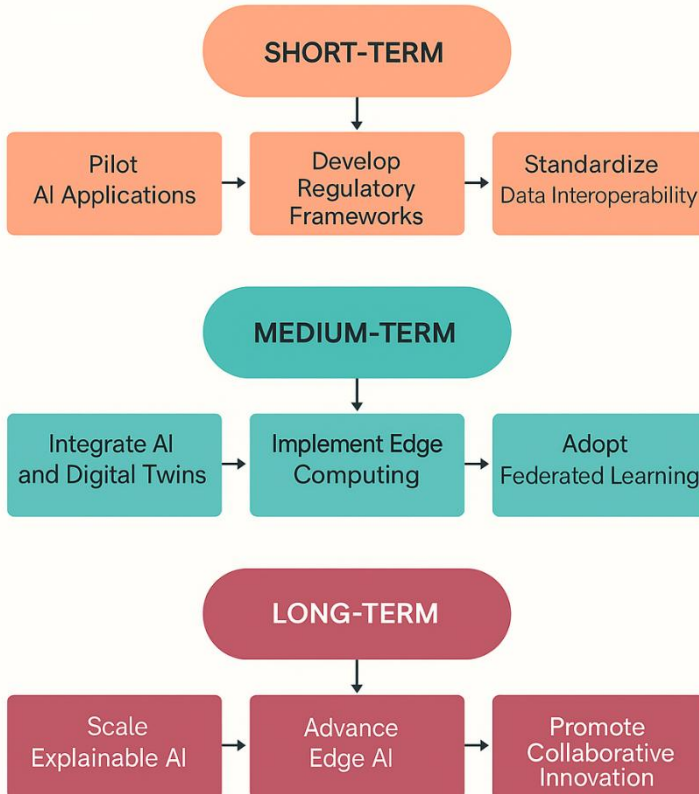
One of the most significant future trends is the rise of AI-integrated digital twin environments. These platforms enable real-time synchronization between physical assets and their virtual counterparts, allowing predictive analytics, autonomous system control, and sustainability assessment throughout the lifecycle of built environments. When combined with AI, digital twins evolve from static models into intelligent agents capable of autonomous decision-making, continuous optimization, and scenario testing for resilience and energy performance (Zheng et al., 2019).

Edge AI is another emerging trend with significant implications for on-site construction intelligence. By enabling decentralized data processing on edge devices—such as drones, wearable sensors, and mobile robots—construction systems can respond rapidly to environmental changes without relying on central cloud infrastructure. This not only reduces latency but also enhances data privacy and operational reliability (Kalluri, 2022).

Federated learning represents a novel approach to collaborative AI model training across multiple organizations or sites without sharing raw data. In construction, where data confidentiality and heterogeneity are major concerns, federated learning enables knowledge sharing and model improvement while preserving data ownership and security (Ivchyk, 2024).

A strategic roadmap for advancing AI in sustainable construction is illustrated in Figure 5, offering a structured view of the key stages, enabling technologies, and institutional drivers that support this transformation. The roadmap delineates a temporal progression, identifying short-term priorities such as pilot project deployment and foundational digital training, medium-term initiatives like platform standardization and workforce adaptation, and long-term goals including autonomous decision-making systems and comprehensive regulatory frameworks. It also underscores the necessity of ethical oversight, cross-sector collaboration, and iterative evaluation to ensure the responsible and effective integration of AI within construction ecosystems.

Figure 5. Strategic roadmap outlining key stages, technologies, and enablers for AI-enabled sustainable construction



To realize this future, coordinated efforts across stakeholders are essential. Governments must enact supportive regulatory frameworks and incentivize innovation. Academic institutions should embed AI and digital construction modules into engineering curricula. Industry leaders must adopt long-term digital transformation strategies and foster collaborative innovation ecosystems. Lastly, continuous investment in explainable AI and transparent governance mechanisms will be critical for maintaining public trust and ethical integrity.

Conclusion and Recommendations

The integration of artificial intelligence into sustainable construction management signifies a pivotal transformation in the planning, execution, and maintenance of the built environment. This evolution reflects a broader paradigm shift—wherein AI is not merely a set of digital tools, but a comprehensive framework reshaping the operational, environmental, and economic dimensions of construction practice.

Throughout this chapter, the multifaceted impact of AI has been explored across all major phases of construction management. From pre-construction planning to post-occupancy operations, intelligent systems have demonstrated the potential to enhance accuracy, reduce waste, improve worker safety, and align construction practices with sustainability objectives. Technologies such as digital twins, real-time analytics, robotics, and autonomous systems are streamlining project delivery, while simultaneously elevating the precision and adaptability of decision-making.

Despite these advances, the transition to AI-enabled construction is accompanied by significant challenges. Fragmented data environments, limited interoperability among digital tools, organizational resistance to technological change, and a lack of digital literacy within the workforce remain critical barriers. Moreover, ethical issues related to privacy, algorithmic transparency, and data governance require urgent attention, particularly as AI systems begin to influence safety protocols, resource allocation, and long-term infrastructure planning.

To ensure that the benefits of AI are realized equitably and responsibly, a strategic and holistic approach is essential. First, regulatory frameworks must be established to provide clear guidance on the ethical deployment of AI in construction. These should encompass standards for data integrity, privacy, and accountability.

Second, investment in digital infrastructure must be prioritized—facilitating the integration of advanced sensing technologies, secure data pipelines, and interoperable platforms that support real-time decision-making. Third, cross-disciplinary collaboration between academia, industry, and policymakers should be encouraged to foster innovation, knowledge sharing, and policy alignment. Fourth, capacity-building initiatives are needed to upskill the construction workforce and prepare them for AI-augmented roles, bridging the gap between technological potential and on-site practicality.

In addition, AI applications in construction must be evaluated not solely based on efficiency metrics, but also through the lens of long-term environmental stewardship, resilience to climate change, and contribution to inclusive development. The future of AI in sustainable construction lies in designing systems that are not only intelligent but also ethical, transparent, and adaptable to the complex socio-technical landscapes in which they operate.

In conclusion, artificial intelligence represents a critical enabler in the evolution of sustainable construction management. Its application extends beyond efficiency gains, offering meaningful advancements in environmental responsibility, resource optimization, and intelligent decision-making. When approached with a human-centered and ethically grounded perspective, AI can contribute to more adaptive and resilient construction ecosystems.

In summary, this chapter has demonstrated that the integration of AI into construction management is not merely a matter of technological advancement but a multidimensional transformation that intersects with ethics, governance, sustainability, and workforce development. A clear understanding of these interconnected domains is essential for maximizing the positive impact of AI while minimizing risks related to equity, privacy, and accountability.

Future research should focus on developing explainable AI (XAI) models tailored to construction-specific decision-making contexts, addressing the “black-box” issue while maintaining predictive accuracy. In addition, longitudinal studies on the socioeconomic impacts of AI adoption in construction, particularly in developing countries, are needed. The role of AI in adaptive design under climate uncertainty, as well as its integration into regulatory compliance systems, also presents promising directions for academic exploration.

The strategic incorporation of these technologies into planning, design, and operational workflows holds the potential to elevate both project outcomes and broader societal goals. In doing so, the construction industry is poised to meet emerging challenges while fostering a built environment that is intelligent, inclusive, and environmentally attuned for future generations. Table 2 summarizes the core findings and practical implications presented throughout this chapter.

Table 2. Summary of core findings and implications from the chapter

Key Finding	Implication
AI enhances sustainability in design, execution, and operations	Encourages adoption of AI across all project phases
Ethical challenges are context-specific and under-regulated	Necessitates sector-specific ethical frameworks
Data quality and standardization remain key obstacles	Investment in interoperable digital infrastructure is essential
Workforce adaptation is critical for long-term success	Requires continuous training and capacity-building programs

References

Golkarfard, A., Sadeghmalakabadi, S., Talebian, S., Basirat, S., & Golchin, N. (2025). Ethical challenges of AI integration in architecture and built environment. *Current Opinion*, 5(2), 1136–1147. <https://doi.org/10.52845/currentopinion.v5i2.363>.

Davila Delgado, J. M., Oyedele, L., Ajayi, A., Akanbi, L., Akinade, O., Bilal, M., & Owolabi, H. (2019). Robotics and automated systems in construction: Understanding industry-specific challenges for adoption. *Journal of Building Engineering*, 26, 100868. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.100868>.

Grover, D., Fallah, Y. P., Zhou, Q., & LaHiff, P. E. I. (2020). Data-driven modeling and optimization of building energy consumption: A case study. In 2020 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM) (pp. 1–5). IEEE. <https://doi.org/10.1109/PESGM41954.2020.9281663>.

Bahangulu, J. K., & Owusu-Berko, L. (2025). Algorithmic bias, data ethics, and governance: Ensuring fairness, transparency and compliance in AI-powered business analytics applications. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 25(2), 1746–1763. <https://doi.org/10.30574/wjarr.2025.25.2.0571>.

Dagou, H. H., & Gurgun, A. P. (2024). Blockchain and AI for sustainable supply chain management in construction. In C. Kahraman, S. Cevik Onar, S. Cebi, B. Oztaysi, A. C. Tolga, & I. Ucal Sari (Eds.), *Intelligent and fuzzy systems: INFUS 2024 (Lecture Notes in Networks and Systems, Vol. 1090)*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-67192-0_41.

Yoşumaz, İ. (2025). Digital transformation process in the construction sector and the role of artificial intelligence. *International Journal of Management and Data Analytics*, 5(1), 217–230. <https://doi.org/10.5281/zenodo.17095041>.

Shyalika, C., & Silva, T. (2021, January). Reinforcement learning based an integrated approach for uncertainty scheduling in adaptive environments using MARL. In 2021 6th International Conference on Inventive Computation Technologies (ICICT) (pp. 1204–1211). IEEE.
<https://doi.org/10.1109/ICICT50816.2021.9358727>.

Venkatraj, V., Dixit, M. K., Yan, W., Caffey, S., Sideris, P., & Aryal, A. (2023). Toward the application of a machine learning framework for building life cycle energy assessment. *Energy and Buildings*, 297, 113444.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113444>.

Zhou, F., Yu, K., Xie, W., Lyu, J., Zheng, Z., & Zhou, S. (2024). Digital twin-enabled smart maritime logistics management in the context of Industry 5.0. *IEEE Access*, 12, 10920–10931.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3354838>.

Zheng, Y., Yang, S., & Cheng, H. (2019). An application framework of digital twin and its case study. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 10, 1141–1153.
<https://doi.org/10.1007/s12652-018-0911-3>.

Regona, M., Yigitcanlar, T., Hon, C. K. H., & Teo, M. (2023). Mapping two decades of AI in construction research: A scientometric analysis from the sustainability and construction phases lenses. *Buildings*, 13(9), 2346. <https://doi.org/10.3390/buildings13092346>.

Soltanmohammadlou, N., Sadeghi, S., Hon, C. K. H., & Mokhtarpour-Khanghah, F. (2019). Real-time locating systems and safety in construction sites: A literature review. *Safety Science*, 117, 229–242. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.04.025>.

Fasoyinu, A. A., Azhar, S., Sattineni, A., & Toyin, J. O. (2025). Wearable sensing devices for construction safety: Research trends, applications, challenges, and future opportunities.

Automation in Construction, 179, 106424.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2025.106424>.

Kalluri, K. (2022). Federate machine learning: A secure paradigm for collaborative AI in privacy-sensitive domains. *International Journal on Science and Technology*, 13(4), 1–13.
<https://doi.org/10.5281/zenodo.14551746>.

Ivchyk, V. (2024). Overcoming barriers to artificial intelligence adoption. *Three Seas Economic Journal*, 5(4), 14–20.
<https://doi.org/10.30525/2661-5150/2024-4-3>.

Huang, H.-w., Li, Q.-t., & Zhang, D.-m. (2018). Deep learning based image recognition for crack and leakage defects of metro shield tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 77, 166–176. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2018.04.002>.

BÖLÜM 2

KARAYOLU ESNEK ÜSTYAPILARININ İKLİM DEĞİŞİKLİĞİNE UYUMU

İHSAN GÜZEL¹

Giriş

Bölüm Sanayi devriminin başladığı 1750'li yıllardan itibaren gelişen sanayileşme ve endüstrileşme İkinci dünya savaşından sonra 1950'li yıllardan itibaren ekonomik faaliyetleri artırmıştır. Toplumların iktisadi büyüme ve kalkınması bakımından önemli olan ekonomik faaliyetlerin temelini oluşturan sınır tanımayan insan isteklerine bağlı artan ihtiyaçlarının karşılaması için yapılan üretimlerden dolayı fosil yakıt kullanımında, ormansızlaşma, şehirleşmede artış ve arazi kullanımında değişiklikler atmosferde yaklaşık %0,07 oranındaki doğal sera etkisi yapan gazları artırması küresel ısınmaya neden olmuştur.

Küresel ısınmanın doğal iklim değişkenliği ile iklimi değiştirmesi, bugünkü ve gelecek nesiller için önemli olan sürdürülebilir kalkınmanın geri dönülemez özeliğine sahip olan çevre boyutunu etkilemeye devam etmektedir. Çevre değişiminin sürdürülebilir kalkınmanın ekonomik sosyal boyutlarıyla etkileşimi ekonomik ve

¹ Doktor Öğretim. Üyesi, Bingöl Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0002-9153-8644, iguzel@bingol.edu.tr

sosyal sorunlar ortaya çıkarması sera gazlarının azaltılması için uluslararası protokol ve anlaşmalar yürürlüğe konulmaya çalışılmıştır.

İnsan faaliyetlerinden kaynaklanan sera gazı artışlarının iklim değişikliği üzerindeki etkisini azaltabilmek için uluslararası alandaki ilk girişim olan Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (United Nations Framework Convention on Climate Change: UNFCCC) 1995 yılında kabul edilmiştir. Bu sözleşmenin ilk uygulama anlaşması olan Kyoto Protokolü ile 2005-2020 yılları arasında sera gazı emisyonlarını 1990 yılı seviyelerinin altında olması hedeflenmiştir (Şanlı, Bayrakdar &, İnce kara, 2017: 205-212).

2020 yılı sonrası için ise 2016 yılında yürürlüğe giren Paris Anlaşmasıyla ilk defa tüm ülkeler sera gazlarını azaltmayı taahhüt etmişlerdir. Bu anlaşma UNFCCC ile karşılaştırıldığında tüm ülkelerin katkılarına dayanacak bir sistemle sera gazı emisyonlarının yol açtığı küresel sıcaklıktaki artışı, Sanayi Devrimi'nden öncesi sıcaklığın 20C altında tutmak ve hatta bunu 1,5°C ile sınırlamak olarak hedeflenmiştir (Demirtürk, 2021:1087). Bu anlaşmada ana faaliyetler sera gazlarını azaltım, uyum, finans, teknolojik gelişme ve transfer, eylem geliştirme, eylem ve desteğin şeffaflığıdır (Beşbalı, 2023:500-517).

Sera gazı emisyonlarının azaltılması kadar önemli olan uyum faaliyetleri iklim değişikliğinin etkileye bilirlğine bağlı olarak tarım, gıda, su, halk sağlığı, turizm, afet, sigorta, altyapı, biyolojik çeşitlilik ve ekosistem, enerji, finans, kentleşme, ulaşım, sanayi, göç, sosyal kalkınma gibi, birçok alanda karar vermeyi bütünleşmiş ele alan strateji ve politikaları güçlendirilmesi ve uygulanmasını kapsayan dinamik bir süreç olup; tüm dünyada önemini artırmaya başlamıştır.

Ekonomik ve sosyal kalkınmanın gelişmesine katkı sağlayan en önemli hizmet sektörlerinden biri olan karayolu ulaşımının rijit, esnek ve kompozit olarak tasarlanan üst yapıları; küresel ısınmanın kısa sürede iklim elemanlarında meydana getirdiği değişimden en fazla etkilenen kısımlarıdır. Üst yapı performansı diğer sektör alanlarını dolaylı veya dolaysız etkilediğinden uyum ve azaltım faaliyetleri kapsamında değerlendirmesini öne çıkarıştır.

Dünya genelinde yaygın olarak inşa edilen esnek üst yapıların kaplamalarında bağlayıcı olarak viskoz elastik malzeme olan bitümle, alttemel, temel, üst yapı taban tabaklarının bağlayıcısız tasarlanması bu üst yapıların küresel ısınmanın kısa süreler içerisinde hava olaylarında yaptığı değişimden daha fazla etkilenmesine neden olmaktadır.

Bölgelere göre farklılık gösteren hava olaylarında değişim esnek üst yapılarda teker izinde oturma deformasyonunu, yorulma ve termal çatlama bozulma oranlarında farklı artışlara neden olmaktadır. ABD'nin farklı bölge koşullarında 2017-2037 yılları arası iklim değişiminin tekerlek izinde oturmaya %9 ile %40, yorulma çatlaklarını ise 2 ile %9 arasında artıracığı (Almeida & Santos, 2022:3), Çin Cumhuriyeti genelinde 1,5 0C sıcaklık artışının %19,2 0C sıcaklık artışının %37 tekerlek izinde oturma artışına neden olacağı tahmin edilmiştir (Liu & ark., 2023:3). Çin Cumhuriyetinde yapılan diğer bir çalışmada ise 1992-2019 yılları arasında sıcaklık değişiminin esnek üst yapı kaplamalarında kalıcı deformasyonları %20,70 artırdığı belirlenmiştir (Miao, Sheng & Ye., 2022:6).

Esnek üst yapılarda bozulma artışları yaşam döngü maliyet analizlerini ve üst yapı yönetim sistemini etkileyerek ek bütçelendirmelere neden olacaktır. ABD genelinde uygulanan iklim değişimi senaryosu çalışmasına göre 2050 yılında esnek üst yapı bakım maliyetlerinde 28 milyar dolar ek artış olacağı tahmin edilmektedir (Yang & ark., 2024:2).

Küresel ısınmanın iklim sisteminde yaptığı değişiklik uzun süre süreceği ve 21 yüzyılda daha fazla etkisini göstereceği tahmin edildiğinden esnek üst yapıların sera gazı emisyonlarının azaltılması ve iklim değişimine uyumu dikkate alınarak projelendirilmesi sürdürülebilir kalkınmaya katkı sağlayacaktır.

İklim Değişikliğine Genel Bakış

İklim sistemi biyosfer, hidrosfer, litosfer, kriyosfer ve atmosfer olmak üzere beş ana bileşenden meydana gelir. Bu bileşenlerin zaman içerisinde kendi iç dinamikleri ve dış etmenlerdeki değişimlere bağlı olarak yavaş yavaş değişimi onlarca, yüzerce ve binlerce yıllık farklı döngülerde iklimin soğuması, ısınması dönemleri olarak görülmüştür. İklim sisteminde değişim iklim değişkenliği ve iklim değişikliği kavramlarıyla açıklanmıştır (Türkeş, 2008:30).

İklim sistemi, Yerkürenin yaklaşık 4.5 milyar yıllık tarihi boyunca milyonlarca yıldan on yıllara kadar tüm zaman ölçeklerinde değişim eğilimi göstermiştir. İnsan faktörünün bulunmadığı bu süreç iklim değişkenliği kavramıyla ifade edilmektedir (Başoğlu, 2014:177). Jeomorfolojik ve klimatolojik olarak iyi bilinen en son ve en önemli doğal iklim değişkenliği 4. zamandaki (Kuvaterner) buzul ve buzul arası dönemlerde oluşmuştur. Jeolojik devirlerdeki iklim değişiklikleri, özellikle buzul hareketleri ve deniz seviyesindeki değişimler yoluyla yalnızca dünya coğrafyasını değiştirmekle kalmamış, çevreyle ilgili sistemlerde de kalıcı değişiklikler oluşturmuştur (Türkeş, Sümer & Çetimer, 2000:10).

İklim değişikliği ise, karşılaştırılabilir bir zaman diliminde (Dünya Meteoroloji Örgütü'ne göre ortalama 30 yıl kabul edilmektedir). Gözlenen iklimin doğal değişkenliğine ilaveten, doğrudan ya da dolaylı bir şekilde atmosferin bileşimini değiştiren insan faaliyetleri sonucu gelen değişimdir (Türkeş, 2008a:32).

Yer kürenin etrafını çepeçevre kuşatan, yeryüzündeki tüm yaşam biçimleri için vazgeçilmez ortam oluşturan atmosfer bileşiminde gazlar hacimsel olarak sabit ve değişken olarak iki ana gruba ayrılmıştır. Sabit gazlar azot (%78,08), oksijen (%20,95) argon (%0,93), neon (%0,0018), kripton (%0,0018), helyum (%0,0005), hidrojen (%0,00006), Xenon (%0,000009) olup; atmosfer içerisinde %99,993 oranındadır. Su buharı (H₂O), karbondioksit (CO₂), metan (CH₄), karbonmonoksit (CO), kükürtdioksit (SO₂), azot dioksit (NO₂), diazot monoksit (N₂O), ozon (O₃), kloroflorokarbon (CFCs), partiküller (Duman, aerosoller ve kirleticiler) ise değişken gazlardır. Chapman tarafından atmosferde bulunan gazların yer çekimi etkisiyle kimyasal ve fiziksel özellikleri dikkate alınarak yapılan sınıflamalardan biri olan düşey sıcaklık dağılımına göre atmosfer troposfer, stratosfer, mezosfer, termosfer olarak dört tabakaya ayrılmıştır (Şekil 1). Bu tabakaların kalınlıkları mevsimlere anlık hava olayları ve enlemlere göre değişiklik göstermektedir. Sıcaklığın 1600 OC'ye ulaştığı termosfer tabakası üzerinde bulunan ekzosfer tabakasında az miktarda helyum ve hidrojen atomları bulunmakta olup; üst sınırı ise 10000km olarak kabul edilmektedir. Bu tabakadan sonra sınır olmadığından boşluğa geçiş başlamaktadır (MGM, 2007).

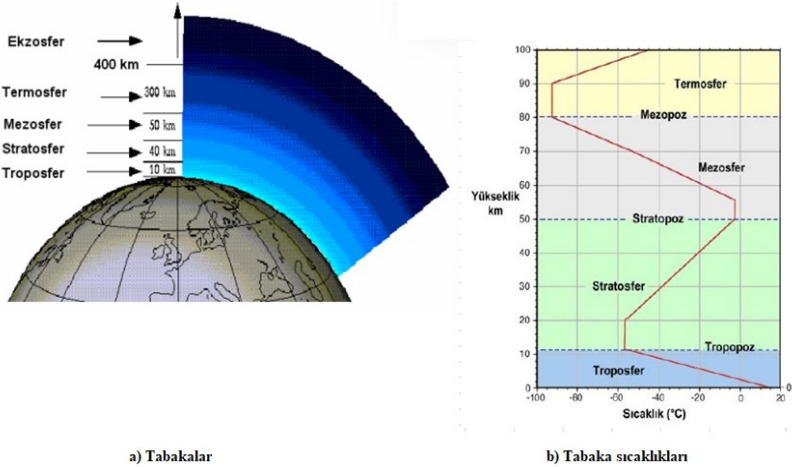
Atmosferi oluşturan gazların kütlesi yaklaşık 5.1 x 10¹⁵ ton olup %75'i troposfer, %24'ü stratosfer tabakasındadır. Hava olayları üzerinde önemli etkisi olan su buharının %99'u gazların 3/4'ü troposfer tabakasında bulunması nedeniyle yer yüzeyini etkileyen ve atmosferde oluşan bütün hava olayları, yatay ve düşey hava hareketleri troposfer tabakasında meydana gelmektedir, Stratosfer tabakasında yatay hava hareketleriyle beraber alt kısımlarında troposferdeki hava olayları oluşabilmektedir (MGM, 2005).

Yerküre atmosfer arasında karbon, azot, oksijen kükürt, su döngüleri, güneş ile yerküre arasında enerji döngüsü atmosfer tabakalarının gaz

bileşeninin ışınları yansıtma, absorbe ve geçirgenlik özelliğiyle ilişkilidir.

Şekil 1 Atmosfer tabakaları ve sıcaklık dağılımı

Ekzosfer teorik olarak atmosferin sınırı yer çekimi ile uzaydaki genel çekimin eşit olduğu alana kadar uzanır 10000km olduğu kabul edilir



İklim sisteminin güç kaynağı olan güneş ışınları kısa dalgalı olarak atmosfere girdikten sonra %31'i atmosfer ve yeryüzümden uzaya yansıtılmaktadır. Geriye kalan ışınların yaklaşık üçte biri atmosfer, üçte ikisi ise iklim sisteminin diğer bileşenlerince absorbe edilmektedir. Isınan yerküreden gelen uzun dalga boylu ışınlar atmosfer tarafından emildikten sonra tekrar yansıtılmasıyla ısı dengesi düzenlenerek sıcaklığın artması süreci doğal sera etkisi olarak adlandırılır (Türkeş, 2003:15). Atmosferde sera etkisi oluşturan gazların en fazlasını %60'ı su buharı %26'sı CO₂, %8'i O₃, %6'lık kısmı ise CH₄ ve N₂O oluşturmaktadır. Bu gazlar kendine gelen ışınların soğurulmasını veya yansıtılmasını sağlayarak yeryüzünün yaşanabilir bir sıcaklıkta tutulmasına yardımcı olmaktadır. Atmosferde bu gazların olmaması durumunda 150C olan yeryüzü sıcaklık ortalamasının 330C daha düşerek -18 oC olacağı tahmin edilmektedir (Akın, 2003:30).

Atmosferin ısınmasını artıran sera gazları doğal ve insan faaliyetleri sonucu oluşmaktadır. İnsan faaliyetlerinden dolayı atmosfere salınan sera gazları 1750’li yıllarda başlayan Sanayi Devrimiyle artmaya başlamış, ikinci dünya savaşından sonra özellikle 1950’li yıllardan itibaren fosil yakıt kullanımı, ormansızlaşma ve şehirleşmede artış, arazi kullanımında değişiklikler, sanayileşme ve endüstrileşmede değişimden dolayı hızlanmıştır. Atmosfere salınan sera gazı emisyonunda yaklaşık %72’lik paya sahip olan CO₂ ve diğer gazların kaynakları Tablo.1’de gösterilmiştir (Erbaş,2022; Edemen & ark, 2022:40).

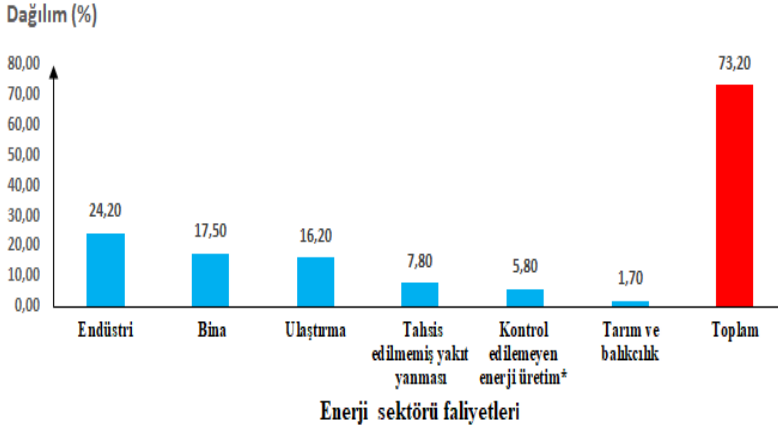
Tablo 1 Küresel sera gazı emisyonları ve kaynakları

Gaz	Kaynak	Sera gazı emisyonunda payı (%)
CO ₂	Elektrik ve ısı üretimi, sanayi, ulaştırma, binalarda fosil yakıtların yanması arazi kullanımı ve ormancılık, okyanuslarda karbon döngüsü	72
CH ₄	Kömür çıkarma, işleme ve taşıma, hayvancılık atık depolama, doğal gaz boru hatlarındaki kaçaklar	19
N ₂ O	Tarımda kullanılan suni gübreler, tropikal ormanların yok olması	6
O ₃	İnsan kaynaklı emisyonların (Azot oksitler, hidrokarbonlar, karbon monoksit vb.) kimyasal değişimlere uğramaları sonucu oluşmaktadır	3
CFC, CO, Hidroflorokarbonlar(HFCs), Perflorokarbonlar(PFCs), Hekzaflorokarbonlar (SF ₆), Nitrojen Triflorit (NF ₃)	Yakıtların iyi yanmaması orman yangınları, alüminyum ve yarı iletken üretimi soğutucu gazlar, yangın söndürücüler, aerosoller, solventler, magnezyum işleme, kesiciler, trafolar yarı iletken üretimi, yarı iletken üretimi, güneş panelleri, düz tv ekranları, dokunmatik ekranlar ve elektronik işlemcilerin üretimi	

Dünya sera gazı emisyonlarının %73,20’si enerji, 18,20’si tarım, ormancılık, %5,20’si endüstri %3,20’si atık sektöründen kaynaklanmaktadır. Atmosfere salınan sera gazı emisyonunda ilk sırada bulunan CO₂ emisyonu enerji ihtiyaçlarının karşılanmasında kullanılan fosil yakıtların etkisi ilk sıradır. Enerji ihtiyacı kaynaklı emisyonların sektörlere dağılımı Şekil 2’de gösterilmiş olup; %16,20 ile üçüncü sırada bulunan ulaştırma sektöründe karayolu

ulaşımında yk ve yolcu taşımacılığı kaynaklı pay ise yaklaşık %75 oranındadır (Akbelen, Bulut & Yaman, 2023:264).

şekil 2 Enerji kaynaklı sera gazı emisyonlarının sektörlere göre dağılımı

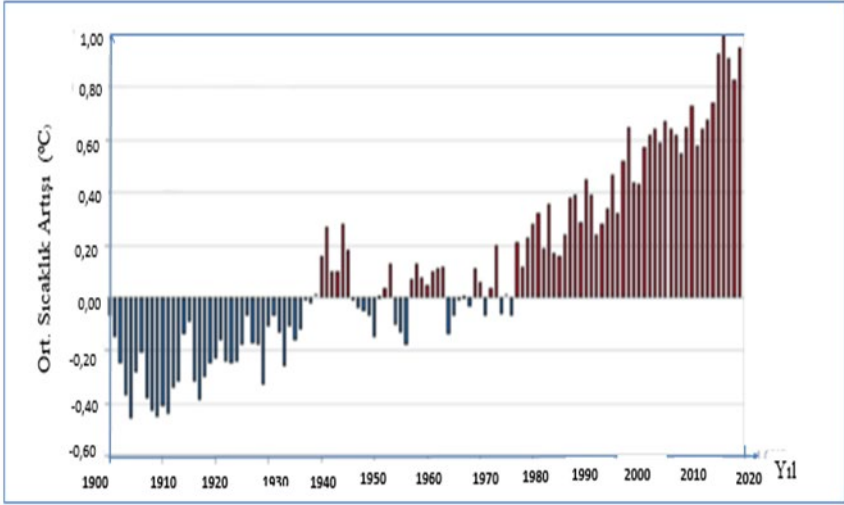


* Bu kategori, biyoktle, tesis içi ısı kaynakları, kombine ısı ve g (CHP), nükleer endüstri ve pompalı hidroelektrik depolama dahil olmak üzere diğer yakıtlardan

Atmosfer bileşeninde %0,07'den daha az bulunan sera gazlarının artışı iklim değişikliğinin sebeplerinden biri olan küresel ısınmaya neden olmaktadır. Birleşmiş Milletler Hkmetler arası İklım Değişikliği Paneli (Intergovernmental Panel on Climate Change:IPCC.) araştırmaları sonucunda 1995 yılında gerçekliği kabul edilen iklim değişikliğini etkileyen küresel ısınma, bir ekonomide iktisadi aktörlerin faaliyetleri neticesinde meydana gelen sera gazlarının atmosferde yoğun bir şekilde artması sonucunda, yeryüzüne yakın atmosfer tabakaları ile yeryüzü sıcaklığının yapay olarak artması olarak tanımlanmıştır.

Ulusal Okyanus ve Atmosfer İdaresi (NOAA) tarafından 1900-2019 yılları arasında okyanus ve kara sıcaklıklarında yaşanan ortalama sıcaklığ göre çizilen sıcaklığ anomali grafiğinde (şekil 3) görüleceği üzere Dünya ortalama sıcaklığ artışları 1980'li yıllardan itibaren hızlanmıştır (Dündar & Kolay, 2021:321).

Şekil 3 Yıllara (1900-2020) göre ortalama sıcaklık artışları



Sanayi devrimi öncesi dönemden günümüze küresel sıcaklıkların 1,10C civarında artış gösterdiği, 2081-2100 yılları arası Sanayi devri öncesine göre değerlendirmelerde başta CO2 ve diğer sera gazı emisyonları dikkate alınarak yapılan en düşük sera gazı senaryosunda 1,40C, orta düzey sera gazı emisyon senaryosunda 2,70C, çok yüksek sera gazı emisyon senaryosunda ise 4,40C ısınmanı artacağı tahmin edilmektedir (IPCC:2023).

Küresel ısınmanın neden olduğu en belirgin olay kutuplardaki ve yüksek dağlardaki buzulların erimesi ve bunun sonucu deniz seviyelerinde yükselme olup; iklimin değişimine etkileri ise;

- Şiddetli yağış ve gün sayısında artış,
- Sel, taşkın
- Sıcak hava dalgası
- Ardışık sıcak gün sayısında artış
- Kuraklık

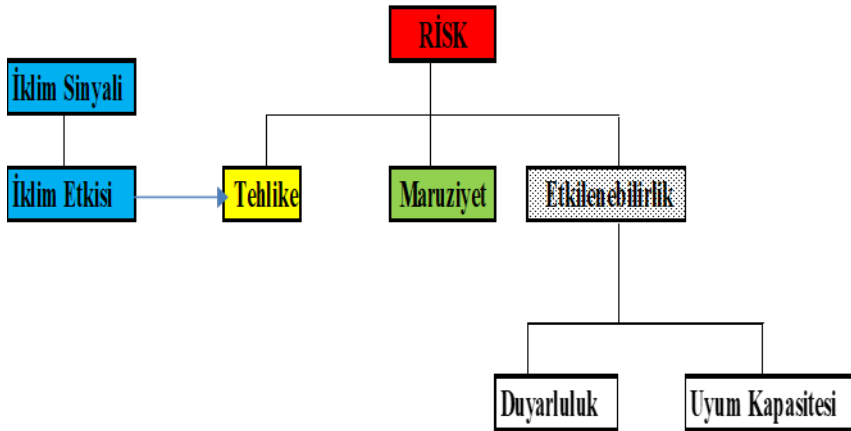
- Yağışlı gün sayısı ve yağış miktarında azalma
- Ardışık kurak gün sayısında artış
- Şiddetli yağış gün sayısında artış olarak gözlenmektedir.

İklim Değişikliğine Uyum

İklim değişikliğinin çevresel kategoride meydana getirdiği tehlikeler risk seviyesini artırarak insanlığı etkilemeye başlamıştır. 2024 yılından itibaren on yıl içerisinde küresel risklerin ilk dördünde bulunan sırasıyla aşırı hava olayları, dünya sistemlerinde kritik değişim, bio-çeşitlilik kaybı ve ekosistem bozulması, doğal kaynak kıtlığı ve onuncu sırada bulunan kirlilik çevresel kategoride risklerdir. Çevresel risklerin en önemli kaynağı olan iklim değişikliği tehlikeleri ekonomik, sosyal ve jeopolitik kategoride riskleri ortaya çıkarmaktadır (WEF 2024:8).

IPCC'nin 5. Değerlendirme Raporu'na göre risk kavramı, tehlike, maruziyet ve etkilenebilirliğin birleşimi olup Şekil 4'te gösterilmiştir (ÇŞİDB: 2023).

Şekil 4 IPCC yaklaşımına göre risk bileşenleri



Tehlike can kaybı, yaralanma veya başka sağlık sorunlarına neden olan, malların zarar görmesine veya yok olmasına yol açabilecek veya geçim kaynaklarına, servis teminine, ekosisteme ve doğal kaynaklara zarar verebilecek iklim değişikliğinden kaynaklı olaydır. Maruziyet bir sistemin iklim değişikliğine maruz kalma niteliği ve derecesi, etkilenebilirlik ise bir sistemin iklim değişikliğinden kaynaklanan iklim değişkenliği ve aşırı olayların olumsuz etkilerine karşı duyarlı olma ve bunlarla baş edememe özelliğidir (Calda&ark, 2022:175).

Etkilenebilirliğin iki temel bileşeninden duyarlılık ise tehlikenin sonuçlarını doğrudan etkileyen faktörler tarafından sistemin fiziksel, mekaniksel, sosyal, ekonomik ve kültürel özellikleriyle ilişkili olarak olumsuz veya olumlu şekilde etkilenme derecesidir. Etkilenebilirliğin diğer bileşeni uyum kapasitesi ise bir sistemin iklim değişikliğine uyum sağlama, etki ve risklere dair potansiyel zararları hafifletme, firsatlardan yararlanma veya sonuçlarla başa çıkma yeteneğidir. Mevcut teknolojik seçenekleri, kaynaklar, kritik kurum ve karar alma otoritelerinin yapısı, insan sermayesi stoku, mülkiyet haklarının tanımı d hil sosyal sermaye stoku, bilgi yönetimi ve karar vericiler tarafından sağlanan bilgilerin güvenilirliği, sistemin risk yayan süreçlere erişimi ve halkın risk ve maruziyet algısı uyum kapasitesinin önemli belirleyicileridir ( şİDB, 2023a).

IPCC'nin 5. Değerlendirme raporuna göre risk, Denklem 1'de, etkilenebilirlik Denklem 2'deki gibi ifade edilmektedir. Etkilenebilirlik ve risk, insan kaynaklı iklim değişikliği, doğal iklim değişkenliği ve sosyo-ekonomik kalkınma gibi çok çeşitli faktörlerden etkilenmektedir. Maruziyet ve etkilenebilirlik artıkça risk artmakta, uyum kapasitesi artıp duyarlık azaldıkça etkilenebilirlik ve risk azalmaktadır.

$$R = T.M.D (1 - UK) \dots \dots (1)$$

$$E = D.(1 - UK) \dots \dots \dots (2)$$

R:Risk, T:Tehlike, M:Maruziyet, D:Duyarlık, UK: Uyum kapasitesi

İklim değişikliğinden kaynaklı riskler tam olarak ortadan kaldırılamadığından riskler duyarlılık ve maruziyetin azaltılması, uyum kapasitesinin artırılması veya riski paylaşmak gibi çeşitli yaklaşımlarla yönetilmektedir.

İklim değişikliğine neden olan faktörler ortadan kaldırılsa bile etkilerinin uzun süreceği göz önüne alındığında iklim değişikliği risklerinin yönetilmesi için azaltım ve uyum faaliyetleri her geçen gün önemini artmaktadır.

Azaltım iklim değişikliğini hızlandıran insan kaynaklı sera gazı emisyonlarının veya olumsuz arazi kullanım uygulamalarının azaltılması yoluyla iklim değişikliğinin hızını ve büyüklüğünü azaltarak tehlikeyi azaltmaya yönelik etkinliklerin tümüdür.

İklim değişikliğine uyum ise iklim risklerinin etkileriyle mücadele etmek, fayda sağlamak ve etkileri yönetebilmek için stratejilerin güçlendirilmesi, geliştirilmesi ve uygulanması sürecidir. Bu süreç toplumların ve ekosistemlerin değişen iklim şartlarıyla baş edebilmelerine yardımcı olmak için gerçekleştirilen eylemler ve alınan önlemleri kapsamaktadır. Genel olarak uyum önlemleri etkilenebilirliği ve bazı durumlarda maruziyet azaltarak riskin azaltılması olup; sistemin uyum kapasitesi ve duyarlılığıyla daha fazla ilişkili önlemlerdir.

İklim değişikliğine uyum çalışmalarında etkilerin belirlenmesi, etkilenebilirlik ve uyum süreçlerinin anlaşılması ve bunlara yönelik değerlendirmelerin yapılması kapsamında ilk olarak uyum ihtiyaçlarının belirlenmesi gerekmektedir. Uyum ihtiyaçları bölgeye, insanlara ve sektörler göre farklılık gösterir. Etkili ve stratejik uyum planlaması yapılabilmesi için iklim değişikliğinin olumsuz

etkilerinden en fazla etkilenecek sistemlerin (yer, topluluk, sektör) hedeflenmesi gerekmektedir.

Uyum değerlendirmesi ulaşılabilirlik, fayda, maliyet, etkililik, verimlilik ve uygulanabilirlik gibi ölçütlerin değerlendirme ve iklim değişikliğine uyum için seçeneklerin tanımlanması çalışmasıdır. Uyum genel olarak proaktif uyum, otonom uyum ve planlı uyum olarak üç farklı kategoride değerlendirilebilmektedir (MGM,2015: 139-140).

Proaktif uyum: Gözlenen iklim değişikliğinin spesifik etkileri ortaya çıkmadan önce hayata geçirilen uyumdur.

Otonom uyum: Bu uyum çeşidi plansızdır ve iklimde, insan veya doğal sistemlerde meydana gelen değişiklikler gözlemlendikten sonra bunlara cevap olarak oluşturulan uyum çeşididir.

Planlı uyum: Belli bir duruma ulaşmak, devam ettirmek ya da geriye döndürmek için gerekli eylemleri içeren, şartların değiştiği ya da değişmek üzere olduğu bilgisine dayanan maksatlı plan, strateji ya da politik kararın sonucu yürütölen uyum süreçleridir.

Uyum kategorilerinin uygulanması ulusal, bölgesele ve yerel ölçekte sürdürölebilir kalkınma hedefleri kapsamında belirlenen iklim senaryolarına göre sektörlerin etkilenebilirlik ve risk analizleri dikkate alınarak değerlendirilir. Sektörlerin risklerden etkilenme düzeyi daha fazla olan kesimlerinin belirlenmesi, uyum eylemleri planlaması açısından önemlidir. Avrupa Birliği iklim değişikliği ile ilgili mevcut uygulamaları ve gelecekteki planlamaların belirlenmesinde uyuma entegrasyonu sağlanması gereken öncelikli sektörler;

- Tarım ve kırsal kalkınma
- Sanayi ve hizmetleri
- Enerji

- Ulaşım
- Sağlık
- Su kaynakları
- İletişim
- Deniz ve balıkçılık
- Ekosistem ve biyolojik çeşitlilik
- Diğer doğal kaynaklar olarak belirlenmiştir.

Bu sektörler arasında ulaşım sektöründe maruziyet ve etkilenebilirlik nedeniyle iklim değişikliğinden kaynaklı riskler artarken; aynı zamanda hizmet sektöründe olması nedeniyle diğer sektörlerin risklerini de etkilemektedir.

Ulaşım modları içerisinde karayolu ulaşım altyapı yatırımları pahalı olduğundan ülkelerin en değerli öz varlıkları olup, bu yapıların mevcut ve gelecekte iklim senaryolarına göre etkilenebilirliğinin ve maruziyetinin azaltarak iklim değişikliğine uyumun artırılması; sürdürülebilir kalkınma için önemlidir.

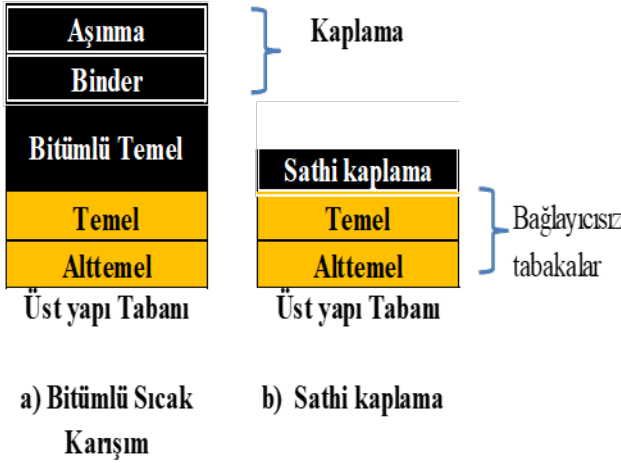
Esnek Üst Yapıların İklim Değişikliğine Uyum

Toplumu ilgilendiren en önemli alt yapı yatırımlarından biri olan karayolu ulaşım yapılarının yüksek maliyetli kısımlarından biri olan üst yapılar genel olarak esnek, rijit ve kompozit olmak üzere üç tipte tasarlanmaktadır. Dünya genelinde yaygın olarak yapılan esnek üstyapılar trafik yükü, çevresel etki ve en önemlisi ülkelerin ekonomik durumuyla ilişkili olarak sathi kaplama ve bitümlü sıcak karışım olmak üzere iki tipte yapılmaktadır. Bitümlü sıcak karışımlar sathi kaplamalara göre daha maliyetli olmasına karşın trafik yükü, çevresel etkilere daha fazla dayanımlı esnek üst yapılardır (Şekil 5).

Bitümlü sıcak karışım ve sathi kaplama üstyapıların aşınma ve sathi kaplama tabakası çevresel ve trafik yükü etkisine en fazla maruz

kalan tabakadır. Bitüm bağlayıcılı aşınma, binder, bitümlü temel ve sathi kaplama tabakaları bitümden dolayı viskoz- elastik davranış göstermesi nedeniyle bağlayıcısız temel ve alt temel tabakalarına göre çevresel koşullar ve trafik yükünden daha fazla etkilenebilme özelliğine sahiptir.

Şekil 5 Esnek üst yapı tipleri



Çevresel etki kapsamında olan iklim değişikliği genel olarak sıcaklık, yağış, donma, çözülme ve deniz seviyesinde değişimler olarak iklim senaryolarında değerlendirilmektedir.

Bu değişimler esnek üstyapıların performans ve trafik güvenliğini etkileyen bozulmalar üzerinde etkisi olan mekanik özelliklerden bitümlü tabakaların dinamik rijitlik ve bağlayıcısız tabakaların esneklik modülünü etkileyecektir. Denklem (3, 4) parametreleri değerlendirildiğinde sırasıyla sıcaklık, yağış ve donma çözülme değişimleri öncelikli olarak dikkate alınması gereken değişimlerdir.

Yoğun gradasyonlu bağlayıcısız tabaka (Üstyapı tabanı, alt temel, temel) tahmini esneklik modülü (KGM, 2008:18).

$$\begin{aligned}
M_R &= 1750 \cdot (D_{BSK} \\
&+ k)^{0,438} \cdot CBR^{0,4} \cdot \left(\frac{1}{1 + \text{Log}(No \ 200)} \right)^{0,35 \cdot (LL \cdot PI + 1)^{0,06}} \cdot \left(\frac{Y_{max}^2}{No \ 4} \right)^{0,09 \cdot \text{Log}(w_{opt})} \quad (3)
\end{aligned}$$

MR: Esneklik modülü (psi), DBSK: Bitümlü sıcak karışımli tabakalarının toplam kalınlığı (cm), k:derinlik düzeltme Faktörü (cm), CBR: Kaliforniya taşıma oranı (%), Ymax: Maksimum kuru birim ağırlık (g/cm3),wopt: Optimum su içeriği (%), No200:200 nolu elekten geçen malzeme yüzdesi, No4:4 Nolu elekten geçen malzeme yüzdesi

Yoğun gradasyonlu bitümlü tabaka (aşınma, binder, bitümlü temel) tahmini dinamik rijitlik modülü (Yousefdoost &ark, 2015:23).

$$\begin{aligned}
\text{Log}|E^*| &= -1.249937 + 0.029232 \cdot \rho_{200} - 0.001767 \cdot (\rho_{200})^2 + 0.002841 \cdot \rho_4 - 0.058097 \cdot V_a \\
&- 0.802208 \left| \frac{V_{beff}}{V_{beff} + V_a} \right| \\
&+ \frac{3.871977 - 0.0021 \cdot \rho_4 + 0.003959 \cdot \rho_{38} - 0.000017 \cdot (\rho_{38})^2 + 0.00547 \cdot \rho_{34}}{1 + e^{(-0.603313 - 0.313551 \text{Log}(f) - 0.593532 \text{Log}(\eta))}} \quad (4)
\end{aligned}$$

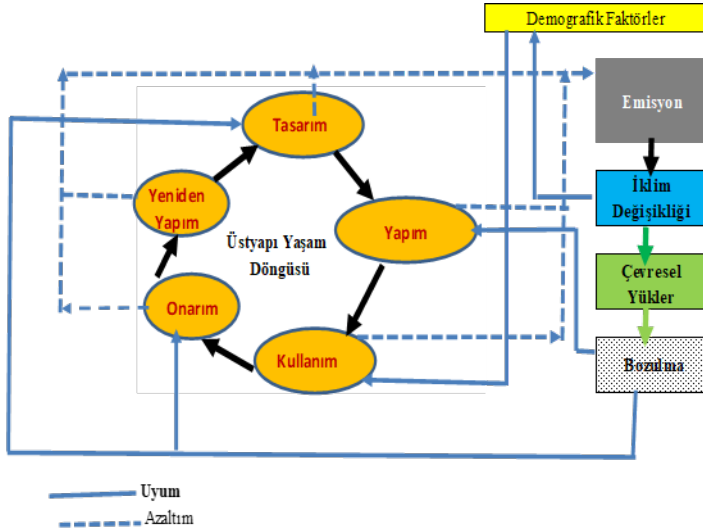
E*:Dinamik rijitlik modülü (psi), η:Bitümün viskozitesi (10⁶ Poise)
f: yükleme frekansı, V_a: Hava boşluğu %,V_{beff}: Hacimsel olarak efektif bitim %, , ρ₄, ρ₃₈, ρ₃₄ No4,3/8”, 3/4” elekler üzerinde % kalan, ρ₂₀₀: No 200 elekten geçen %

Sıcaklık artışı, yağış miktarları ve donma çözülme sayılarında artış üst yapılarda teker izi, ondülasyon deformasyonlarını yorulma, enine, blok, kenar çatlağı bozulmalarını ve kayma direncinin azaltılmasını hızlandırarak servis kabiliyetini ve hizmet süresini azaltarak trafik güvenliği ve ekonomik kayıp risklerini artırarak, karayolu ulaşımının ilişkili sektörlerin risklerini de etkileyecektir

İklim değişikliğine bağlı bu risklerin azaltılması için sürdürülebilir kalkınmada dikkate alınarak uyum ve azaltım önlemlerinin uygulanması ve bu önlemler arasında etkileşimin değerlendirilmesini gereklilik haline getirmiştir. Üst yapıların yaşam

döngüsünün iklim değişikliği ile etkileşiminde uyum ve azaltım önlemleri Şekil 6'da gösterilmiştir. İklim değişikliği esnek üst yapılarda bozulmalarda direkt etkileri olmakla birlikte demografik yapıda değişim faktörlerinin (göç, nüfus artışı vb.) trafik yükünde artışları dolaylı yünden bozulma hızını artırmaktadır (Qiao & ark, 2020:1060).

Şekil 6 Yol üst yapı yaşam döngüsü ve iklim değişikliği etkileşimi



Rijit, kompozit üst yapılarda olduğu gibi esnek üst yapılarda uyum önlemleriyle üstyapı dayanaklığını, performansını, trafik güvenliğini artırmak ve iklim değişiminden fayda, azaltım önlemlerinde ise sera gazı emisyonlarını en aza indirilmesi ve kaplama yüzeylerinde ısı depolamasının azaltılması sağlanarak iklim değişikliği etkileri hafifletmek hedeflenmektedir,

İklim değişiminden kaynaklı bozulmaların önlenmesi veya şiddeti ve yoğunluğunun azaltılması uyum çalışmaları üstyapı yaşam döngüsünün yapım, onarım, tasarım aşamalarını, demografik yapı değişiminden kaynaklı trafik artış ve azalışlarına uyum ise yaşam döngüsünün kullanım aşamasını kapsamaktadır. İklim değişikliğine

neden olan sera gazı emisyonlarının azaltılması ise üstyapı yaşam döngüsünün tüm bileşenlerini kapsamaktadır.

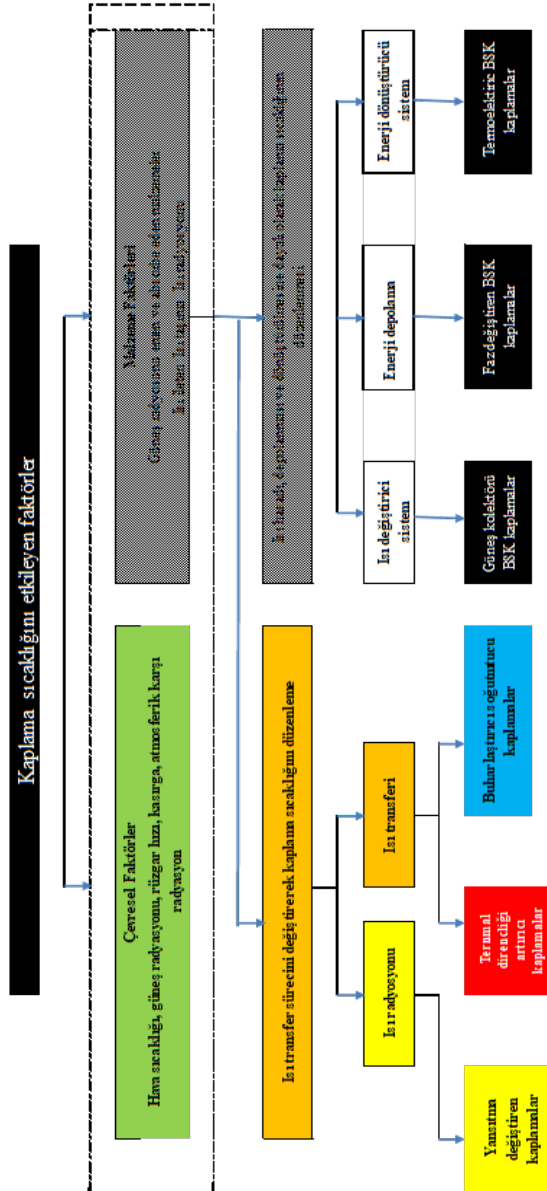
Üstyapı yaşam döngüsünün tasarım bileşeni iklim değişikliğine uyum ve azaltım strateji ve politikalarının belirlenmesinde en önemli aşama olup; yaşam döngüsün diğer bileşenlerini ve yaşam döngü maliyet analizini etkilemektedir.

Tasarımda trafik yükü ve çevre etkilerine en fazla maruz kalan üstyapı kaplamasının iklim değişimine uyumu ve iklim değişiminin tabakada etkilerini azaltılması için proje süresinde iklim senaryoları dikkate alınarak kaplama tipi belirlenir. Kaplama tipi geleneksel yoğun gradasyonlu karışımli kaplama ve düzenlemeleri (Bitüm, karışım modifikasyonu, gradasyon, soyulma önleyici katkı vb.) veya bu kaplamaya alternatif olan geçirgen, soğuk (Albedo katsayısını yüksek kaplamalar), su tutmayan buz çözücü, ısıya az duyarlı ve tuza dayanıklı kaplamaların avantaj ve dezavantajları değerlendirilir.

Esnek üstyapı kaplamaları etkilenebilirlik ve maruziyet özelliklerinden dolayı iklim değişikliğinin sıcaklık artışlarından en fazla etkilenen tabakalardır. Bu tabakaların sıcaklığını etkileyen faktörler çevresel ve malzeme faktörleridir (Şekil 7). Malzeme faktörleriyle ilişkili güneş kolektörü, faz değiştiren ve termoelektrik kaplamalarda ısı hasadı ısı depolanması ve ısı dönüşümüyle sıcaklığı düzenleyen sıcaklık artışlarını fırsata çevirerek enerji üretilmesini sağlanmaktadır. Bu kaplamaların yüksek teknoloji gerektirmesi, yapım ve işletme maliyetlerinin yüksek olması uygulanabilirliğini sınırlandırmaktadır (Gong & ark, 2022:10).

Çevresel faktörlerin kaplama sıcaklığı üzerinde etkilerini ısı transferi ve ısı radyasyonuyla kaplama sıcaklığını azaltan yansıtma değiştirici, termal direnci artırıcı, buharlaştırıcı ve soğutucu kaplamalar malzeme faktörleriyle ilişkili kaplamalara göre uygulanabilirliği daha fazla yapım bakım ve işletme maliyetleri daha az olup; aşağıda kısaca açıklanmıştır.

Şekil 7 Kaplama sıcaklığını etkileyen faktörlere göre kaplama tipleri



Yansıtma değiştirici kaplamalar: Kaplama karışımları ısıyı yansıtan baz polimer (Akrilik, epoksi, poliamid, poliftalamin reğineleri vb.), katkı (incelticiler, ıslatıcı dağıtıcılar, köpük gidericiler, akış ajanları vb.) ve pigment (demiroksit sarısı, yeşili, kırmızısı, grisi, nikeloksit siyahı, titanyumdioksit beyazı) malzemelerin, içermektedir. Yansıtma, pigmentin ve baz polimerin performansı ile yakından ilişkilidir. Titanyumdioksit beyazı ve demiroksit sarısı en iyi yansıtıcı pigmentlerdir. Bu karışımlarla yaz aylarında kaplama sıcaklıkları 200C'ye kadar dūřürülebilmektedir.

Termal dirençliği artırıcı kaplamalar: Kaplamaların termal direnci, dūřük termal iletkenliğe sahip malzemeler (řist, mineral tozu, , uçucu kül gözenekli ince agrega) kullanılması ve karışımlarda boşluk yüzdesinin artırılması için karışım gradasyonu değiştirilerek sağlanmaktadır.

Buharlaştırıcı ve soğutucu kaplamalar: Kaplama sıcaklığının azaltılması için geçirgen kaplamanın boşluk özelliklerinden yararlanılarak su ile kaplama sıcaklığı azaltılmaktadır. Suyun belli bir süre sonra buharlaşması sonucu kaplama sıcaklığının artması ve su ihtiyacının fazla olması nedeniyle geçirgen kaplamalara su emebilen ve su tutan uçucu kül, kalsiyum hidroksit içeren harçlar veya su emilimi yüksek polimer harçlar enjekte edilmesi ile soğutmanın sağlandığı kaplamalardır.

Kaplama tipi belirlendikten sonra esnek üstyapı tabakalarının tasarımı karışım tasarımları ve üstyapı tabaka kalınlık tasarımı olarak iki kısımda değerlendirilmektedir.

Esnek üst yapılar da bitümlü tabakaların karışım tasarımında genel olarak Marshall ve Süperpave yöntemler uygulanmaktadır. Marshall yöntemi laboratuvar donanım sayısının azlığı ve temin ucuzluğu, deney süresinin kısalığı ve bitüm miktarının Süperpave yöntemi bitüm miktarına çok yakın tespit edilmesi nedeniyle dünya genelinde daha fazla uygulanan karışım tasarım yöntemi olmasına karşın

Süperpave yöntemi iklim değişikliği etkilerini ve kalıcı deformasyon değerlendirilmesine daha fazla olanak sağlamaktadır.

Bağlayıcısı tabalarda ise genel olarak CBR, gradasyon, Proktor, Atterberg limitleri (LL, PI), kaba agrega su emme yüzdesi , donma ve çözülme, organik madde, metilen mavisi deney sonuçları değerlendirilerek tabaka analizlerinde kullanılacak girdiler tespit edilir.

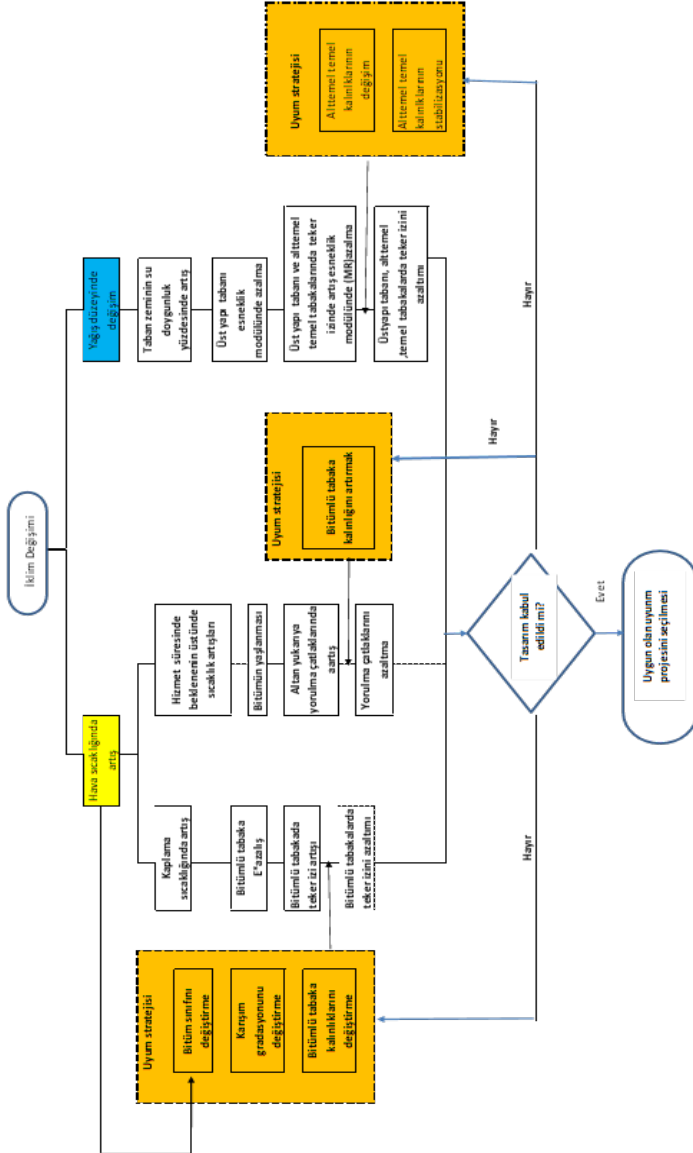
Üstyapı tabaka kalınlıkları ampirik, mekanistik ve mekanistik-ampirik yöntemlerle analiz edilmektedir. İklim senaryolarını, tabaka karışımlarının daha fazla mekanik özelliklerini ve üstyapı bozulmalarını değerlendiren yöntemler ise mekanistik-ampirik tasarım yöntemleridir.

İklim değişikliğinden dolayı artan sıcaklıklar bitümlü tabalarda bitümü yaşlandırarak tabakaların esnekliğini azaltılması yorulma çatlaklarını ve teker izi deformasyonlarını artırmaktadır. Ayrıca artan yağışın nem koşullarını değiştirmesi kaplamalarda agrega sökülmesi ayrışmalara, bağlayıcısız tabakalarda ise deformasyonlara neden olmaktadır.

Esnek üstyapılarda iklim değişikliğinden dolayı hızlanan yorulma çatlakları ve teker izinde oturma deformasyonları yol kullanıcı, işletme maliyetlerini ve hizmet ömrünü etkilemesi iklim senaryolarına göre uyum stratejilerinin belirlenmesini gerekli hale getirmiştir.

Dünya genelinde ekonomikliği ve uygulanabilirliği kolay olması nedeniyle yaygın olarak yapımı gerçekleştirilen yoğun gradasyon karışımı esnek üstyapı tabakalarında sıcaklık artışı ve yağış değişimine bağlı olarak teker izinde oturma ve yorulma çatlaklarının etkilerinin azaltılması uyum stratejisi akış şeması Şekil 8’de gösterilmiştir (Swarna & ark, 2022:137).

Şekil 8 Esnek üstyapılarda bozulma nedenine bağlı olarak çeşitli uyum stratejileri



Yoğun gradasyon karışımı bitümlü sıcak karışım kaplamalı esnek üstyapıların iklim değişiminden dolayı yorulma çatlağı, teker izinde oturma deformasyonu hızlarının azaltılması için bitümlü tabakalarda bitüm sınıfı, kalınlık ve gradasyon değişimi, bağlayıcısız tabalarda ise kalınlık artışı ve stabilizasyonlu karışım değerlendirmeleri öne çıkan uyum stratejileridir.

Sonuç ve Tartışma

Esnek üstyapıların iklim değişikliği etkilerine en fazla maruz kalan ve etkilenebilirliği en fazla olan ve diğer tabakalara göre maliyetleri yüksek olan kaplamaların iklim değişikliğine uyum alternatiflerinin, iklim senaryolarında belirsizlikler, proje süresi ve sürdürülebilirliğin ekonomik, sosyol, çevre bileşenlerinin beraber değerlendirildiği özellikle uygulanabilirliği ve kullanılabilirliği dikkate alınmalıdır.

Bitümlü ve bağlayıcısız tabaka karışımlarının iklim değişimi etkilerinin değerlendirileceği yöntem ve deneylerle belirlenmesi, deney prosedürlerinin hazırlanması bununla ilişkili olarak tabaka kalınlıklarının mekanistik-amprik yöntemlerle analiz edilerek; iklim değişikliğine proaktif veya planlı kategoride uyum stratejileri belirlenmelidir.

Uyum ve azaltım stratejilerinde esnek üstyapıların yaşam döngüsünün özellikle yapım, onarım, yeniden yapım bileşenlerinde sera gazı emisyonlarının meydana gelmesine en fazla sebep olan özellikle agrega, bitüm malzemelerinin alternatiflerinin tasarım aşamasında değerlendirilmesi ve malzeme taşıma mesafelerinin kısaltılması, üretim ve yapım aşamasında daha az enerji harcamasını sağlayacak projelerin yapılması değerlendirilmelidir.

Esnek üstyapıların yaşam döngüsünde ilk yapım, onarım ve yeniden yapım tabaka tasarımında atık agrega, geri dönüştürülmüş bitümlü veya bağlayıcısız karışım kullanımının değerlendirilmesi, yeniden

yapım ve onarım çalışmalarında yerinde dönüşüm yöntemlerinin uygulanması sera gazı emisyonlarını azaltacaktır. Ülkelerin btlerine ek yükler getirecek esnek styapıların uyum stratejilerimde özelikle kullanım aşamasında trafik güvenliğinin sağlanması şartıyla yol kullanıcılarının konforu acısında yapacağı veya yapmakta zorunlu olacağı fedakârlıklar önemli etken olacaktır. Ayrıca proje hizmet süreleriyle beraber iklim senoryalarının aę düzeyinde belirsizlikler dikkate alınarak uyum stratejilerinde kademeli inşaat ve otonom kategoride uyum stratejileri tartışılmalıdır.

Kaynakça

Akbelen, B. Bulut, İ. & Yaman, İ. Ö. (2023). İklim değişikliği ile mücadelede beton yolların potansiyeli. Beton 2023 Kongresi Çağrılı Bildirileri-8/10 Kasım 2023 İstanbul, (s.260-275).

Akın, G. (2006). Küresel Isınma, nedenleri ve sonuçları. Ankara Üniversitesi Dil ve Tarih-Coğrafya Fakültesi Dergisi, 46(2), 29-43.

Almeida, A. & Picado-Santos, L. (2022). Asphalt road pavements to address climate change challenges an overview. Applied Sciences, 12(24),3-15.

Başoğlu, A. (2014). Küresel iklim değişikliğinin ekonomik etkileri üzerine model denemesi ve ekonometrik bir analiz. KTÜ Sosyal Bilimler Dergisi 1(1),176-195.

Beşballı, S.G. (2023). Çevre sorunları çerçevesinde küresel iklim değişikliği. Artvin Çoruh Üniversitesi Uluslararası Sosyal Bilimler Dergisi, 9(2), 500-521.

Calda, B. Kutluğ, E. An, N. & Kurnaz, L. (2022). İklim Değişikliği Etkilerinin Küresel Performans Göstergeleri Açısından Değerlendirilmesi. Resilience Journal, 6(1), 171-196. DOI: 10.32569/resilience.963460.

ÇŞİDB (2023). İklim değişikliğine uyum stratejisi ve eylem planı (2024-2030). (15/04/2025 tarihinde <https://iklim.gov.tr/db/turkce/icerikler> adresinden ulaşılmıştır).

ÇŞİDB (2023a). Türkiye'de iklim değişikliğine uyum eyleminin güçlendirilmesi projesi. (07/04/2025 tarihinde <https://iklimeuyum.org/dokumanlar> adresinden ulaşılmıştır).

Demirtürk, D. (2021). Sürdürülebilir ulaşım da sera gazı etkisini azaltmaya yönelik çalışmalar. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 9(4), 1080-1092.

Dündar, A. O. & Kolay, A. (2021). Karayolu yük ve yolcu taşımacılığının çevresel sürdürülebilirlik bakımından değerlendirilmesi ve Konya ili sera gazı emisyonunun

hesaplanması. Ömer Halisdemir Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 14(1), 317-334.

Erbaş, S. S. (2020). Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Ozon Tabakasının Korunmasına İlişkin Bilinçlendirme Etkinliği, 4 Mart 2020, Konya

Edemen, M. Engin, V. Boynukara, E. Narin, E. Yalçın, M. Küçükilhan, H .& Kavlak, A. (2023). Küresel ısınma, küresel ısınmanın nedenleri ve sonuçları dünya ve Türkiye üzerine olası etkileri. International Journal of Social and Humanities Sciences Research (JSHSR), 10(91), 37-48.

Gong, Z. Zhang, L. Wu, J. Xiu, Z. Wang, L. & Miao, Y. (2022). Review of regulation techniques of asphalt pavement high temperature for climate change adaptation. Journal of Infrastructure Preservation and Resilience, 3(1), 9-17

IPCC (2023). Climate Change 2023 Synthesis Report.(24/04/2025 tarihinde [https://www.ipcc.ch /report /ar6/syr/download](https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/download) adresinden ulaşılmıştır).

KGM (2008). Esnek üstyapı projelendirme rehberi. Teknik Araştırması Dairesi Üstyapı Şubesi Müdürlüğü, Ankara.

Liu, T. Yang, S. Jiang, X. Liao, B. & Castillo-Camarena, E.A. (2023). Adaptation measures for asphalt pavements to climate change in China. Journal of Cleaner Production, 415, 137861, 3-8.

MGM (2005).Klimotoloji-II.(20/03/2025 tarihinde <https://cevresahiriklimkutuphanesi.csb.gov.tr> adresinden ulaşılmıştır).

MGM (2007). Aeroloji. (17/03/2025 tarihinde [https://www.mgm.gov.tr/ FILES/genel/kitaplar/aeroloji](https://www.mgm.gov.tr/FILES/genel/kitaplar/aeroloji) adresinden ulaşılmıştır).

MGM (2015).Yeni senaryolar ile Türkiye iklim projeksiyonları ve iklim değişikliği. Araştırma Dairesi Başkanlığı Klimatoloji Şube Müdürlüğü, Ankara.

Miao, Y. Sheng, J. Ye, J. (2022). An assessment of the impact of temperature rise due to climate change on asphalt pavement in China. Sustainability 14 (15), 3-16.

Qiao, Y. Dawson, A. Parry, R. Flintsch, T. G. & Wang, W. (2020). Flexible pavements and climate change: A comprehensive review and implications. Sustainability, 12(3), 1057-1069.

Şanlı, F. B. Bayrakdar, S. & İncekara, B. (2017). Küresel iklim değişikliğinin etkileri ve bu etkileri önlemeye yönelik uluslararası girişimler. Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 22(1), 201-212

Swarna, S. T. Hossain, K. Mehta, Y. A. & Bernier, A. (2022). Climate change adaptation strategies for Canadian asphalt pavements; Part 1: Adaptation strategies. Journal of Cleaner Production, 363(2022) , 132-139.

Türkeş, M. (2003). “Küresel İklim Değişikliği ve Gelecekteki İklimimiz”, 23 Mart Dünya Meteoroloji Günü Kutlaması Gelecekteki İklimimiz Paneli, Bildiriler Kitabı, Ankara (s. 12-37).

Türkeş, M. (2008). Küresel iklim değişikliği nedir temel kavramlar, nedenleri, gözlenen ve öngörülen değişiklikler. İklim Değişikliği ve Çevre Dergisi, 1(1), 26-37.

Türkeş, M. (2008a). Küresel iklim değişikliği nedir temel kavramlar, nedenleri, gözlenen ve öngörülen değişiklikler. İklim Değişikliği ve Çevre Dergisi, 1(1), 26-37.

Türkeş, M. Sümer, U. M. & Çetiner, G. (2000). Küresel iklim değişikliği ve olası etkileri. Çevre Bakanlığı, Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi Seminer Notları (İstanbul, 13 Nisan 2000), 7-24.

Yang, Q., Cao, Z. Shen, L. Gu, F. Santos, J. Qiao, Y. & Chu, C. (2024). Impacts of climate change on environmental and economic sustainability of flexible pavements across China. Resources, Conservation and Recycling, 206, 107589.2-14.

Yousefdoost, S. Vuong, B. Rickards, I. Armstrong, P.& Sullivan, B. (2013). Evaluation of dynamic modulus predictive models for typical Australian asphalt mixes. In Proceedings of the 15th AAPA international flexible pavements conference (sy. 22-37).

WEF (2024). Global Risks Report 2024. (07/04/ 2025 tarihinde <https://www3.weforum.org/docs/WEF> adresinden ulaşılmıştır).

BÖLÜM 3

DYNAMIC ANALYSIS OF DOCK PILES UNDER THE EFFECTS OF DIFFERENT SEA WAVES AND SEDIMENT MOVEMENT

MUHAMMET ENSAR YİĞİT ¹
ÜMİT GÖKKUŞ ²

Introduction

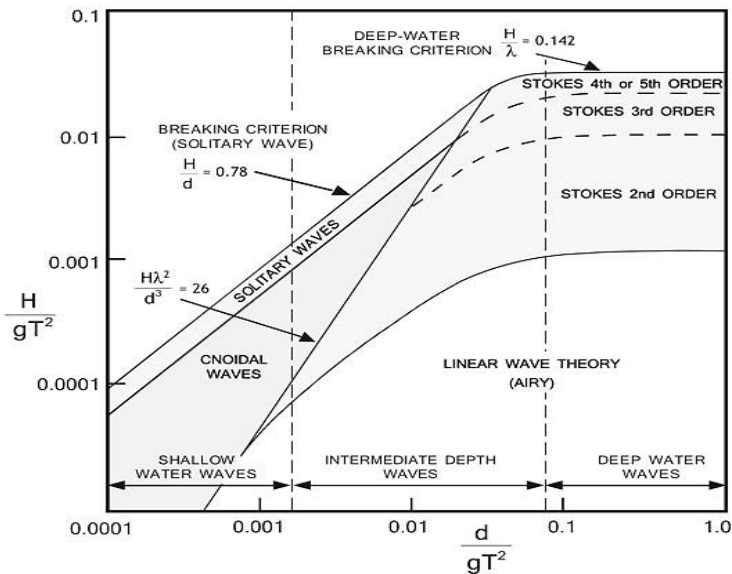
Studies on wave-based hydrodynamic effects occurring around dock piles are available in the literature. Hydrodynamic forces on cylindrical piles against wave motion modelled as unsteady flow can be calculated theoretically according to different wave theories. These wave theories are grouped into two main groups as small amplitude and finite amplitude. In analyses of wave statistics, design wave parameters (wave height and period) vary according to their probability of occurrence and risk values. Design parameters also change according to the depth at which the piles will be constructed. Design parameters are of great importance in calculating the hydrodynamic forces that will affect the piles.

¹ Corresponding, Assistant Professor, Manisa Celal Bayar University, Engineering and Natural Sci. Faculty, Civil Engineering Department, Manisa/Türkiye, Orcid: 0000-0003-0161-7144 ensar.yigit@cbu.edu.tr

² Retired Professor, Orcid: 0000-0002-2422-6392 pentaprofcon@gmail.com

In the Le Mehaute diagram (Figure 1), which determines the validity regions of wave theories, when the statistical analyses of piles at a construction depth are taken into account, it can be determined that the pile will be affected by more than one different wave theory during its useful life, depending on the d/gT^2 and H/gT^2 ratios. Different design parameters that may be encountered at the same depth will validate different theories, which will reveal the changing hydrodynamic forces along the pile due to different wave particle velocities and accelerations. It is necessary to design and project cylindrical steel dock piles according to the design parameters and therefore the hydrodynamic force changes that are likely to occur during their useful life.

Figure 1. Limits of validity of wave theories (Le-Mehaute, 1969).



It has been determined that hydraulic-hydrodynamic loads, ship berthing loads, earthquake loads, dock operational loads and lateral ground loads play an active role in the marine environment

where steel-cylindrical dock piles will be constructed. In analyses based on fluid-structure interaction, hydraulic-hydrodynamic and lateral ground loads play a fundamental role. In hydraulic and hydrodynamic loads, whether the flow is stable or unstable, and in lateral ground loads, whether the ground is elastic springy or liquefied are the facts to be decided in fluid-structure interaction models. As a result, it can be said that in the fluid-structure interaction model of a steel-cylindrical dock pile, the need for dynamic modelling of the water and soil movements that change along the pile arises. This modelling can be done analytically by developing equations of motion with SDOF and MDOF functions or numerically by using finite difference, finite element, bounded element, and finite volume method-based software.

Material and method

Mathematical Model for the Movement of Dock Piles

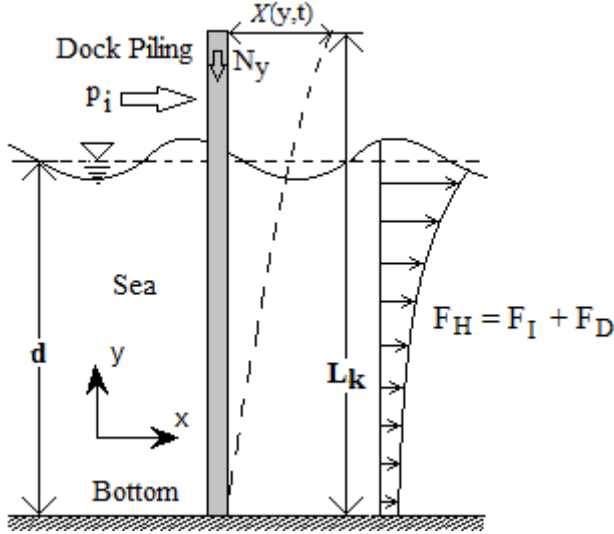
The oscillation of individual dock piles under the influence of dynamic external loads can be calculated by means of generalized mass, damping, stiffness and external load equations. The parameters of the pile can be constant, or they can vary with position. In this case, the equations are generalized by taking the integral of the parameters with respect to position along the structure. Thus, the oscillation function is obtained with its position and time-varying form. If the displacement function is decomposed into positional and time-dependent terms;

$$X_D(y, t) = \psi(y)X(t) \quad (1)$$

Here $\psi(y)$ is the shape function expressed by position and $X(t)$ is the vibration function expressed by time (Figure 2). The equation of motion of the generalized single degree of freedom system is;

$$m^* \frac{\partial^2 X}{\partial t^2} + c^* \frac{\partial X}{\partial t} + k^* X(t) = F^*(t) \quad (2)$$

Figure 2. Single dock pile and acting loads.



It can be written in dynamic form as follows. The obtained generalized equation can be analyzed analytically or numerically. The parameters of the equation of motion are calculated depending on position and time as follows.

$$m^* = \int_0^{Lk} m_s(y) \psi(y)^2 dy + \frac{N_y}{g} \quad (3)$$

$$c^* = a_1 E \int_0^{Lk} I_m(y) \left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} \right)^2 dy \quad (4)$$

$$k^* = E \int_0^{Lk} I_m(y) \left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} \right)^2 dy - N_y \int_0^{Lk} \left(\frac{\partial \psi}{\partial y} \right)^2 dy \quad (5)$$

$$F^*(t) = \sum p_i(t) \psi_i(y) + \int_0^d F_H(y, t) \psi(y) dy \quad (6)$$

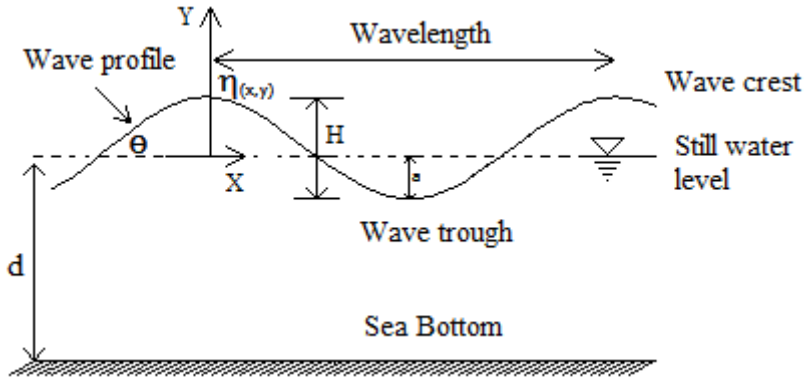
Here; m_s : structural mass, m^* : generalized mass, c^* : generalized damping, k^* : generalized rigidity, X_D : displacement, a_1 : damping coefficient, $F^*(t)$: external load, g : gravitational acceleration, γ_a : sea water unit volume weight, N_y : axial load, E : elasticity modulus, I_m : moment of inertia, d : water depth, L_k : pile

length, p_i : singular force in x-direction, $F_D(y, t)$: hydrodynamic drag force, $F_I(y, t)$: hydrodynamic inertia force (Ölmez, 2011). The displacement of the dock pile in the direction of the effective fluid velocity depending on the general equation of motion can be calculated with numerical modelling by providing fluid-structure interaction in the Abaqus (Abaqus, 2014) environment.

Wave Theories

In selecting the appropriate wave theory, the water depth (d), wave period (T) and wave height (H) in the environment where the pile is constructed, defined as environmental parameters, are taken as factors. In the design of coastal structures, especially in pile analysis, it is possible to obtain the appropriate wave theory by using the wave parameters at the depth where each pile is located.

Figure 3. General definition of linear wave parameters.



Waves are considered as two-dimensional in the $x - y$ plane. The seabed is considered as an undisturbed horizontal layer. Here, the distance (d) is the distance from the seabed to the still water level. Waves propagate in the positive x direction. All wave theories assume that waves are periodic and uniform (Figure 1). The period (T) is the time required for the wave crest to travel one wavelength.

The wave height (H) is the vertical distance between the trough and the wave crest between two waves. The wavelength (L) is the horizontal distance measured between similar points of successive waves in the direction of wave propagation. The speed of the crest or trough for a periodic wave is called the propagation speed. This speed is simply given as follows.

$$c = L/T \quad (7)$$

If the boundary value problem is summarized as two-dimensional.

Differential (Laplace) equation:
$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0 \quad (8)$$

Base boundary condition: for $y = -d$
$$\partial \Phi / \partial y = 0 \quad (9)$$

Free surface kinematic condition: for $y = \eta$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial \Phi}{\partial x} \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{\partial \Phi}{\partial y} = 0 \quad (10)$$

Free surface dynamic condition: for $y = \eta$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)^2 - \left(\frac{\partial \Phi}{\partial y} \right)^2 \right] + g\eta = 0 \quad (11)$$

Relations can be obtained. Here Φ is the velocity potential. The potential function must satisfy the Laplace equation and three boundary conditions (Karaturp, 2007); (Russell, 1844).

Stokes-1 Wave Theory

For any wave theory, the problem is to find the velocity potential (Φ) or, in the same way, the stream function (Ψ) specific to the flow field. The detailed calculations and formulas of the Stokes-1 (Linear) wave theory are given by (Chakrabarti, 1987). Accordingly, the water surface profile (η) can be calculated as given

in equation (12) and the wavelength as given in equation (13) (Stokes, 1980).

$$\eta = \frac{H}{2} \cos \Theta \{ \Theta = (kx - \omega t), k = \frac{2\pi}{L}, \omega = \frac{2\pi}{T} \} \quad (12)$$

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh kd \quad (13)$$

As seen in Equation (13), the wavelength can be calculated depending on T and d . The velocity and acceleration of a fluid particle in the x-direction are expressed as follows.

$$u = \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh ks}{\sinh kd} \cos \Theta, \quad \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{2\pi^2 H}{T^2} \frac{\cosh ks}{\sinh kd} \sin \Theta \quad (14)$$

Here, s represents the height from the sea floor. The hydrodynamic pressure (p) formed on the sea floor is given in equation (18) according to the first order.

$$p = \rho g \frac{H}{2} \frac{\cosh ks}{\cosh kd} \cos \Theta \quad (18)$$

Stokes-2 Wave Theory

In Stokes second order wave theory, the potential velocity is written as follows;

$$\Phi = \varepsilon \Phi_1 + \varepsilon^2 \Phi_2 \quad (19)$$

Here, the solution of Φ_1 and Φ_2 should be in a form similar to the solution for Φ_1 given in (Chakrabarti, 1987), except that the coefficient k is $2k$ and the coefficient Θ is 2Θ . By applying the boundary conditions and appropriate initial conditions on the free water surface, the water surface profile is;

$$\eta = \frac{H}{2} \cos \Theta + \frac{\pi H^2}{8L} \frac{\cosh ks}{\sinh^3 kd} [2 + \cosh 2kd] \cos 2\Theta \quad (20)$$

Deep water wave profile;

$$\eta = \frac{H}{2} \cos \theta + \frac{\pi H^2}{8L} \cos 2\theta \quad (21)$$

The velocity and acceleration of the fluid particle in the x direction are;

$$u = \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh ks}{\sinh kd} \cos \theta + \frac{3}{4} \left(\frac{\pi H}{L} \right) \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh 2ks}{\sinh^4 kd} \cos 2\theta \quad (22)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{2\pi^2 H}{T^2} \frac{\cosh ks}{\sinh kd} \sin \theta + \frac{3\pi^2 H}{T^2} \left(\frac{\pi H}{L} \right) \frac{\cosh 2ks}{\sinh^4 kd} \sin 2\theta \quad (23)$$

From here, the water particle displacement equations can be derived for Stokes Second Order Theory. The dynamic pressure equation is obtained from the solutions Φ_1 and Φ_2 by completing the Bernoulli equation. The hydrodynamic pressure equation on the seabed is calculated as given below, taking only wave effects into account.

$$p = \rho g \frac{H}{2} \frac{\cosh ks}{\sinh kd} \cos \theta + \frac{3}{4} \rho g \frac{\pi H^2}{T} \frac{1}{\sinh 2kd} \times \left[\frac{\cosh 2ks}{\sinh^2 kd} - \frac{1}{3} \right] \cos 2\theta - \frac{1}{4} \rho g \frac{\pi H^2}{T} \frac{1}{\sinh 2kd} \times [\cosh 2ks - 1] \quad (24)$$

The wave speed or propagation speed is calculated from the second order as given below.

$$c^2 = \left(\frac{g}{k} \tanh kd \right) \times \left(\frac{\pi H}{T} \right)^2 \times \left(\frac{9-8 \cosh^2 kd + 8 \cosh^4 kd}{8 \sinh^4 kd} \right) \quad (25)$$

Stokes-3 Wave Theory

In Stokes third order wave theory, the potential velocity is written as follows;

$$\Phi = \varepsilon \Phi_1 + \varepsilon^2 \Phi_2 + \varepsilon^3 \Phi_3 \quad (26)$$

Here, the solution of Φ_1 , Φ_2 and Φ_3 should be in a form similar to the solution for Φ_1 given in (Chakrabarti, 1987), except that the coefficients k are $2k$ and $3k$, and the coefficients θ are 2θ

and 3θ . By applying the boundary conditions and appropriate initial conditions on the free water surface, the water surface profile is;

$$\begin{aligned} \eta = \frac{H}{2} & \left\{ \left(1 + \frac{H^2}{64} k^2 \frac{1}{\sinh^4 k d} (2 \cosh^4 k d + 10 \cosh^2 k d \right. \right. \\ & \left. \left. - 9) \right) \cos \theta \right. \\ & + \frac{H}{8} k \frac{\coth k d}{\sinh^2 k d} [2 + \cosh 2 k d] \cos 2 \theta \\ & \left. + \frac{3H^2}{256} k^2 \frac{1}{\sinh^6 k d} [1 + 8 \cosh^4 k d] \cos 3 \theta \right\} \end{aligned} \quad (27)$$

Wave speed and propagation speed are of the third order;

$$c = \sqrt{\frac{g}{k} \tanh k d} \left(1 + \frac{H^2}{64} k^2 \frac{1}{\sinh^4 k d} (8 \cosh^4 k d - 4 \cosh^2 k d + 5) \right) \quad (28)$$

Third order water particle velocity and acceleration (Tsuchiya and Yasuda, 1980);

$$\begin{aligned} u = c & \left\{ \frac{\pi H \cosh k s}{L \sinh k d} \cos \theta + \frac{3 \pi^2 H^2}{4 L^2} \left(\frac{\cosh 2 k s}{\sinh^4 k d} \cos 2 \theta \right. \right. \\ & \left. \left. + \frac{1}{3 \sinh^2 k d} \right) + \frac{3 \pi^3 H^3}{64 L^3} (13 - 4 \cosh^2 k d) \times \frac{\cosh 3 k s}{\sinh^7 k d} \cos 3 \theta \right\} \end{aligned} \quad (29)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} = -c & \left\{ \frac{2 \pi^2 H}{L T} \frac{\cosh k s}{\sinh k d} \sin \theta + \frac{3 \pi^3 H^2}{L^2 T} \left(\frac{\cosh 2 k s}{\sinh^4 k d} \sin 2 \theta \right. \right. \\ & \left. \left. + \frac{9 \pi^4 H^3}{32 L^3 T} (13 - 4 \cosh^2 k d) \frac{\cosh 3 k s}{\sinh^7 k d} \sin 3 \theta \right) \right\} \end{aligned} \quad (30)$$

The dynamic pressure equation is obtained from the solutions of Φ_1 , Φ_2 and Φ_3 and is written as follows, ignoring the hydrostatic terms.

$$\begin{aligned}
\frac{p}{\rho g d} = & \frac{\tanh kd}{kd} \left[\frac{\left(\frac{kH}{2}\right)^2}{4 \sinh^2 kd} \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} - \cosh 2 ks \right) \right] + \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} k \left(\frac{H}{2}\right) \frac{\cosh ks}{\sinh kd} - \right. \\
& \left. \frac{\left(\frac{kH}{2}\right)^3}{16} \frac{(2 \sinh^2 kd \cosh ks)}{\sinh^5 kd} \right) + 3 \cosh ks \cos \theta - \\
& \frac{\left(\frac{kH}{2}\right)^2}{4 \sinh^4 kd} \left[\sinh^2 kd + 3 \left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right) \sinh^2 kd \cosh 2 ks \right] \cos 2 \theta + \\
& \frac{3}{64} (kH/2)^3 \frac{1}{\sinh^7 kd} \left[4 \sinh^2 kd \cosh ks + \left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right) (13 - \right. \\
& \left. 4 \cosh^2 kd) \cosh 3 ks \right] \cos 3 \theta
\end{aligned} \tag{31}$$

Hydrodynamic Wave Forces

The speed and acceleration of water particles directly affect the magnitude of the forces generated by wave flow. For vertical piles, the horizontal flow velocity and acceleration and the dimensions of the wave's impact surface are important. The pile diameter (D) is important variable for the pile. The density ($\rho = \gamma/g$) and kinematic viscosity (ν) of the fluid can be considered as important properties of the fluid. In addition to the drag forces in the tangential direction to the pile surface, it can also be defined as the force determined by the mass and acceleration of the water distributed on the pile in a kind of impact manner (Morison et al. 1950). According to (Morison, 1950), the drag and inertia force acting on the unit pile width are,

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho_d D u |u| \quad , \quad F_I = C_M \rho \frac{\pi D^2}{4} \frac{\partial u}{\partial t} \tag{32}$$

It is expressed by the formula (Tsuchiya, 1980) (Morison, 1950). Here, C_D : Drag coefficient, ρ_d : Unit volume weight of water, C_M : Inertia coefficient. Other quantities are as defined before.

Mathematical Model for Sediment Movement

As a result of current or wave action, sedimented soil particles on the seabed move and rise as a result of hydrodynamic effects, changing the seawater concentration. This concentration profile decreases exponentially as it rises from the bottom. According to (Kırca, 2013), the total wall shear stress τ_0 at the channel bottom, resulting from the steady and uniform flow of water movement in an open channel flow,

$$\tau_0 = R \gamma_d J \quad (33)$$

It is given in the form (Kırca, 2013). Here; R : Hydraulic radius, γ_d : Specific gravity of water, J : Channel slope. The wall shear stress can be expressed in terms of the friction velocity (U_f):

$$U_f = \sqrt{\tau/\rho} \quad (34)$$

The channel bottom shear stress (τ_b) may be different from the total wall shear stress (τ_0). By nondimensionalizing the bottom shear stress resulting from the solid material movement and the variables causing the movement, the Shields parameter θ is obtained.

$$\theta = \frac{\tau_b}{(S_k - 1)\gamma_d d_k} = \frac{U_f^2}{(S_k - 1)g d_k} \quad (35)$$

Here; S_k : specific gravity of solid material, ($S_k = \rho_z/\rho$), d_k : diameter of solid material. The initial condition of the movement at the base depends on the dimensionless shear stress θ reaching the critical value. When the critical value of this shear value is exceeded, the solid material transport at the base begins. The change obtained as a function of the critical shear stress (θ_c) and Reynolds number (Re) is given Figure 4 (Kırca, 2013) (Fredsoe, 1992).

From the moment the movement starts, the surface shape on the base will cease to be flat and after the base movement starts, the grains will turn into hills and valleys of different sizes on the base.

In addition to the friction in the base movement, there will be a resistance to the flow due to the roughness effect caused by the differentiation of the surface geometry. For this reason, it is suggested that the base shear stress (τ_b) consists of two separate components (Kirca, 2013) (Wilson, 1990) (Luque, 1976).

$$\tau_b = \tau_b' + \tau_b'' \quad (36)$$

Here; τ_b' : Friction resistance, τ_b'' : Shape resistance.

Figure 4. Grain Reynolds (Re^*) and Critical Shields (θ_c) numbers (Kirca, 2013).

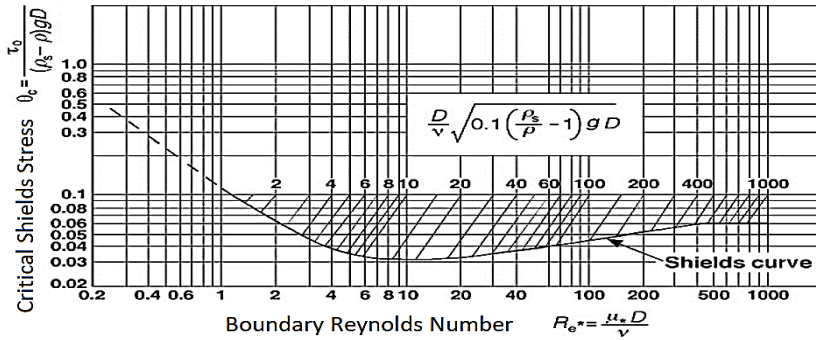
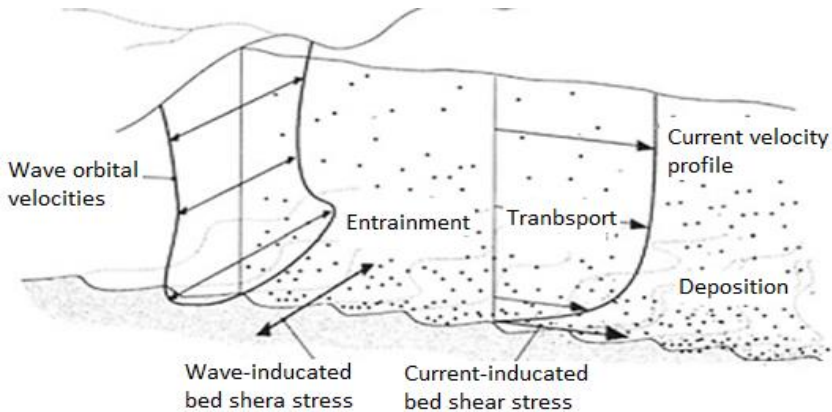


Figure 5. Suspended sediment transport under the influence of waves and currents (Soulsby R. , 1997) (Soulsby R. &, 2005).



The change of sediment concentration under wave action along the depth is generally an exponential function. Many methods have been proposed for the estimation of this function in the studies conducted. According to (Nielsen, 1992), the following equation can be used to calculate the sediment concentration under wave action on the mounded bottom regime:

$$c(y) = c_0 \exp\left(-\frac{y}{L_s}\right) \quad (37)$$

$$L_s = \begin{cases} 0,075 \frac{a\omega}{w_s}, \frac{a\omega}{w_s} \leq 18 \\ 1,4H_r, \frac{a\omega}{w_s} > 18 \end{cases} \quad (38)$$

$$a = \frac{U_m}{\omega} \quad (39)$$

$$c_0 = 0,005\theta_r^3 \quad (40)$$

$$\theta_r = \frac{\theta'}{\left(1 - \frac{\pi H_r}{L_r}\right)^2} \quad (41)$$

Here; y : Height from the base, θ' : Friction resistance, w_s : Sedimentation velocity, d^* : Dimensionless grain diameter, H_r : Sand dune height, L_r : Sand dune length, L_s : Damping distance, θ_r : Dimensionless shear stress. Other quantities are as defined before.

Seawater Density-Sediment Interaction

Regional models are generally unable to resolve the highly concentrated near-bottom regions of less than a few centimetres due to the vertical scale. The density to be used in the equations can be indirectly assumed to be a sediment-water dilute mixture. In coastal areas, the variation of seawater density along the depth under the influence of salinity, temperature, and pressure can usually be

calculated. The additional effect of suspended solids can be included as follows (Amoudry, 2011).

$$\rho(y) = \rho_d + c(y)(\rho_s - \rho_d) \quad (42)$$

Here; $\rho(y)$: Density of sediment-sea water mixture, ρ_s : Density of sediment particles, ρ_d : Density of sea water, $c(y)$: Solid matter concentration. In this study, it is taken into account that the density of sea water in areas close to the sea floor increases due to the effect of sediment.

Hydraulic Modeling

Abaqus/CFD finite element software was used to calculate the fluid characteristics (Abaqus, 2014; (Gökkuş, 2017).

Conservation of mass; $\nabla V = 0 \quad (43)$

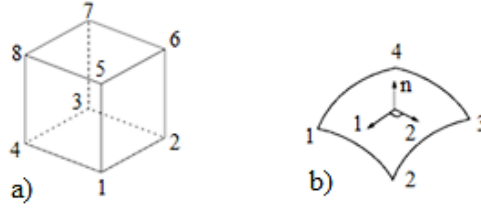
Conservation of momentum; $\left(\frac{\partial V}{\partial t} + V \times \nabla V\right) = \nabla \sigma + \rho g \quad (44)$

Conservation of energy; $\frac{\partial E}{\partial t} + \nabla(V(E_t + P)) = 0 \quad (45)$

The solution of the equations with the finite element method according to the boundary conditions was carried out with the software used. In the equations, V : velocity vector, P : pressure, E_t : total energy, t : time, σ : surface tension.

Continuous, 3-dimensional (continuum-3D) elements are used in fluid analyses. The element geometry used in fluid models is hexahedron (6-sided). The element type used in the fluid models seen in Figure 6.a is FC3D8. The element geometry used in the dock pile model is 4-node double-sloped thin or thick shell (2-sided). Different element types can be used in solid body models. The element type seen in Figure 6.b. below is SR4, which is also used in solid body models with pipe sections having a certain wall thickness.

Figure 6. a) Fluid element geometry, b) Shell element geometry



The acronym of this element, which is suitable for fluid modelling, FC3D8 is fluid (*F*), continuous (*C*, continuum), three-dimensional (*3D*) and 8-node (*8*). It is developed for contact problems. The acronym of this element, which is suitable for pipe section shell body modelling with a certain wall thickness, S4R is shell (*S*), 4-node (*4*) and reduced integration (*R*) (Abaqus, 2014).

Modelling Fluid-Structure Interaction

By determining the contact surfaces in the fluid and structure models, the effect surfaces of the forces to be transferred from the fluid to the structure and the deformations to be transferred from the structure to the fluid are determined in the solution of the two models together. The finite element program uses the following equation for the fluid solver. The subscript "*f*" in the equation represents the fluid.

$$k_f u_f = F_f(t) \quad (46)$$

The flow forces to be transferred to the structure are calculated by solving the above equation (Abaqus, 2014). With the following equation, u_f ,

$$u_f = \{p \dot{u}_x \dot{u}_y \dot{u}_z T_a\}^t \quad (47)$$

It is calculated depending on the pressure (*p*), velocity components ($\dot{u}_x \dot{u}_y \dot{u}_z$), temperature (*T_a*) and time (*t*). The structure

solver is similar to the equation (48) stated with the force obtained in the fluid solver (Gökkuş, 2017);

$$m_s \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + c_s \frac{\partial u}{\partial t} + k_s u = F_{FS}(t) \quad (48)$$

The structure displacement is obtained by using the equation. The values obtained from the two solvents are transferred to each other to provide interaction. $F_{FS}(t)$ represents the time-varying hydrodynamic force on the solid body. The structure is represented by the subscript “s”. Other quantities are as defined before.

Von-Mises Stresses on Pile in Fluid-Structure Interaction

According to this stress hypothesis; Rupture occurs when the maximum strain energy per unit volume in the triaxial stress exceeds a certain value. This hypothesis, which is used for ductile materials, is called the maximum strain energy hypothesis (Von-Mises, 1913).

Von Mises stresses are directly related to the deviatoric components in the energy equation.

$$W = \frac{1}{2} \sigma' : \varepsilon' \quad (49)$$

The following expression, known from Hooke's Law, is written into the equation to make the energy equation independent of displacements.

$$\varepsilon' = \varepsilon' = \frac{1}{2G} \sigma' \quad (50)$$

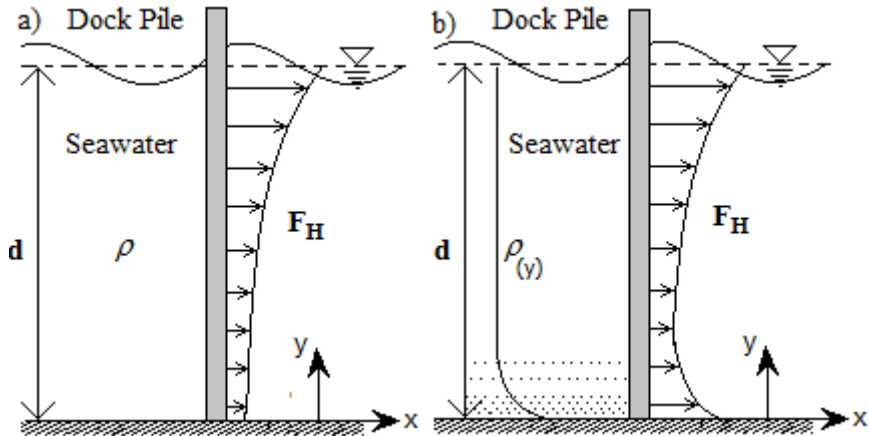
Von Mises Stresses can be written in different forms. Abaqus Finite Element Program obtains Von Mises stresses using the following equations.

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{3}{2} \sigma_{ij} \sigma_{ij} - \frac{1}{2} (\sigma_{kk})^2} \sigma_{VM} = \sqrt{\frac{3}{2} \sigma_{ij} \sigma_{ij}} \quad (51)$$

Case Study

In this section, two models are determined to determine the flow velocity and pressure distribution that Stokes-1, Stokes-2 and Stokes-3 wave theories will create around a cylindrical dock pile in a constant and variable density sea environment. The displacement and stress values of the dock pile under the effect of hydrodynamic forces are calculated. A fixed-support dock pile with a circular cross-section diameter; $D=1.0$ m and a height; $L=40.0$ m is placed in a constant and variable density wavy sea environment with rectangular cross-section dimensions $(X,Y,Z) = (50 \text{ m}, 25 \text{ m}, 5 \text{ m})$ (Figure 7). In the finite element model, sea water is modeled with the Computational Fluid Dynamics (Abaqus/CFD) solver and the dock pile is modeled with the Dynamic Finite Element (Abaqus/Explicit) solver.

Figure 7. Schematic of variation with depth a) Constant and b) Variable density.



Material Section and Properties

The material parameters of the pile element are given in Table 1. The properties determined in Table 2 were used for sea water and fluid liquefied soil. The wave theories and wave parameters to

be examined within the scope of the application are given in Table 3. In this study, $C_D=1.16$ and $C_M=2.0$ were taken for the circular pile.

Tablo 1. Steel pile parameters (Yiğit, 2019).

$\rho_k(t/m^3)$	$\gamma_k(kN/m^3)$	$D(m)$	$s(m)$	$E(kN/m^2)$	$N_y(kN)$	ν
7.834	76.85	1.00	0.014	2.1×10^8	700.0	0.3

Tablo 2. Water parameters.

$C_0(m/s)$	κ	Γ_0	$\rho(t/m^3)$	$\gamma(kN/m^3)$	$\mu(N.s/m^2)$
1450	0	0	1.029	10.09	1.002×10^{-3}

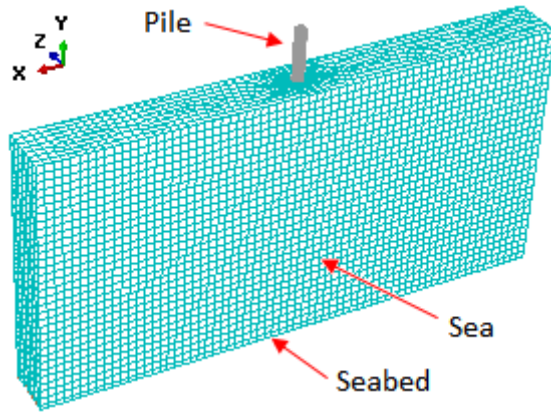
Tablo 3. Wave parameters.

Wave Type	$H(m)$	$T(s)$	$\rho_d(t/m^3)$	$\gamma_d(kN/m^3)$	$d(m)$	In case of sediment movement	
						$Ws(m/s)$	θ'
Stokes-1	0.4	9	1.029	10.09	25.0	0.011	1.0
Stokes-2	2.4	9	1.029	10.09	25.0	0.028	0.9
Stokes-3	8.0	9	1.029	10.09	25.0	0.085	0.8

Mesh Design

The element geometry used in the fluid models shown below is hexahedron (6-sided) FC3D8 (Figure 8). The element geometry used in the separation of the dock pile into finite elements is 4-node double-sloped thin or thick shell (2-sided) S4R. In order to provide better interaction on the fluid and solid body contact surface in the models, the mesh spacing should be kept smaller than normal and made denser. The general mesh spacing in the creation of the points and elements seen in Figure 8 is 0.5 m, and the mesh spacing is 0.10 m to obtain more precise results in areas close to the pile surface. 115659 points and 105210 elements were used in the sea model, and 12276 points and 12245 elements were used for the steel dock pile.

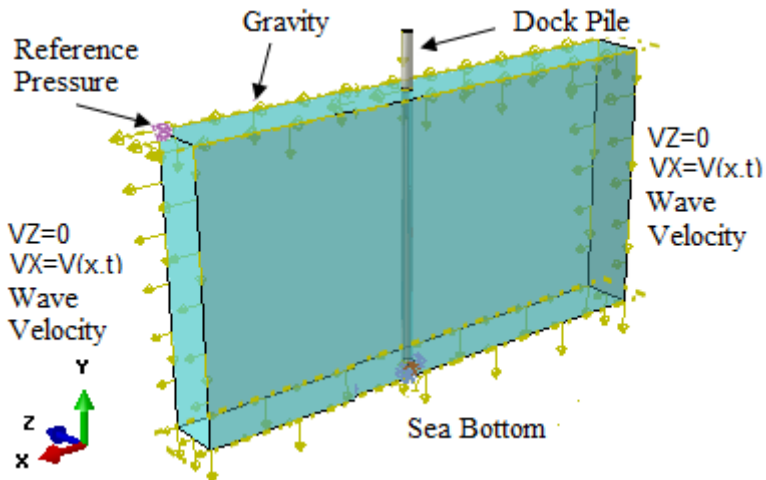
Figure 8. Mesh structure of the marine-pile interaction model.



Boundary Conditions

In the modelling carried out within the scope of this study, flow is not allowed in the y direction ($VY=0$). Flow is not allowed for the lateral surface boundary condition in the z direction ($VZ=0$). Gravitational acceleration is applied in the vertical y direction ($g_Y=-9.81 \text{ m/s}^2$). Fixed support condition is given on the bottom surface of the section ($UX=UY=UZ=0$).

Figure 9. Boundary conditions.



The reference pressure at calm water level is determined as $P_{ref}=0 \text{ kN/m}^2$. The upper end of the pile is free, and the lower end is fixed to the seabed with fixed support. ($U_x=U_y=U_z=0$, $R_x=R_y=R_z=0$).

Results

The sediments in the turbulent zone formed because of wave or current-based movement on the sea floor may remain suspended at a certain height in uniform or variable concentration. In this case, an exponentially decreasing form occurs in the sea water density from the bottom to the water surface. This concentration change can be determined from the sea bottom to the water surface and its effect on the sea water density can be calculated. The sediment vertical concentration profile is given separately for each of the three different wave theories by using the data in Tables 2-4 with the help of Equation (37-42) (Table 4). The vertical profile of sea water with variable density was calculated by considering the sediment concentration, sediment particle density and sea water density in determining $\rho(y)$. The change in the density of sea water with depth is shown in Figure 10. It is calculated that in case of sediment movement on the sea floor, the sea water density at the bottom will increase by approximately 18% to 31%.

Table 4. Concentration and density equations that vary with depth.

<i>Wave Type</i>	<i>Sediment Concentration (%)</i>
<i>Stokes-1</i>	$c(y) = 0.1831 \exp(-y/0.9856)$
<i>Stokes-S2</i>	$c(y) = 0.2402 \exp(-y/1.1732)$
<i>Stokes-S3</i>	$c(y) = 0.3117 \exp(-y/1.3421)$
	<i>Variable Seawater Density (t/m^3)</i>
<i>Stokes-S1</i>	$\rho(y) = 1.029 + 0.1635 \exp(-y/0.9856)$
<i>Stokes-</i>	$\rho(y) = 1.029 + 0.2145 \exp(-y/0.9856)$
<i>Stokes-S3</i>	$\rho(y) = 1.029 + 0.2783 \exp(-y/0.9856)$

The wave speed, wave acceleration and hydrodynamic wave forces varying with depth, belonging to Stokes-1-2-3 wave theories, are shown in Figure 11 for constant and variable sea density. The water surface profile, pressure, velocity, and acceleration values of the Stokes-1-2-3 wave theories are shown in Figure 12 for the water surface and in Figure 13 for the sea bottom.

Figure 10. Seawater density profile, $\rho(y)$.

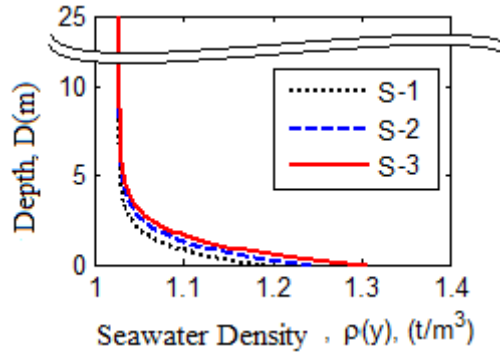


Figure 11. Changes a) Wave speed, b) Wave acceleration, c) Force in constant density, d) Force in variable density ($t=3T/4$).

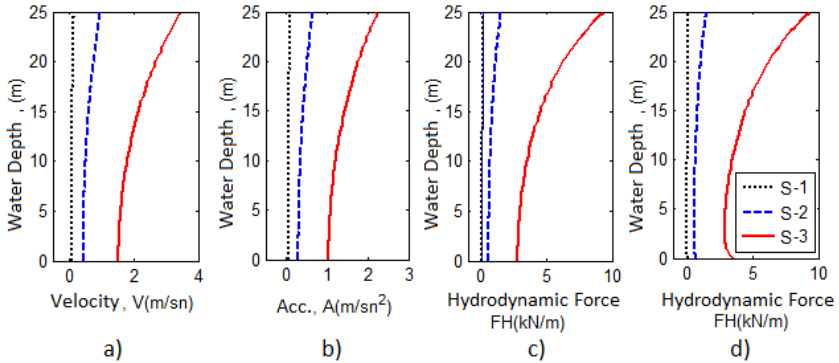


Figure 12. Stokes-1-2-3 waves on the water surface a) Profile, b) pressure - time, c) speed - time and d) acceleration - time graph.

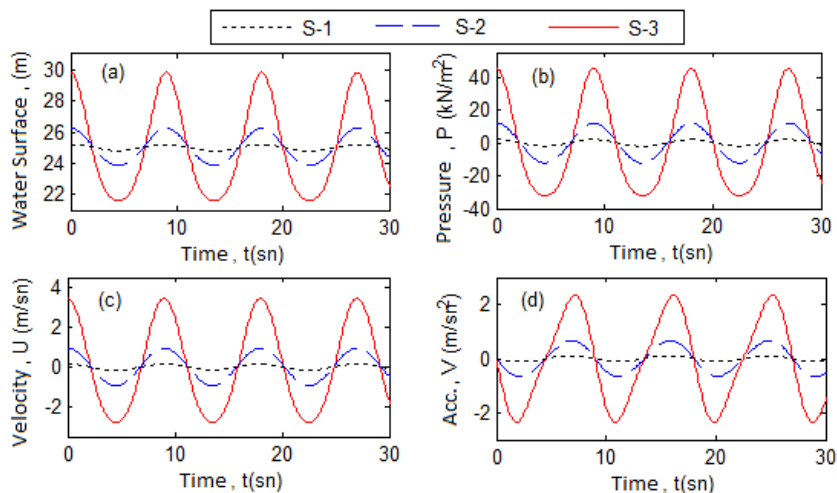
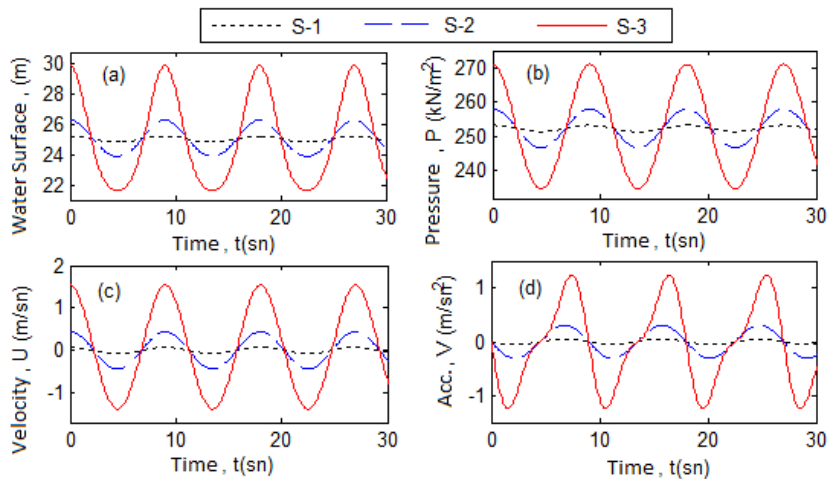


Figure 13. Stokes-1-2-3 waves on the seabed, a) Profile, b) pressure - time, c) speed - time and d) acceleration - time graph.



Fixed density marine environment

As a result of the hydrodynamic forces acting on the structure, a displacement of 0.0355 m for Stokes 1 at the top of the steel pile with a wall thickness of $t=14$ mm (Figure 14, Figure 15) and a Mises stress of 28497 kN/m² at the pile base were calculated (Figure 14, Figure 16). The change in displacement and stress values with time for the other analyzed wave theories are shown in Table 5.

Figure 14. Displacement-time graphs and Stress-time graphs on piles in constant density marine environment.

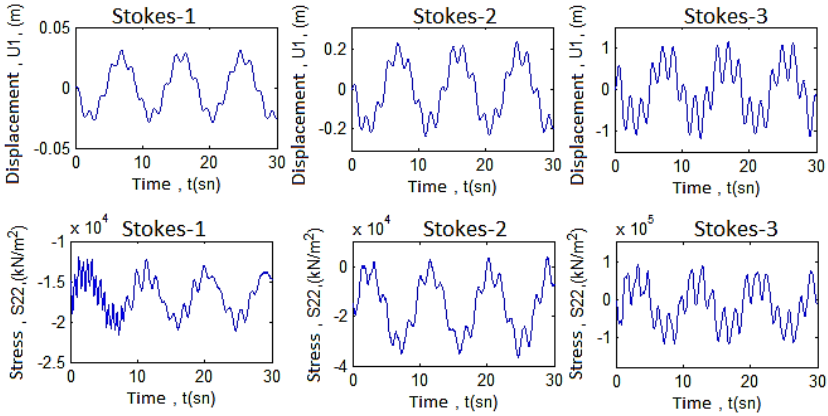


Figure 15. Displacement U (m) distribution for a constant density.

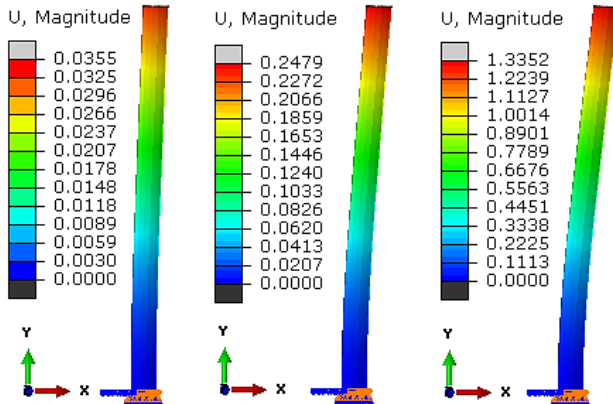
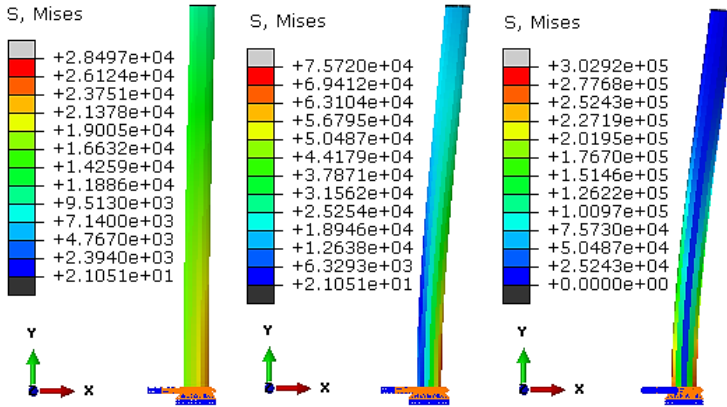


Figure 16. Stress $S(\text{kN/m}^2)$ distribution for a constant density.



Variable density marine environment

As a result of the hydrodynamic forces acting on the structure in the variable density marine environment, a displacement of 0.0361 m for Stokes 1 at the top of the steel pile with $t=14$ mm wall thickness was calculated (Figure 17.a-b-c, Figure 18) and a Mises stress of 29067 kN/m^2 at the pile base (Figure 17.d-e-f, Figure 19).

Figure 17. Displacement-time graphs and Stress-time graphs on piles in variable density marine environment.

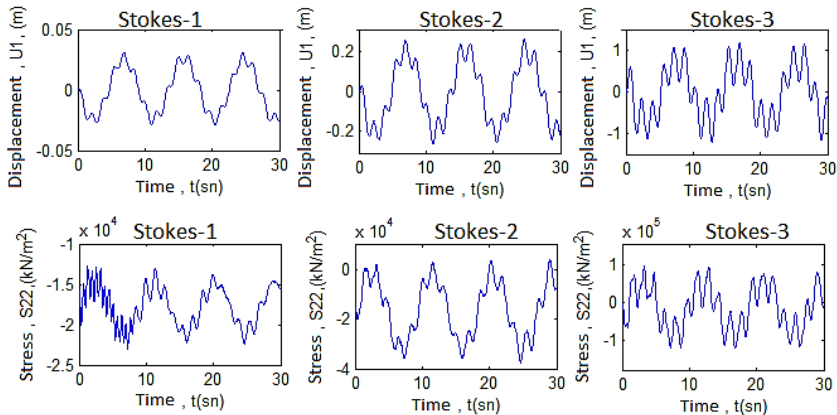


Figure 18. Displacement $U(m)$ distribution for variable density.

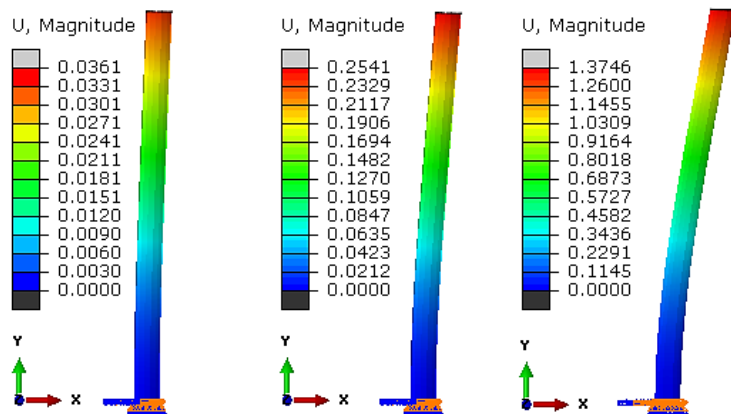
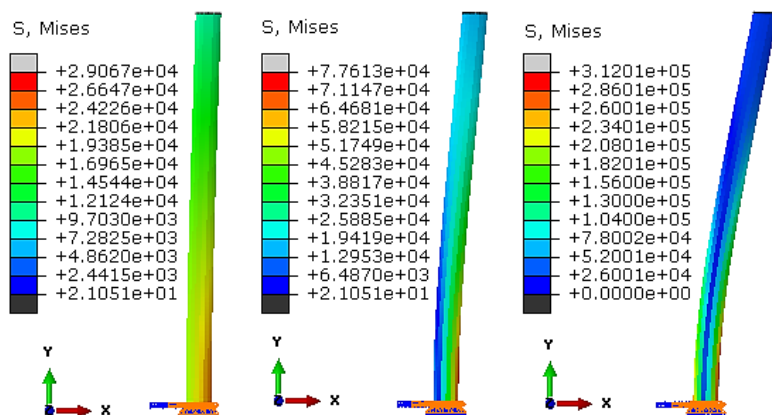


Figure 19. Stress $S(kN/m^2)$ distribution for variable density.



In the analyses performed in the sea environment with variable density with depth, the density change caused by the suspended solid concentration formed by the sediment movement on the sea floor increases the pressure acting on the pile. However, since this increase decreases in exponential form, it does not create an effective hydrodynamic force on the pile. Therefore, it was observed that this

force increases at the end of the pile where it is anchored to the sea floor does not have much effect on the displacement and stress results on the pile element (Table 5). The displacement and stress values formed on the dock pile are given in Table 5. The differences between the constant density sea environment and the variable density sea environment were calculated and compared with each other.

Table 5. Comparison of fixed and variable density marine environments.

<i>Wave Theory</i>	<i>Displacement (m)</i>		<i>Diff. (%)</i>	<i>Stress (kN/m²)</i>		<i>Diff. (%)</i>
	<i>fixed</i>	<i>variable</i>		<i>fixed</i>	<i>variable</i>	
<i>Stokes-1</i>	<i>0.0355</i>	<i>0.0361</i>	<i>1.7</i>	<i>28497.12</i>	<i>29067.32</i>	<i>1.9</i>
<i>Stokes-2</i>	<i>0.2479</i>	<i>0.2541</i>	<i>2.1</i>	<i>75720.32</i>	<i>77613.44</i>	<i>2.5</i>
<i>Stokes-3</i>	<i>1.3352</i>	<i>1.3746</i>	<i>2.9</i>	<i>302920.78</i>	<i>312014.12</i>	<i>3.1</i>

Conclusion

Within the scope of this study, analyses were made for external effects that quay piles may encounter during their useful life in constant and variable density marine environments under the influence of different design waves. The following results were obtained because of the calculations.

- Wave particle velocities, which reach the highest value on the sea surface in Stokes-1, Stokes-2 and Stokes-3 waves, decrease towards the bottom.
- If the wave-originated displacement value at the pile tip point is compared in constant and variable density marine environments, a difference of 1.7% for Stokes-1 wave, 2.1% for Stokes-2 wave and 2.9% for Stokes-3 wave was calculated.
- Similarly, if the stress values are compared, a greater value of 1.9% for Stokes-1 wave, 2.5% for Stokes-2 wave and 3.1% for Stokes-3 wave was calculated in the

variable density marine environment compared to the constant density marine environment.

- When the Effect of Sediment Movement is Examined; sediment movement is effective on the seabed and decreases exponentially towards the water surface, the hydrodynamic pressure acting on the quay pile increases depending on the concentration ratio and since the part where the concentration is highest is close to the pile support, its effect is not much.

As a result, the effect of sediment movement on displacement and stress in vertical facilities with fixed supports remains between 1.7-3.1%. However, since the density on the seabed will increase between 18% and 31% (Fig.10), it is predicted that its effect will be greater in horizontal facilities (e.g., sea pipeline) that sit freely on the bottom. Studies on this subject can be done in the future.

References

- Abaqus. (2014, 01 12). *Analysis User's Manual, V6.6*. Abaqus documentation:
<http://62.108.178.35:2080/v6.14/books/usb/default.htm>
adresinden alındı
- Amoudry, L. &. (2011). Deterministic Coastal Morphological and Sediment Transport Modeling: A Review and Discussion. *Reviews of Geophysics*, 49, 1-21.
- Chakrabarti, S. (1987). *Hydrodynamics of Offshore Structures*. Berlin: Springer-Verlag.
- Fredsoe, J. &. (1992). *Mechanics of Coastal Sediment Transport, volume 3 of Advanced Series on Ocean Engineering*. New Jersey: World Scientific.
- Gökkuş, Ü. Y. (2017). Flexible Body Dynamics of Offshore Wind Turbine Under Extreme Loading Conditions. *International Journal of Sciences & Applied Research*, 4(2), 22-29.
- Karaturp, F. (2007). Kıyı Hidrodinamiğine İlişkin Dalga Denklemlerinin Çözümlemesinde Kısmi Diferansiyel Denklemler Uygulamaları. *Yüksek Lisans Tezi*. Manisa.
- Kırca, V. (2013). *Dalga Kırılma Bölgesi Dışında Katı Madde Hareketi, İstanbul Teknik Üniversitesi*. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi Ders Notu.
- Le-Mehaute, B. (1969). *An Introduction to Hydrodynamics and Water Waves*. Berlin: Springer.
- Luque, R. &. (1976). Erosion and transport of bed load sediment. *Journal of Hydraulic Research*, 14(2), 127-144.
- Morison, J. O. (1950). The Forces Exerted by Surface Waves on Piles. *Petroleum Trans*, 189, 149-157.

- Nielsen, P. (1992). *Coastal Bottom Boundary Layers and Sediment Transport*. World Scientific: World Scientific.
- Ölmez, İ. Y. (2011). Düzenli Dalgalar Etkisindeki Deniz Tabanına Serbest Oturan Boruhatlarının Dinamik Analizi. *5nci Ulusal Su Mühendisliği Sempozyumu* (s. 95-105). İstanbul: DSİ.
- Russell, J. (1844). *Report on Wave. Report of the 14th Meeting of the British Association for the Advancement of Science*. York.
- Soulsby, R. &. (2005). Bedload Sediment Transport in Coastal Waters. *Coastal Engineering*, 52, 673-689.
- Soulsby, R. (1997). *Dynamics of Marine Sands*. London: Thomas Telford Pub.,.
- Stokes, G. (1980). *On the Theory of Oscillatory Waves*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Tsuchiya, Y. &. (1980). A New Approach to Stokes Wave Theory. *Bulletin of the Disaster Prevention Research Institute*, 31(1), 17-34.
- Von-Mises, R. (1913). Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen. *Mathematisch-Physikalische Klasse, 1913*, 582-592.
- Wilson, K. &. (1990). Behaviour of mobile beds at high shear stress, In Behaviour of mobile beds at high shear stress. *In Proceedings of 22th ICCE*, 3, 25-36.
- Yiğit, M. (2019). Dalga, Sediment ve Sıvılaştan Zemin İtkilerine Maruz Rıhtım Kazıklarının Dinamik Davranışlarının Modellenmesi. *Doktora Tezi*. Manisa: Manisa Celal bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

İNŞAATTA DİJİTALLEŞME VE MODERN UYGULAMALAR

