

JOURNAL OF ICIVILTECH

INNOVATIONS IN CIVIL ENGINEERING AND TECHNOLOGY

YEAR: **2022** VOLUME: **4** ISSUE: **1**

EARTHQUAKE **ENGINEERING**

BUILDING MATERIALS **ENGINEERING**

STRUCTURAL **ENGINEERING**

CONSTRUCTION MANAGEMENT **ENGINEERING**

TRANSPORTATION **ENGINEERING**

GEOTECHNICAL **ENGINEERING**

e-ISSN: 2687-2129

HYDRAULIC AND WATER RESOURCES **ENGINEERING**

Journal of Innovations in Civil Engineering and Technology (JICIVILTECH)

2022, Volume 4, Issue 1

The Journal Information

Publisher: Hüseyin AKBULUT

Editor-in-Chief: Hüseyin AKBULUT

Editors: Cahit GÜNER, Gökhan GÖRHAN, Gökhan KÜRKLÜ

Field Editor: Murat HİÇYILMAZ

Secretary of Publication: Ayfer ELMACI, Burak Enis KORKMAZ, Şule YARCI

Access: Open Access

Language of Publication: English and Turkish

Publication Frequency: Twice a year (in December and June)

Type of Publication: Peer-reviewed and periodical

e-ISSN: 2687-2129

Telephone: +90 272 2182 30 00 (2324)

E-mail: j.civiltech@gmail.com

Webpage: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/jiciviltech>

Correspondence Address: Afyon Kocatepe University, Engineering Faculty, Civil Engineering Department, Ahmet Necdet Sezer Campus, 03200, Afyonkarahisar, TURKEY.

Advisory Board of the 1st Issue

Ahmet Raif BOĞA, *Afyon Kocatepe University, Turkey*
Ahmet YILDIZ, *Afyon Kocatepe University, Turkey*
Alan WOODSIDE, *Brunel University, United Kingdom*
Bojan ZLENDER, *University of Maribor, Slovenia*
Dunja PERIC, *Kansas State University, United States*
Erol TUTUMLUER, *University Of Illinois At Urbana-Champaign, United States*
Hasan TOSUN, *Eskisehir Osmangazi University, Turkey*
Hashem R. AL-MASAEID, *Jordan University of Science and Technolog, Jordan*
Hüseyin Yılmaz ARUNTAŞ, *Gazi University, Turkey*
Imad L. AL-QADI, *University Of Illinois At Urbana-Champaign, United States*
Iqbal KHAN, *King Saud University, Saudi Arabia*
Ivanka NETINGER, *University of Osijek, Croatia*
İlhami DEMİR, *Kırıkkale University, Turkey*
İsmail DEMİR, *Afyon Kocatepe University, Turkey*
João Pedro SILVA, *Polytechnic Institute of Leiria, Portugal*
Masayasu OHTSU, *Kyoto University, Japan*
Mehmet SALTAN, *Süleyman Demirel University, Turkey*
Meltem SAPLIOĞLU, *Suleyman Demirel University, Turkey*
Meor Othman HAMZAH, *University Sains Malaysia, Malaysia*
Mujib RAHMAN, *Brunel University, United Kingdom*
Murat KANKAL, *Uludağ University, Turkey*
Murat Vergi TACIROĞLU, *Mersin University, Turkey*
Paula FOLINO, *University of Buenos Aires, Argentina*
Roumiana ZAHARIEVA, *University of Architecture, Bulgaria*
Serdal TERZİ, *Süleyman Demirel University, Turkey*
Sri Atmaja P. ROSYIDI, *Muhammadiyah University of Yogyakarta, Indonesia*
Tamer BAYBURA, *Afyon Kocatepe University, Turkey*
Veli BAŞARAN, *Afyon Kocatepe University, Turkey*

Reviewer List of the 1st Issue

Erdem ÇOBAN, *Halic University, Turkey*
Hümeyra BOLAKAR TOSUN, *Aksaray University, Turkey*
Jülide ÖNER, *Uşak University, Turkey*
Kadir Berkhan AKALIN, *Eskişehir Osmangazi University, Turkey*
Kemal SAPLIOĞLU, *Suleyman Demirel University, Turkey*
Tuba KÜTÜK, *Recep Tayyip Erdogan University, Turkey*

Contents / İçindekiler

Articles / Makaleler	Sayfa
Abolfazl ASADI Numerical Analysis of the Distribution of Plastic Points in the Earth Dams Concerning the Water Level, Berm, and Displacement <i>Toprak Barajlardaki Plastik Noktaların Dağılımının Su Seviyesi, Banket ve Deplasmanına Göre Sayısal Analizi</i>	1-15
Esmâ SARIŞIN, Mehmet YILMAZ, Erkut YALÇIN Atık Madeni Yağ İçeren Kapsüllerin Bitümlü Sıcak Karışımların Mekanik Özelliklerine Etkisi <i>Effect of Capsules Containing Waste Mineral Oil on Mechanical Properties of Hot Mix Asphalt</i>	17-30
Hüseyin KÖSE, Osman Nuri ÇELİK Yüksek Yoğunluklu Polietilen Atık Plastiğinin Pirolizinden Elde Edilen Ürünlerin Ilık Karışım Asfalt Katkısı Olarak İncelenmesi <i>Investigation of Products Obtained from Pyrolysis of High Density Polyethylene Waste Plastic as a Warm Mix Asphalt Additive</i>	31-46

Araştırma Makalesi / Research Article

**Numerical Analysis of the Distribution of Plastic Points
in the Earth Dams Concerning the Water Level, Berm, and
Displacement**

*¹Abolfazl ASADI

¹*Iran University of Science and Technology, School of Civil Engineering, Tehran, Iran,
abolfazl_asadi@civileng.iust.ac.ir, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9366-0072>*

Geliş / Received: 05.01.2022;

Kabul / Accepted: 07.04.2022

Abstract

Failure of earth dams under seismic conditions may cause disastrous economic damage and loss of lives. Therefore, it is necessary to conduct a seismic safety evaluation and numerical analysis effectively. This paper presents the results of the distribution of plastic points of earth dams. The analysis of plastic points shows the plasticize variations in the body of the earth dam in pre-failure conditions. An inhomogeneous embankment with an upright clay core, which is 10 m high, was studied in three different water levels considering harmonic and static mode using the PLAXIS 2D software. The existence of water causes increasing the number of plastic points in the structure and increasing the amount of displacement. As a result, it changes the situation of plastic points and the location of the appearance of the maximum displacements. The number of plastic spots in first, second and third modes are in order 26, 47 and 116. Also, the amount of maximum horizontal displacement in first, second and third modes are in order 72, 97 and 227 mm.

Keywords: *Numerical analysis, Plastic points, Earth dams, Water level, Berm.*

*¹Sorumlu yazar / Corresponding author

Bu makaleye atıf yapmak için

Asadi, A. (2022). Numerical Analysis of the Distribution of Plastic Points in the Earth Dams Concerning the Water Level, Berm, and Displacement. *Journal of Innovations in Civil Engineering and Technology (JICIVILTECH)*, 4(1), 1-15.

Toprak Barajlardaki Plastik Noktaların Dağılımının Su Seviyesi, Banket ve Deplasmanına Göre Sayısal Analizi

Öz

Toprak barajların sismik koşullar altında çökmesi oldukça yıkıcı ekonomik hasarlara ve can kayıplarına neden olabilir. Bu nedenle sismik güvenlik değerlendirmesi ve sayısal analizlerin etkin bir şekilde yapılması gerekmektedir. Bu makale, toprak barajların plastik noktalarının dağılımının sonuçlarını sunmaktadır. Plastik noktaların analizi, göçme öncesi koşullarda toprak barajın gövdesindeki plastikleşme değişimlerini gösterir. 10 m yüksekliğinde dik kil çekirdekli homojen olmayan bir dolgu, PLAXIS 2D yazılımı kullanılarak harmonik ve statik mod dikkate alınarak üç farklı su seviyesinde incelenmiştir. Suyun varlığı yapıdaki plastik nokta sayısının artmasına ve yer değiştirme miktarının artmasına neden olmaktadır. Sonuç olarak, plastik noktaların durumunu ve maksimum yer değiştirmelerin görünümünün yerini değiştirir. Birinci, ikinci ve üçüncü modlarda plastik nokta sayısı 26, 47 ve 116'dır. Ayrıca birinci, ikinci ve üçüncü modlarda maksimum yatay yer değiştirme miktarı sırasıyla 72, 97 ve 227 mm'dir.

Anahtar kelimeler: Sayısal analiz, Plastik noktalar, Toprak Baraj, Su Seviyesi, Banket.

1. Introduction

Water flow in the body earth dam has several effects on soil or any structure that is in contact with it. These effects are different in soil. First, the water velocity tends to move soil particles and disturb the arrangement of fine particles toward the space between bigger particles. Due to the second effect of flow, the seepage or hydraulic gradient may transfer a part of soil mass downstream of the soil structure and lead to the boiling phenomenon.

The third effect is the erosion of soil mass that advances from exiting spots of backward water flow and creates a channel for free water flow in the earth's body of the dam. This phenomenon is known as piping. The last effect of internal pressures in existing water inside the body of the soil reduces the resistance of soil and eliminates internal friction, weakens soil mass, and destroy the dam (Sadrnezhad 2005). Lacy and Prevost (1987) numerically investigated the nonlinear seismic response of earth dams. Yegian, Marciano, and Ghahraman (1991) studied risk analysis of an earth dam considering the seismic condition. Chugh (2013) studied the stability of a circular dam for radial cracking considering three-dimensional numerical analysis. Salmasi and Mansuri (2014) evaluated the impact of using horizontal drains for decreasing the effect of seepage in a homogeneous earth dam. A weak form quadrature element method was used by Yuan and Zhong (2016) to analyze unconfined seepage in earth dams considering three-dimensional analysis. Pelecanos,

Kontoe, and Zdravković (2016) studied dam-reservoir interaction on the dynamic response. The results showed that the acceleration could be notably affected by the upstream reservoir considering certain cases of concrete dams. Mortazavi Zanjani, Soroush, and Khoshini (2016) numerically investigated fault rupture propagation in earth dams considering steady-state seepage. Tan et al. (2017) conducted a seepage analysis of earth dams taking into account the spatial variability of hydraulic parameters. Rashidi and Haeri (2017) evaluated the behavior of the Gavoshan dam during construction and the first impounding. A numerical two-dimensional (2D) analysis was conducted based on a finite difference method (FEM) on the largest cross-section of the dam using the results of device measurements and back analysis. The stochastic finite element method (SFEM) was used by Mouyeaux et al. (2018) to perform a probabilistic analysis of an earth dam. Fukuchi (2018) evaluated the several empirical methods for predicting the seepage discharges and free surface locations in earth dams (Fukuchi 2018). Zhang et al. (2022) studied the dam deformation in the early stage of internal erosion by using a numerical method (Zhang, X., Wang, C. Y., Wong, H., Jiang, T., & Dong n.d.).

In earth dams, potential earthquake damage may be expressed using crest settlement as criterion, using dynamic analysis, or simplified approaches. Costigliola et al. (2022) compared the results obtained from different methods of soil dam seismic response analysis. They showed how the use of complete

dynamic analysis and traditional approaches, rather than substituting for each other, could be synergistic in supporting the interpretation of the seismic response of the dam (Costigliola, R. M., Mancuso, C., Pagano, L., & Silvestri 2022).

Evaluation of seismic performance and post-earthquake operating conditions in earth dams is very important. Considering the soil resistance parameters of the dam and foundation, a proper definition of seismic scenarios at the dam site, the use of advanced methods to study the most critical seismic mods of the dam Is an effective factors in the optimal performance of the dam (Biondi et al. 2021).

In this study, the impact of water level on the distribution, number of plastic points, and location of the maximum horizontal displacement of earth dams are investigated by PLAXIS software. The plastic points' analysis provides an efficient method for studying the resistance of earth dams under earthquake loading. The earthquake-induced displacement could be used for examining the resistance of the earth dam. Also, this paper considers the fluid-soil interaction, which could have a significant effect on the dynamic reaction of the earth dam. Prediction of expansion of the plastic region could be an appropriate method for predicting the occurrence of cracks in the theory of plasticity. Using this method allows analyzing the structure through a linear or nonlinear elastic model and then predicting the occurrence of hydraulic

cracking by a failure criterion such as the Mohr-Coulomb model.

2. Numerical procedure

As mentioned before, this study concerns the analysis of the dynamic evaluation of earth dams. In this section, the numerical procedure is defined as follows:

- The behavior of both the shell and clay core of the earth dam is described using the Mohr-Coulomb criterion.
- The analysis is performed using the finite element method (FEM) in the PLAXIS software. All analyses were performed under the plane strain condition.
- Fig. 1 shows the dimensions of the numerical model. The slope of crusts is 1 to 4 and the slope of the core in upstream and downstream is 2 to 3. The width of the embankment floor is 85 m, each crust is 26 m, and the width of the core floor was considered 33 m. Due to the permeability of the lower part of the foundation, the clay core did not extend in the foundation. It is of note that the behavior of the foundation of bed and clay core was considered untrained while the soil of the embankment crusts was considered drained. Also, the bottom boundary was fixed in both directions; however, the side boundaries were fixed in a horizontal direction.
- The soil characteristics of the embankment are represented in Table 1. Dam geometry (Fig. 1) and material properties (Table 1) are randomly selected.

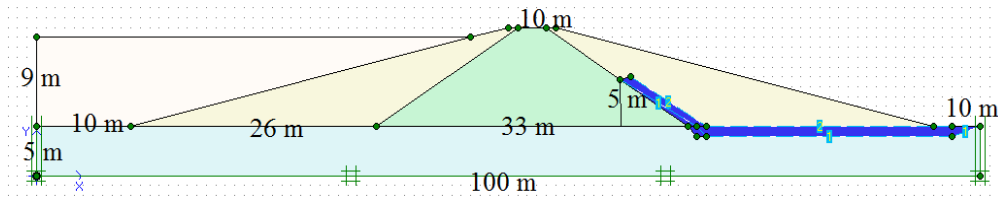


Figure 1. Geometry of the numerical model

The stages for the embankment making are as follows:

1. Bed stabilization
2. Making clay core perpendicular with 1 to 2 gradients
3. Making upstream crust with 1 to 4 gradients
4. Performing drainage in 1-m depth under the downstream crust and 5-m height oblique
5. Making downstream crust with 1 to 4 gradients
6. Performing drainage with 1-m depth under the downstream crust and 5-m height as oblique
7. Making downstream crust with 1 to 4 oblique
8. Bram construction with crust materials
9. Using filter materials at the boundary of the drainage layer and the body of the dam.

Table 1. Soil properties of the embankment

Soil properties	Up-stream crust	Down-stream crust	Dam core	Foundation	Drainage
Cohesion (kN/m^2)	1	1	30	2	0
Angle of internal friction ($^\circ$)	35	35	5	15	40
Dry unit weight of soil (kN/m^3)	18	18	16.5	18	18
Saturated unit weight of soil (kN/m^3)	21	21	18	19.5	22
Coefficient of permeability, for horizontal flow (m/day)	1	1	0.001	0.01	9
Coefficient of permeability, for vertical flow (m/day)	0.1	0.1	0.001	0.01	9
Modulus of Elasticity (kN/m^2)	2×10^4	2×10^4	2×10^3	10×10^4	10×10^4
Poisons' ratio	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3

Stages for making embankment were conducted in phase definition of computations and time for sedimentation was considered 120-day after dam impoundment.

- This study was done with 3 different modes of underground water level, where a harmonic analysis was done for each mode. In the first mode, the water level was at the bed of embankment. In the second mode, the water level was 9 m higher than the embankment bed and the phreatic line did not enter the downstream crust. In the third mode, the water level was 9 m higher than the embankment bed the phreatic line enters downstream crust. The phreatic line is drawn for hypothetical modeling simplicity.
- Regarding the harmonic analysis of embankment, the time for applying harmonic load was 10 s and the frequency of 10 Hz was applied to the model.
- The expansion of the plastic area in the PLAXIS software is taken as a plastic point.
- The slope of the ground is zero. The lower boundary is bounded in both directions, and the displacement of the lateral boundaries is bounded horizontally.

- A relatively medium mesh was used for the regions.

3. Results and Discussion

The plastic points created at the body of earthen dams are indeed the same region in which the strain of plastic has been created. So, it could be concluded that the development of cracks occurs due to loading within the same plastic region. In fact, after loading, due to the pressure of the water or any other loading of the crack, it forms a Δa within the plastic region. In this case, the desired area reached softness. After that, the full plastic regions are formed.

The results obtained from graphical diagrams show that the maximum plastic points in the heel of earth dam and dam crest were developed in clay core on the boundary of upstream crust and in the downstream foundation on the adjoin boundary of downstream crust. The mentioned points are critical positions in earth dams. Fig. 2 shows the position of plastic points of the model in harmonic mode with fine mesh considering three loading phases: a) First loading phase (initial state), b) Second loading phase, and c) Third loading phase.

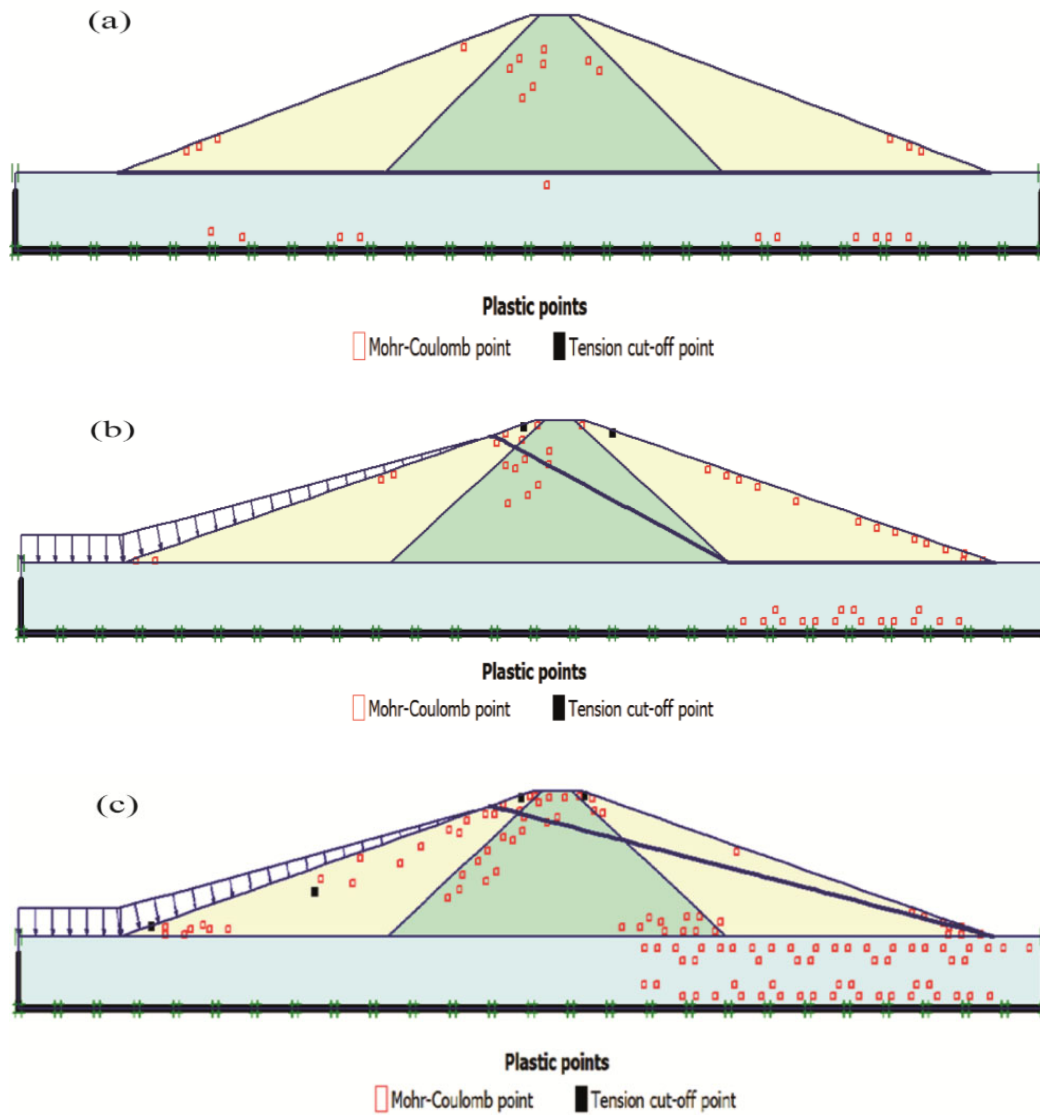


Figure 2. (a) Distribution of plastic points in first loading phase (initial state), (b) distribution of plastic points in second loading phase, (c) distribution of plastic points in third loading phase.

The analysis results revealed that the number of plastic points increased with increasing water heights. Compared with the first loading phase, the number of plastic points increased by 80% and

346% in the second loading phase and third loading phase, respectively. Tension cut-off point: There are places where the soil is stretched (black points).

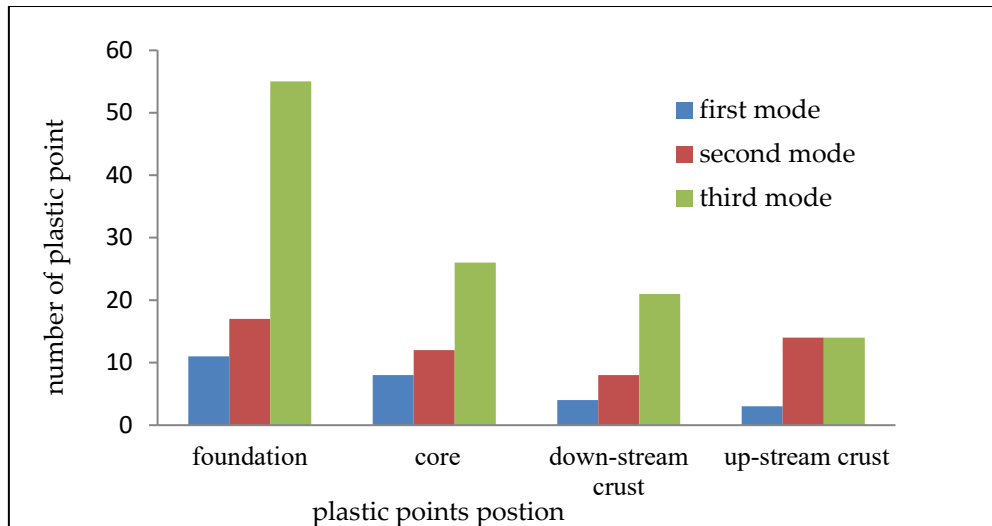


Figure 3. The number of plastic points of the model in harmonic mode considering fine mesh.

According to the results represented in Fig. 3, by increasing the water level the number of plastic points increased, as well. The existence of water increases plastic points in the body embankment and foundation bed. It also increases the amount of displacement and changing the situation of plastic points and the location of maximum displacement. The number of plastic points in the first, second, and third modes is 26, 47, and 116, respectively. Also, the amount of maximum horizontal displacement in the first, second, and third modes is 72, 97, and 227 mm, respectively. The highest increase in the number of plastic points is related to the foundation and core of the earth dam; i.e., 24 and 21%, respectively. Moreover, the least increase in the number of plastic points is related to the upstream and downstream crust; i.e., 26% and 15%, respectively.

According to Fig. 4 and 5, with constructing drainage and increasing the berm height, the number of the plastic points was decreased. The existence of drainage caused the prevention of entering the water to the downstream housing crust and a 54% reduction in plastic points at the body of embankment and bed of foundation, leading to a change of the plastic region situation.

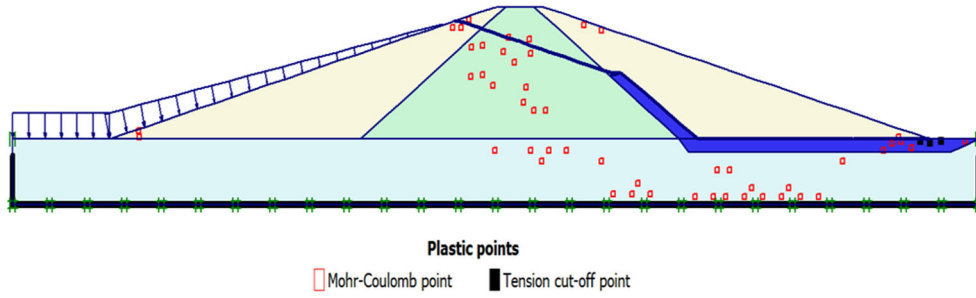


Figure 4. Distribution of plastic points at the body of soil dam and drainage

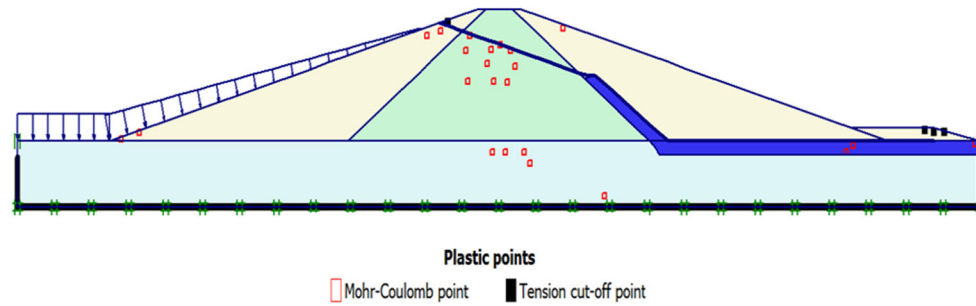


Figure 5. Distribution of plastic points at the earth dam, height of drainage and berm is 1-meter

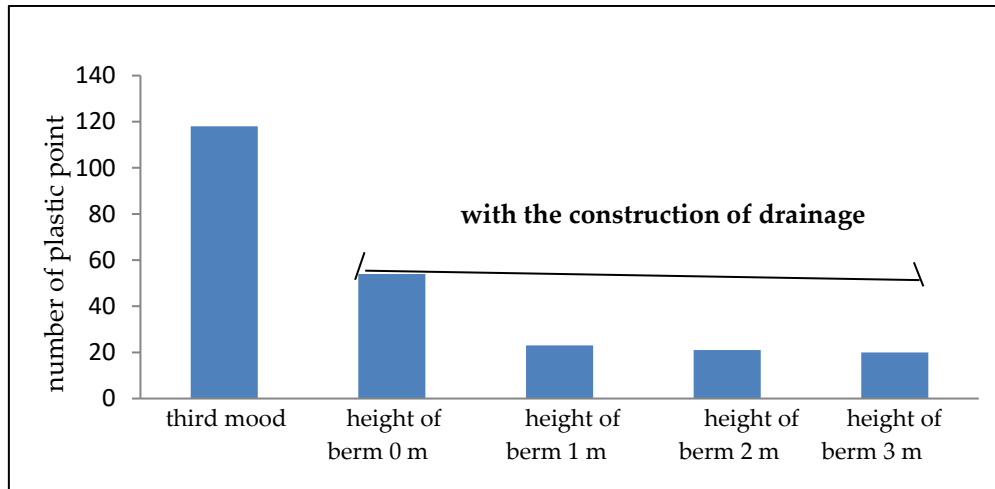


Figure 6. Comparison of the number of plastic points at the different modes.

Figure 6 compares the number of plastic points in five modes: without berm and drainage (third mode), constructing of drainage, constructing of drainage with constructing berm at three heights of 1, 2, and 3 m. The results showed that by

constructing a berm at a height of 1 m, the number of plastic points is significantly reduced. Afterward, no large decrease occurs in the number of points with increasing berm height. After making 1 m of the berm, the number of plastic points in the heel of the dam (possible place of boiling) declines while further increasing the height of the berm reduces the displacement of the embankment. Hence, the 1-m berm was sufficient in this model.

By increasing the water level, the maximum horizontal displacement and strain increase in the dam crest in harmonic and static modes. Overall, in the static mode, the water level increases 9 m from the embankment bed, and the maximum horizontal displacement increases from 72 mm to 227 mm. These changes in the maximum strain in the dam crest are caused by changes in

water level, this strain increases from 0.0005% in the first mode to 0.95% in the third mode. By increasing the water level, the additional pore water pressure created in the center of the embankment core. This strain was increased by increasing the water level. The results obtained from the analysis of displacement and pore water pressure are represented in Table 2. Increasing the displacement in the embankment leads to the creation of tensile and pressure points in the structure. With increasing stress at these points, the strain increases and leads to the formation of a plastic region at this point, and then in one larger part. In this zone, materials cannot have much resistance against the applied stresses and thus the strain in the sample is sharply increased. Plastic deformation ends with material failure. The results obtained from displacement analysis and expansion of plastic points are presented in Fig. 7 to 10.

Table 2: The maximum value of horizontal displacement in dam crest in static and harmonic modes and the extreme excess pore pressure in harmonic mode

Mode of water level	Maximum of horizontal displacement (<i>mm</i>)	Extreme excess pore pressure, harmonic (<i>KN/m²</i>)	Extreme principal strain
1	69.32	239.34	0.0426
2	96.85	254.13	0.0508
3	117.19	254.85	0.0628

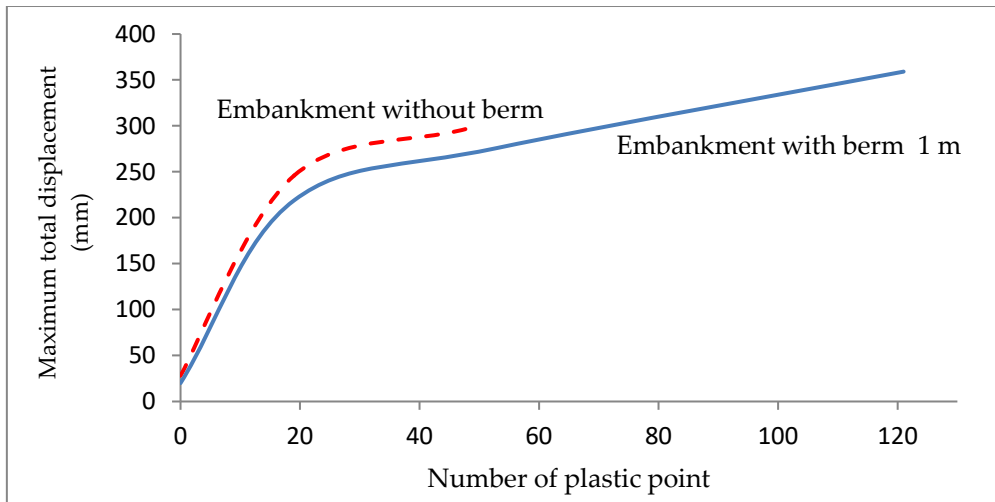


Figure 7. Maximum total displacement of the dam against the number of plastic points.

Figure 7 presents the maximum total displacement of the body of the dam against the number of plastic points. As can be seen, by increasing the number of plastic points, the maximum total displacement is increased. The solid line represents the maximum total displacement of the dam against the

number of plastic points for the embankment with a berm height of 1 m in the downstream. On the other hand, the dashed line is for the embankment without berm. Building a berm will control the movement and reduce of displacement of the dam.

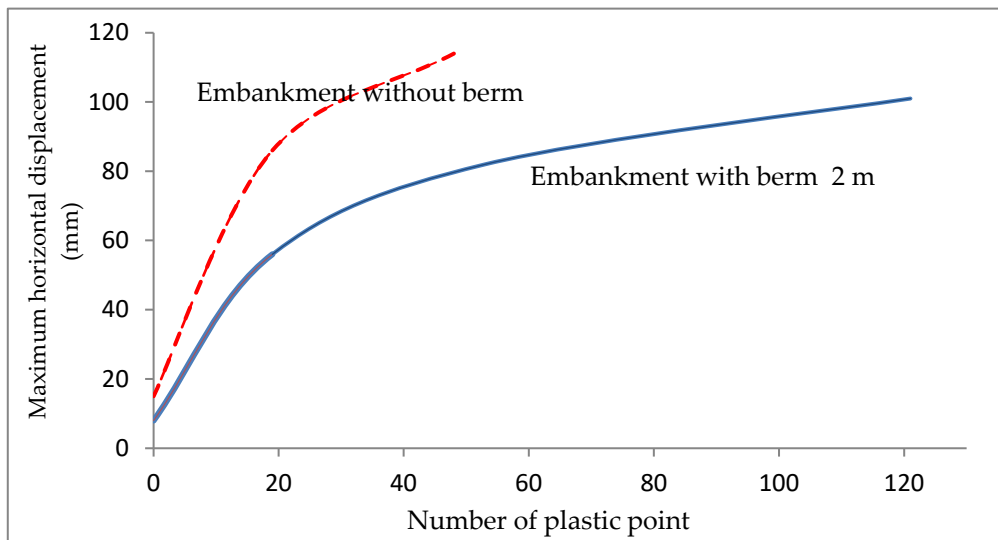


Figure 8. Maximum horizontal displacement of dam against the number of plastic points.

Fig. 8 illustrates the maximum horizontal displacement of the dam against the number of plastic points. With an increase in the area of the plastic zone, the maximum horizontal displacement was increased as well. The solid line represents the maximum horizontal displacement of the dam

against the number of plastic points for the embankment with a berm height of 2 m in the downstream. Also, the dashed line indicates an embankment without berm. The construction of the berm reduces the horizontal displacement of the embankment.

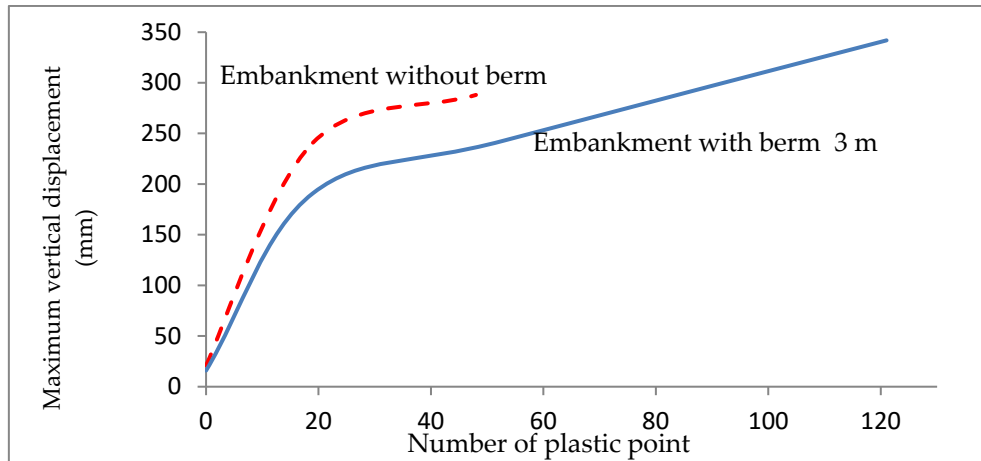


Figure 9. Maximum vertical displacement of dam against the number of plastic points.

Figure 9 shows the maximum vertical displacement of the dam against the number of plastic points. An increase in the plastic area results in a consequent increase in the maximum vertical displacement of the soil. The solid line represents the maximum vertical displacement of the dam against the number of plastic points for the embankment with a berm height of 3 m in the downstream. Besides, the dashed line shows the embankment without the berm. The construction of the berm reduces the vertical displacement of the embankment.

Figure 10 indicates the relation between total strains of dam body against the

number of plastic points. By increasing the plastic area, the total strain in the dam is increased as well. In some models due to soil uplift in the downstream, the strain is increased suddenly (The 5th point). This increase is apparent in cases where the berm did not construct at the downside of the dam. In such cases, the tensile zone was created in the dam body. The reason for the sudden increase in strain at the 5th point (Fig. 10) was soil piping in downstream of the earth dam. Thus, by making berms with a height of 1 and 2 meters, the value of strain was tempered in the 6th and 7th points, respectively.

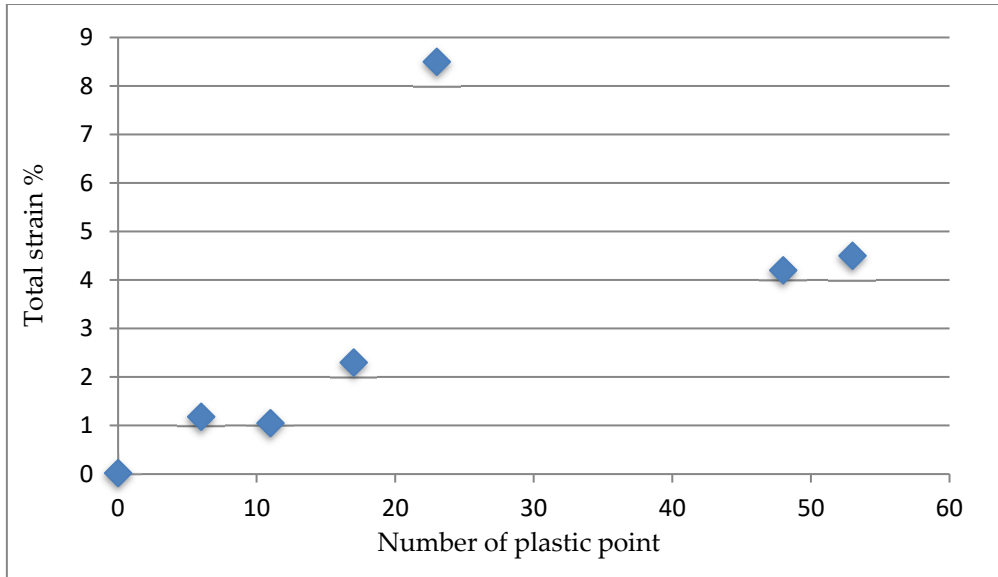


Fig. 10. Maximum total strain of the dam against the number of plastic points.

4. Conclusions

The present study was conducted to predict the failure path by expanding the plastic area in the body of the earthen dam. The failure in the body of the earthen dam begins with the appearance of plastic points in critical areas. Next, the number of plastic points and their joining increase in the plastic area. Finally, the failure line is created. The study of the expansion of plastic points is of great assistance to predict the location of the failure as well as taking measures to prevent failure. In this paper, the effect of drainage and bromine construction on the expansion of the plastic area is investigated. Soil and water interaction by influencing the resistance parameters of soil and tension surface changes in the soil had remarkable effects on the bearing capacity of the soil. Also, they

considerably affected the value of displacements and the changes originated from executing the embankment.

- The analysis results showed that when the water level was placed in the embankment floor, the plastic and maximum displacement points were located in the center of the embankment crest, heel, and head of crusts. In the harmonic mode, the maximum displacement took place in the embankment crest.
- In the second mode of loading, the maximum displacement and plastic points increased 44% and the situation of plastic points in clay core moved toward the upstream crust. In the harmonic mode, the maximum amount of displacement took place in

embankment crest and upstream crust.

- In the third mode of loading, by increasing of phreatic water level inside the body, the value of displacement and plastic points increased by 77%. As a result, the plastic points formed not only on the surface of crusts but also in embankment heel and head and clay core heel.
- By increasing the water level to the height of 9 m, the maximum displacement position in harmonic mode from dam crest in the first mode moved toward dam heel and head in the third mode.

5. References

- Biondi, G., Cascone, E., Aliberti, D., & Rampello, S. (2021). Screening-level analyses for the evaluation of the seismic performance of a zoned earth dam. *Engineering Geology*, 280, 105954.
- Chugh, A. K. (2013). Stability assessment of a circular earth dam. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 37(17), 2833-2859.
- Costigliola, R. M., Mancuso, C., Pagano, L., & Silvestri, F. (2022). Prediction of permanent settlements of an upstream faced earth dam. *Computers and Geotechnics*, 144, 104594.
- Fukuchi, T. (2018). New high-precision empirical methods for predicting the seepage discharges and free surface locations of earth dams validated by numerical analyses using the IFDM. *Soils and Foundations*, 58(2), 427-445.
- Lacy, S. J., & Prevost, J. H. (1987). Nonlinear seismic response analysis of earth dams. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 6(1), 48-63.
- Rashidi, M., & Haeri, S. M. (2017). Evaluation of behaviors of earth and rockfill dams during construction and initial impounding using instrumentation data and numerical modeling. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 9(4), 709-725.
- Mouyeaux, A., Carvajal, C., Bressolette, P., Peyras, L., Breul, P., & Bacconnet, C. (2018). Probabilistic stability analysis of an earth dam by Stochastic Finite Element Method based on field data. *Computers and Geotechnics*, 101, 34-47.
- Pelecinos, L., Kontoe, S., & Zdravković, L. (2016). Dam-reservoir interaction effects on the elastic dynamic response of concrete and earth dams. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 82, 138-141.
- Sadmezhad, Seyed Amiradin. (2005). Earth Dams and Their Numeric Analysis. In persian. Tehran: University of teacher training shahid Rajayi.
- Salmasi, F., & Mansuri, B. (2014). Effect of homogeneous earth dam hydraulic conductivity ratio (K_x/K_y) with horizontal drain on seepage. *Indian Geotechnical Journal*, 44(3), 322-328.

- Tan, X., Wang, X., Khoshnevisan, S., Hou, X., & Zha, F. (2017). Seepage analysis of earth dams considering spatial variability of hydraulic parameters. *Engineering Geology*, 228, 260-269.
- Yegian, M. K., Marciano, E. A., & Ghahraman, V. G. (1991). Seismic risk analysis for earth dams. *Journal of Geotechnical Engineering*, 117(1), 18-34.
- Yuan, S., & Zhong, H. (2016). Three dimensional analysis of unconfined seepage in earth dams by the weak form quadrature element method. *Journal of Hydrology*, 533, 403-411.
- Zanjani, M. M., Soroush, A., & Khoshini, M. (2016). Two-dimensional numerical modeling of fault rupture propagation through earth dams under steady state seepage. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 88, 60-71.
- Zhang, X., Wang, C. Y., Wong, H., Jiang, T., & Dong, J. (2022). Modeling dam deformation in the early stage of internal seepage erosion—Application to the Teton Dam, Idaho, before the 1976 incident. *Journal of Hydrology*, 605, 127378.

Araştırma Makalesi / Research Article

Atık Madeni Yağ İçeren Kapsüllerin Bitümlü Sıcak Karışımların Mekanik Özelliklerine Etkisi

¹Esmâ SARIŞIN, ²Mehmet YILMAZ, ³Erkut YALÇIN

¹Malatya Turgut Özal Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği, Malatya, Türkiye, esma.sarisin@ozal.edu.tr, ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-4466-6862>

²Fırat Üniversite, Mühendislik Fakülte, İnşaat Mühendisliği Bölüm, Elazığ, Türkiye, mehmetyilmaz@firat.edu.tr, ORCID ID <http://orcid.org/0000-0002-2761-2598>

³Fırat Üniversite, Mühendislik Fakülte, İnşaat Mühendisliği Bölüm, Elazığ, Türkiye, erkutyalcin@firat.edu.tr, ORCID ID <http://orcid.org/0000-0002-6389-4211>

Geliş / Recieved: 18.04.2022;

Kabul / Accepted: 29.06.2022

Öz

Günümüzde ulaşım açısından bitümlü sıcak karışımların önemi oldukça fazladır. Bitümlü sıcak karışımlar zamanla artan trafik yükü ve iklim koşullarına bağlı olarak rijitliğin artmasıyla kırılğan hale gelmektedir. Bu durum üst yapıda çatlaklara ve bozulmalara neden olmaktadır. Bu nedenle bitümlü karışım tabakalarının düzenli olarak gözlenmesi, bakım ve onarım faaliyetlerinin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Ancak ekonomik veya teknik nedenlerden ötürü bu her zaman mümkün olmayabilir. Bu nedenle kendini onarabilen bitümlü sıcak karışım fikri son yıllarda önem kazanmıştır. Çalışma kapsamında kapsüllerde onarıcı malzeme olarak araçların bakımları sonrası açığa çıkan atık madeni yağ kullanılmıştır. Optimum şartları sağlayan kapsüller üretilmiştir. Kapsüller, karışımlara dört farklı oranda (agrega ağırlığına %0,25, %0,50, %0,75 ve %1,00) ilave edilmiştir. BSK numunelerine üç noktalı eğilme yorulma deneyi uygulanmıştır. Ayrıca kapsül ilavesinin karışımların mekanik özellikleri üzerindeki etkisini değerlendirilmiştir.

Anahtar kelimeler: Bitümlü sıcak karışım, Kapsül, Atık madeni yağ, Yaşlanma

*¹Sorumlu yazar / Corresponding author

Bu makaleye atıf yapmak için

Bakır, E., Yılmaz, M. & Yalçın, E. (2022). Makale başlığı. *Journal of Innovations in Civil Engineering and Technology (JICIVILTECH)*, 4(1), 17-30.

Effect of Capsules Containing Waste Mineral Oil on Mechanical Properties of Hot Mix Asphalt

Abstract

Nowadays, the importance of hot bituminous mixtures in terms of transportation is quite high. Bituminous hot mixes become brittle with the increase in stiffness due to the increasing traffic load and climatic conditions over time. This situation causes cracks and deterioration in the pavement. Therefore, it is necessary to observe the bituminous mixture layers regularly, and to carry out maintenance and repair activities. However, this may not always be possible for economic or technical reasons. For this reason, the idea of self-healing hot mix with bitumen has gained importance in recent years. Within the scope of the study, waste mineral oil, which is released after the maintenance of the vehicles, was used as a reparative material in the capsules. Capsules providing optimum conditions have been produced. Capsules were added to the mixtures in four different ratios (0.25%, 0.50%, 0.75% and 1.00% by weight of aggregate). Four different cures were applied to the bituminous hot mixtures. Three-point bending fatigue test was applied to BSK samples. In addition, the effect of capsule addition on the mechanical properties of the mixtures was evaluated.

Keywords: *Hot mix asphalt, Capsule, Waste mineral oil, Aging*

1. Giriş

Bitümlü malzemeler, kullanım kolaylığı, ekonomikliği, performansı ve geri dönüştürülebilirliği nedeniyle yol yapımında yaygın olarak kullanılmaktadır (Partlı vd., 2003). Bitümlü malzemeler, petrolün damıtılmasından elde edilen hidrokarbonlardan oluşan ve yapışkan özelliklere sahip olan koyu renkli termoplastik bir malzeme olan bitümden yapılmıştır (Read, 2003). Bitümlü malzemelerin kullanıldığı asfalt karışımlar dünyada yol kaplaması yapımında en yaygın kullanılan kaplama türüdür (Papagiannakis & Masad, 2008). Agregalar, bitümlü karışımların ana bileşenleri olup bitümlü sıcak karışımların stabilitesine katkıda bulunan bir iskelet meydana getirirler (Valdes vd., 2015). Bitümlü sıcak karışımların daha yumuşak kısmı ise, trafik yüklemeye koşullarında karışımın esnekliğini artıran, filler ile bitüm karışımından oluşan mastiktir. Bununla birlikte, asfalt kaplamalar yıllarca mekanik ve termal streslere ve çevresel etkilere (hava oksidasyonu, UV radyasyonu, nem) maruz kaldıklarında, bitüm ve mineral agregalar arasındaki ara yüzde ayrılma meydana gelerek bitümlü malzemelerin çatlamasıyla sonuçlanabilir (Airey & Choi, 2002; Airey, 2003). Çatlaklar, asfalt kaplamalarda meydana gelen başlıca sorunlardan biridir. Bitümlü malzemelerdeki çatlama, nihayetinde asfalt kaplamalarda geri dönüşü olmayan hasara neden olup bu da her ülkenin karayolları için büyük bakım ve onarım maliyetlerine ihtiyaç duyulmasıyla sonuçlanır (Sultana vd.,

2013). Bu nedenle son zamanlarda, kendini iyileştiren bitümlü malzemelerin geliştirilmesine dayalı olarak, erken bir aşamada çatlak kapanmasını sağlamak için farklı yaklaşımlar ve teknolojiler önerilmiştir (Ayar vd., 2016). Kendini iyileştiren malzemeler, hizmet ömürleri boyunca kendilerine verilen hasarı (kısmen) onarma becerisine sahip yapay veya sentetik olarak oluşturulmuş malzemeler olarak tanımlanır (Van der, 2007). Günümüzde araştırmacılar, biyolojik sistemlerin kendini iyileştirme mekanizmalarını taklit eden, yani sürekli hasar algılama ve otonom onarım (Vander (2009) gibi yeni biyo-esinlenmiş kendini iyileştiren yapı malzemeleri geliştirmeye çalışmaktadır. Bu bakış açısıyla ve bitümün termoplastik doğası göz önüne alındığında, şu anda esas olarak bitümlü malzemelerde çatlak iyileşmesini desteklemek için iki yaklaşım kullanılmaktadır: Birincisi, harici olarak tetiklenen ısıtma yoluyla bitümün sıcaklığını artırarak viskozitesini düşürmek için basit bir yaklaşımdır (Liu vd., 2009). İkinci yaklaşım ise, bitümle karışabilen gençleştirici ajanlar kullanılmasıdır (Shen vd., 2007; Norambuena-Contreras vd., 2019; Norambuena-Contreras vd., 2020). Çalışmada bitümlü sıcak karışımların kendini iyileştirme yöntemlerinden kapsülleme yöntemi kullanılmıştır. Yenileyici olarak atık madeni yağ kullanılmıştır. Üretim için gerekli kimyasallar, belirlenen oranlarda kullanılarak kapsüller üretilmiştir. Saf karışım numuneleri ve dört farklı oran (agrega ağırlığınca %0,25, %0,50, %0,75 ve %1,00) kullanılarak kapsüllü numuneler hazırlanmıştır. Karışım

numuneleri 4 saat 135°C'de kısa dönem yaşlandırmanın ardından 5 gün 85°C'de uzun dönem yaşlandırmaya tabi tutulmuştur. Bu numunelere üç noktalı eğilme yorulma deneyi uygulanarak tekrarlı yükler altındaki dayanıklılığı belirlenmiştir.

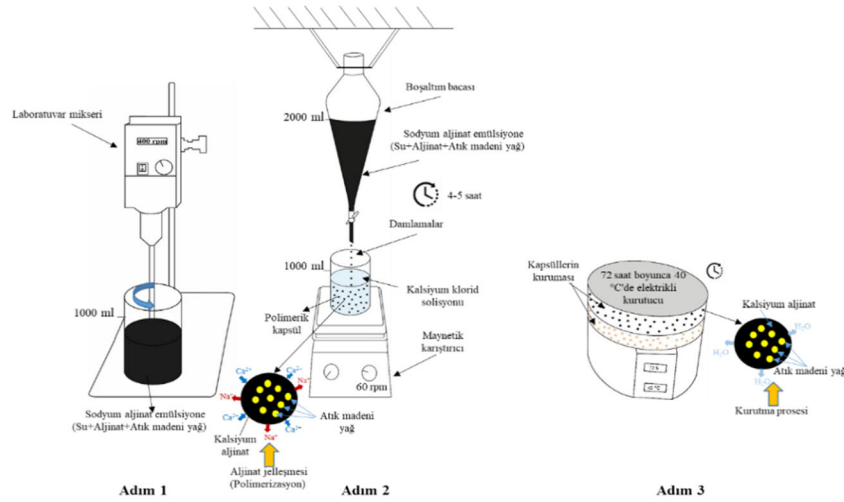
2. Materyal ve Yöntem

2.1. Bağlayıcı

Çalışma kapsamında bitümlü sıcak karışımda çatlak oluşturulması ve bitümlü sıcak karışıma ilave edilen kapsüller içindeki atık yağların kapsüllerin kırılmasıyla serbest kalarak çatlakları onarması hedeflenmektedir. Bu nedenle iyileşmenin daha açık bir şekilde belirlenmesi için kıvamı yüksek bir kaplama sınıfı bitüm olan B 50/70 sınıfı bağlayıcı TÜPRAŞ Batman rafinerisinden temin edilmiştir.

2.2. Kapsül üretimi

Kapsüller, iyonotropik katılaştırıcı aljinatlardan oluşan özel kimyasallar kullanılarak oluşturulmuştur (Yalçın, 2018). Kalsiyum klorit kabuklu kapsüller elde etmek için, 20°C sıcaklıkta 75 g atık madeni yağ ve 525 g su kullanılarak toplamda 600 gramlık emülsiyonlar hazırlanmıştır. Yağ ve su, literatürdeki çalışmalar dikkate alınarak 1 dakika süreyle 400 rpm hızda karıştırılmıştır. Ardından hazırlanan emülsiyonlara 17,5 g sodyum aljinat eklenerek 10 dakika daha 400 rpm hızda karıştırılmıştır. Başka bir beherde 600 ml su içerisine 12 g kalsiyum klorit ilave edilerek solüsyon hazırlanmıştır. Sodyum aljinat, atık yağ ve sudan oluşan karışım 3 mm soket boyutunda 1000 ml basınca sahip damlatma hunisinden kalsiyum klorit solüsyonu içerisine damlatılarak kapsüller oluşturulmuştur. Kapsül üretim aşamalarının şematik gösterimi Şekil 1'de verilmiştir. Şekillenen kapsüller çözeltiden süzülüp saf su ile yıkandıktan sonra 72 saat 40°C de kurutulmaktadır (Norambuena-Contreras vd., 2018).



Şekil 1. Kapsül üretiminin şematik bir gösterimi (Ozdemir vd., 2021)

2.3. Bitümlü sıcak karışım numunelerin hazırlanması

Bu çalışmada kapsülsüz ve kapsüllü asfalt kırıntı numuneleri üretilmiştir. Malzemeler laboratuvarında, karıştırıcı sayesinde 100 rpm karıştırma hızında, belirlenen sıcaklıklarda karıştırılmıştır. Agregalar karıştırılmadan önce 3 saat, bitüm ise 1 saat 170°C'de ısıtılmıştır. Karışım malzemeleri karıştırıcının metalik kâsesine sırasıyla ilave edilmiştir. İlk olarak kaba agrega, daha sonra ince agrega, üçüncü olarak filler malzemesi ve son olarak da bitüm eklenmiştir. Malzemeler yaklaşık 5 dakika boyunca karıştırıldıktan sonra soğutucudan çıkarılan atık madeni yağ içeren kapsüller agrega ağırlığına 4 farklı oranda (%0,25, %0,5, %0,75 ve %1,00) bitümlü sıcak karışıma ilave edilerek 20 saniye boyunca karıştırma işlemine devam edilmiştir. Bağlayıcı

miktarının karışımların mekanik özelliklerine etki etmesini engellemek amacıyla kapsül kullanılarak hazırlanan bitümlü sıcak karışım numuneleri kapsül içermeyen karışımla aynı bitüm içeriğinde (%4,67) hazırlanmıştır. Karışım numuneleri sıkıştırılmadan önce 4 saat 135°C sıcaklıkta, ardından viskozite deneyiyle belirlenen sıkıştırma sıcaklığı olan 158°C sıcaklıktaki etüvde yarım saat bekletilmiştir. Hazırlanan kapsüllü ve kapsülsüz karışımlar %4 hava boşluğu içeriğine ulaşana kadar merdaneli sıkıştırıcı kullanılarak 30,5*40*5 cm ölçülerine sahip prizmatik bir kalıpta sıkıştırılmıştır. Daha sonra elde edilen numuneler, döner testere ile 15 x 7 x 5 cm boyutlarında kesilerek kırıntı numuneler elde edilmiştir (Şekil 2). Son olarak hazırlanan numuneler 5 gün 85°C'de uzun dönem yaşlandırmaya tabi tutulmuştur.



Şekil 2. Çalışmada kullanılan BSK numunesi

2.4. Üç noktalı eğilme yorulma deneyi

Kapsül içeren bitümlü sıcak karışımlarda meydana gelen yorulmanın iyileşmesi, prizmatik asfalt kırıışlerin 3 noktalı tekrarlı dinamik eğilme testine tabi tutulmasıyla incelenmiştir. Yorulma testlerini gerçekleştirmek için UTM cihazı kullanılmıştır. Yorulma testi esnasında kalıcı deformasyonların oluşmasını önlemek için numunenin altına esnek bir membran yerleştirilmiştir. Her bir yükleme dalgası 0,10 saniye sürmüş ve bir sonraki yüklemeden önce 0,15 saniye dinlenme süresi uygulanmıştır. Dolayısıyla yükleme frekansı 4 Hz. olarak elde edilmiştir. Aktüatör ve numunenin her an temas halinde olmasını sağlamak amacıyla minimum 0,15 kN yük tercih edilmiştir.

Kapsül ilavesinin bitümlü sıcak karışımların iyileşme performansı üzerindeki etkisini incelemek için dört farklı maksimum yük seçilmiştir: 1, 1,25, 1,5 ve 1,75 kN. Tüm deneyler 25°C'de gerçekleştirilmiştir. Numunelerin boyalı tarafındaki çatlak oluşumu her 40

yükleme döngüsünde bir fotoğraf çeken f/2.8 açıklığa ve 12Mpx çözünürlüğe sahip statik bir kamera ile sürekli olarak izlenmiştir. Görüntülerin ImageJ® yazılımı ile işlenmesiyle çatlak uzunluğu an an belirlenmiştir. Çatlak uzunluğu, test numunelerinin toplam yüksekliğinin %20'si olduğunda numuneler kırılmış olarak kabul edilmiştir. 3 noktalı eğilme yorulma testi aşağıdaki adımlara göre yapılmıştır:

- 1. Adım:** Bu çalışmada kapsül içeren ve içermeyen asfalt kırıış numuneleri, 3 noktalı eğilme yorulma testlerine başlamadan önce uzun dönem yaşlandırma maksadıyla 5 gün 85°C'deki etüvde yaşlandırılmış ve deney öncesinde 20°C'de 4 saat koşullandırılmıştır. Ayrıca çatlak oluşumunu izleyebilmek için numunelerin yan kısmı beyaza boyanmıştır. Koşullandırma süresinden sonra deney numuneleri iki parça halinde kırılıncaya kadar, 3 noktalı eğilme yorulma deneyine tabi tutulmuştur. Bu aşamada kullanılan numuneler Şekil 3'te gösterilmiştir.



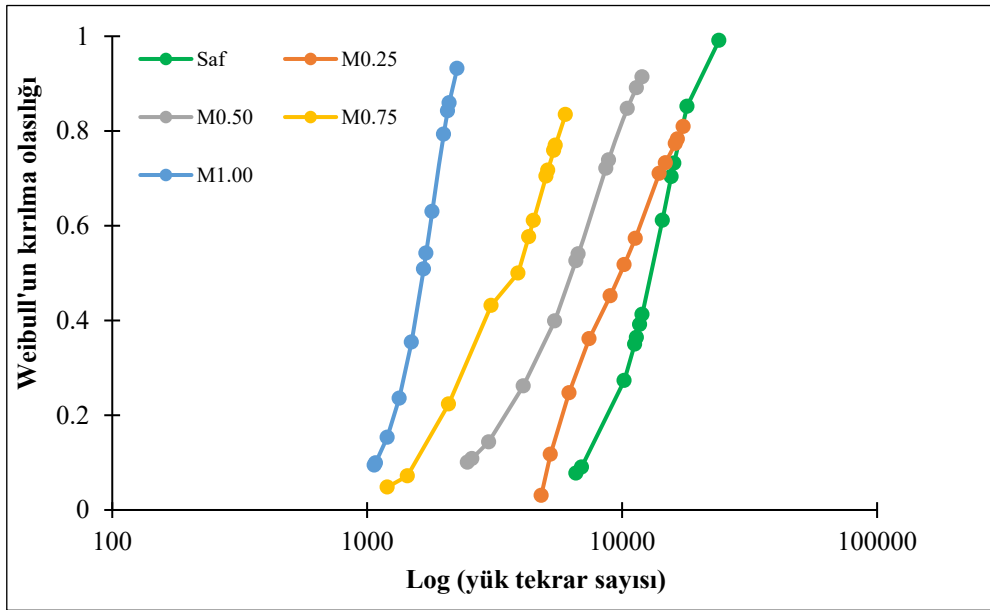
Şekil 3. No.5'i bulmak için kullanılan numuneler

2. **Adım:** Numunelerin ortalama ömrü, tekrar sayısı olarak kabul edilmiştir. Çatlakların testlerin başlangıcından itibaren yaklaşık 1 cm uzunluğa ulaştığı andaki tekrar sayısı bundan sonra $N_{0.5}$ olarak anılacaktır. Karışımların Weibull kırılma olasılığının %50 olmasına dikkat edilmiştir.

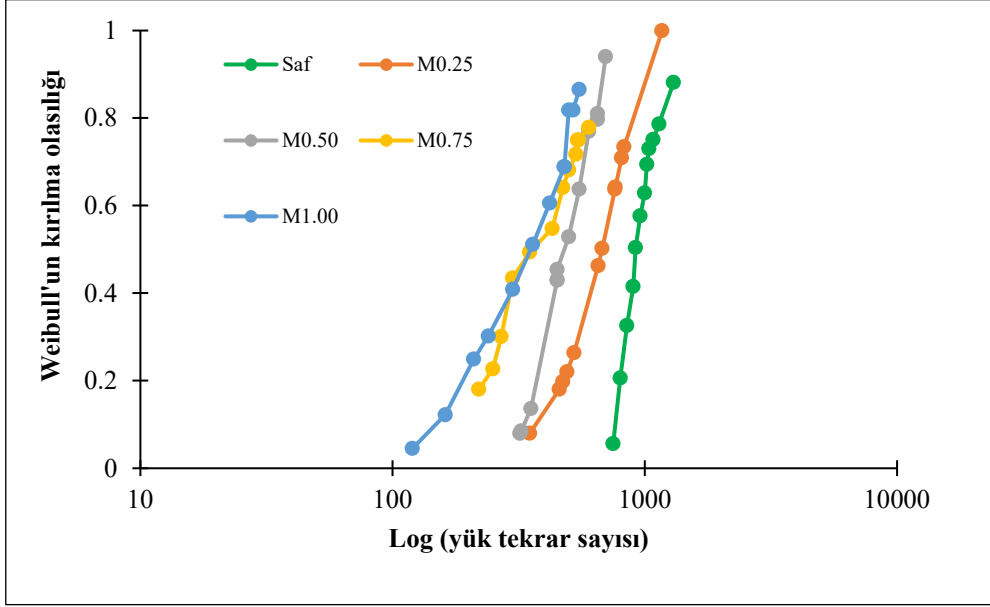
3. Bulgular

Üç nokta eğilme yorulma deneyi, saf karışım ile dört farklı oranda atık madeni yağ içeren kapsül (agrega ağırlığına %0,25, %0,50, %0,75 ve %1,00) kullanılarak hazırlanan karışım numuneleri üzerinde uzun dönemli yaşlanma prosedürü uygulandıktan

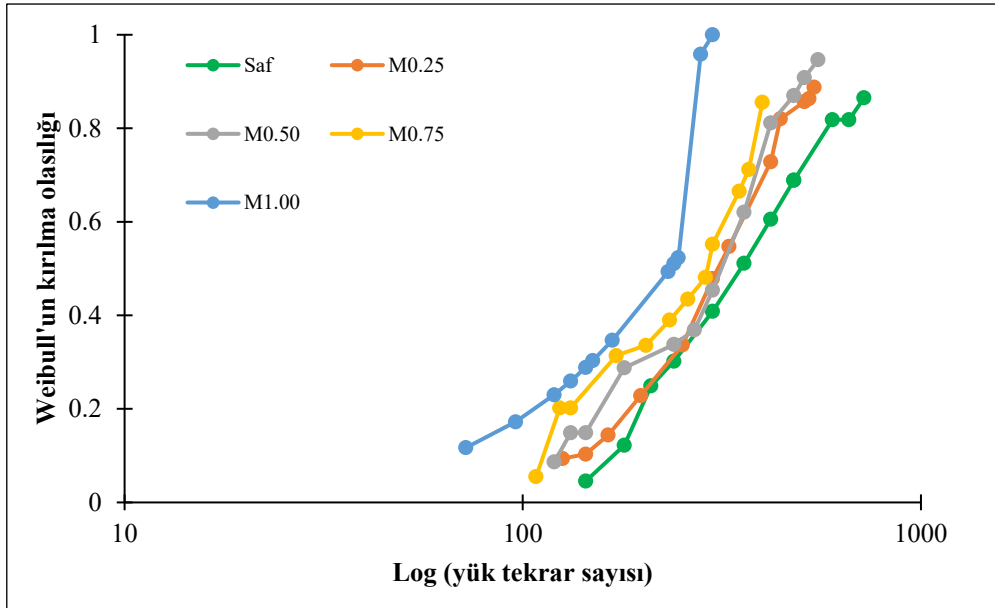
sonra yapılmıştır. Saf karışım ve dört farklı oranda kapsül içeren karışımların 4 farklı yük seviyesinde dayanabildiği yük tekrar sayısının Weibull dağılımı Şekil 4-7'de görülmektedir. Bu eğriler karışım numunelerinin dinlenme periyotları olmaksızın yüke dayandığı dönemleri temsil ederek, kırılma olasılığı 0,5 olduğunda yük tekrar sayısı olarak hesaplanan $N_{0.5}$ 'i bulmak için kullanılmıştır. Şekil 4-7 incelendiğinde yük ve kapsül içeriği arttıkça asfalt karışımların yük tekrar sayılarında yani yorulma ömürlerinde azalma meydana geldiği görülmektedir. Tüm yük seviyesinde en düşük döngü sayısı M1.00 karışımından elde edilirken en yüksek döngü sayısı ise saf karışımdan elde edilmektedir.



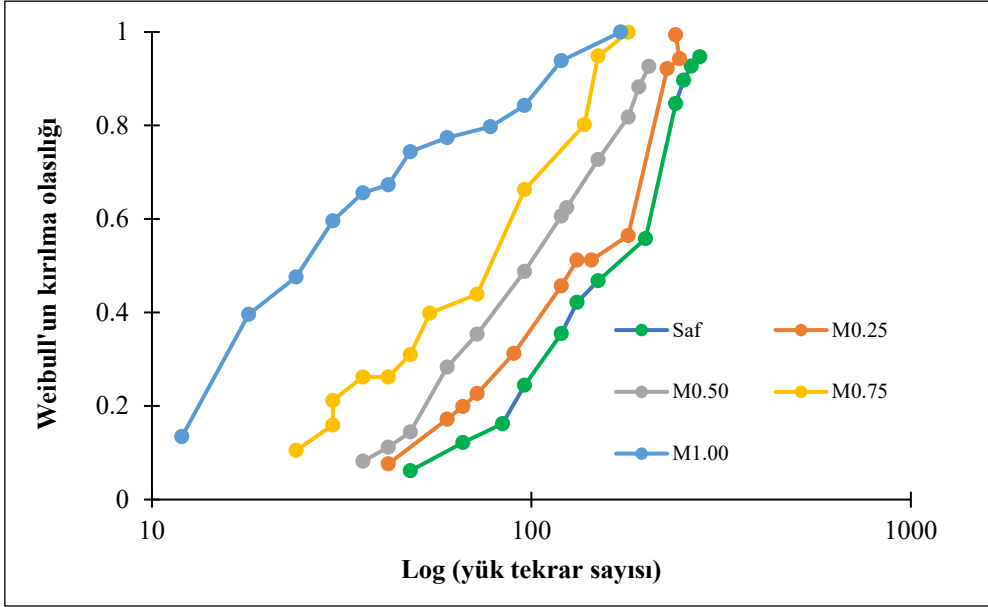
Şekil 4. 1,00 kN yükleme seviyesindeki deney numunelerinin kırılma olasılığı



Şekil 5. 1,25 kN yüklemesindeki deney numunelerinin kırılma olasılığı



Şekil 6. 1,50 kN yüklemesindeki deney numunelerinin kırılma olasılığı

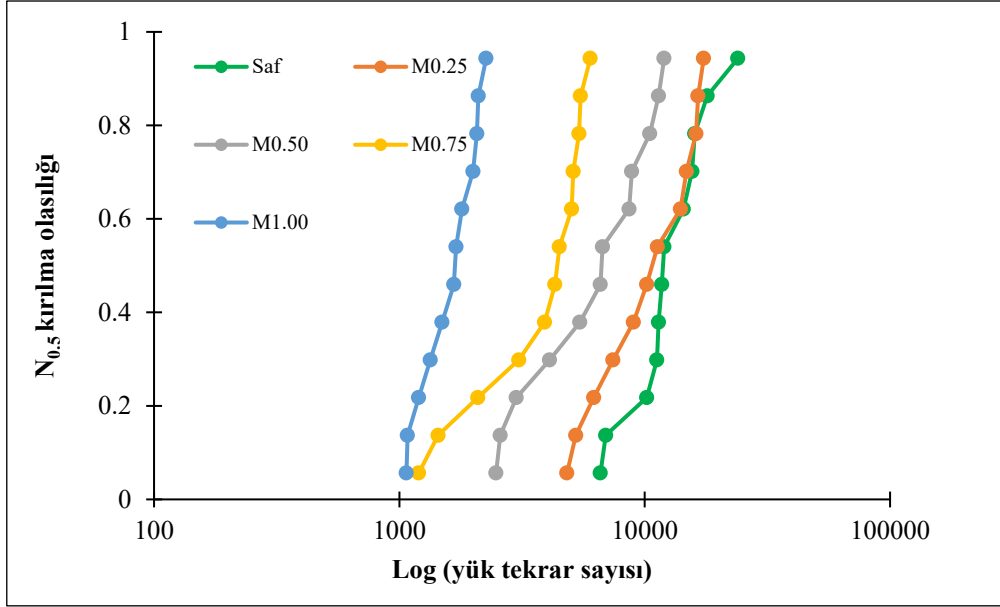


Şekil 7. 1,75 kN yükleme seviyesindeki deney numunelerinin kırılma olasılığı

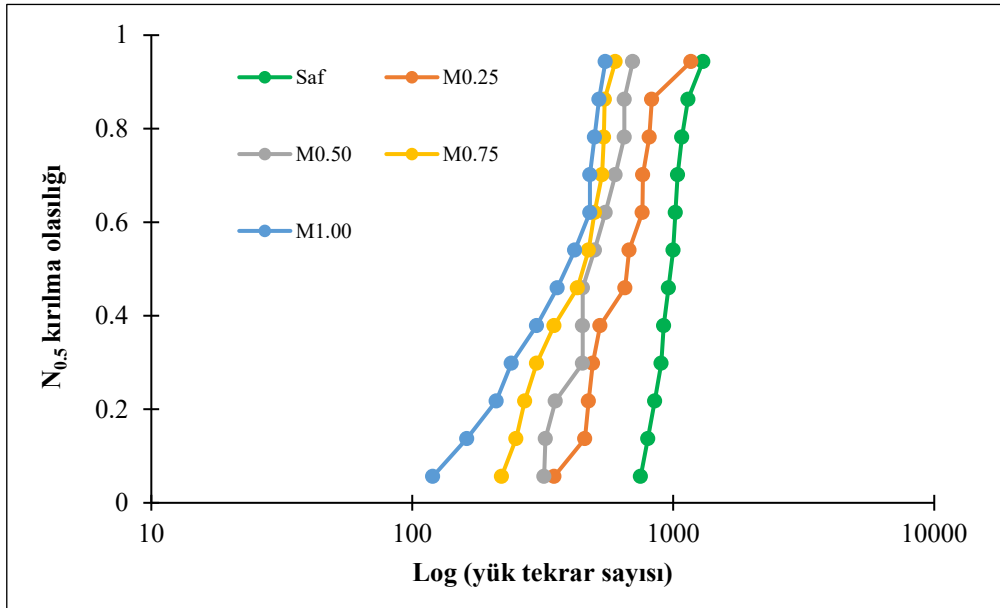
Yorulma ömrü, deneyin her bir yükleme durumu için 10 numunelik bir seri üzerinde tekrarlanmasıyla belirlenmiştir. Numunelerde meydana gelen hasar, yük tekrar sayısı ile artan mekanik enerji birikimi tarafından üretildiğinden, sonuçlara Weibull istatistiksel dağılımı uyarlanmıştır ve numunelerin kırılma olasılığının 0,5 olduğu döngü sayısı ile bir referans yorulma ömrü elde edilmiş ve $N_{0.5}$ olarak tanımlanmıştır. Bu referans değer, asfalt karışım numunelerinden beklenebilecek yorulma ömrü olarak kabul edilmiştir.

Saf karışım ve dört farklı oranda kapsül içeren karışımların 4 farklı yük seviyesinde dayanabildiği yük tekrar sayısının $N_{0.5}$ kırılma olasılığı Şekil 8-11'de görülmektedir. Şekiller incelendiğinde yük seviyesi ve kapsül

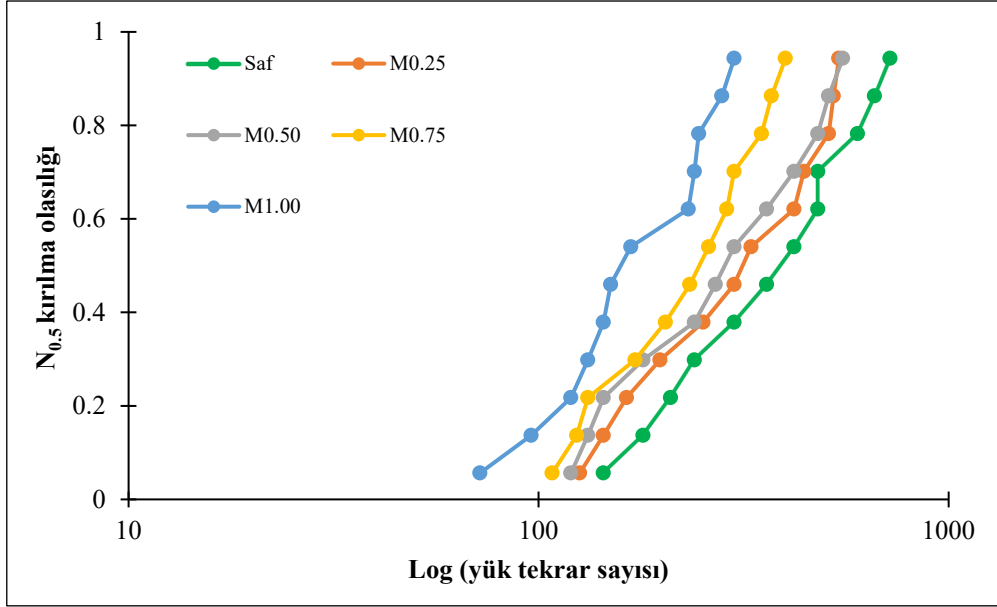
oranı arttıkça yük tekrar sayısının azaldığı görülmektedir. En yüksek yük tekrar sayısını saf karışım verirken, en düşük yük tekrar sayısını M1.00 karışımı vermektedir. Yük seviyesindeki artışlar, yorulma ömründe üstel azalmalara neden olmaktadır. 1,00 kN yük seviyesinden sonra diğer yük seviyelerinde yük tekrar sayılarında ani azalma meydana gelmiştir. $N_{0.5}$ kırılma olasılık değerlerinde kapsül oranı arttıkça çok büyük değişiklikler meydana gelmemektedir. Dört farklı oranda kapsül içeriğine sahip asfalt numunelerinin yük tekrar sayısındaki değişim en fazla 1,75 kN yük seviyesinde meydana gelmiştir. 1,25 kN ve 1,5 kN yük seviyelerinde saf ve dört farklı oranda kapsül içeren numunelerin yük tekrar sayıları birbirlerine yakındır.



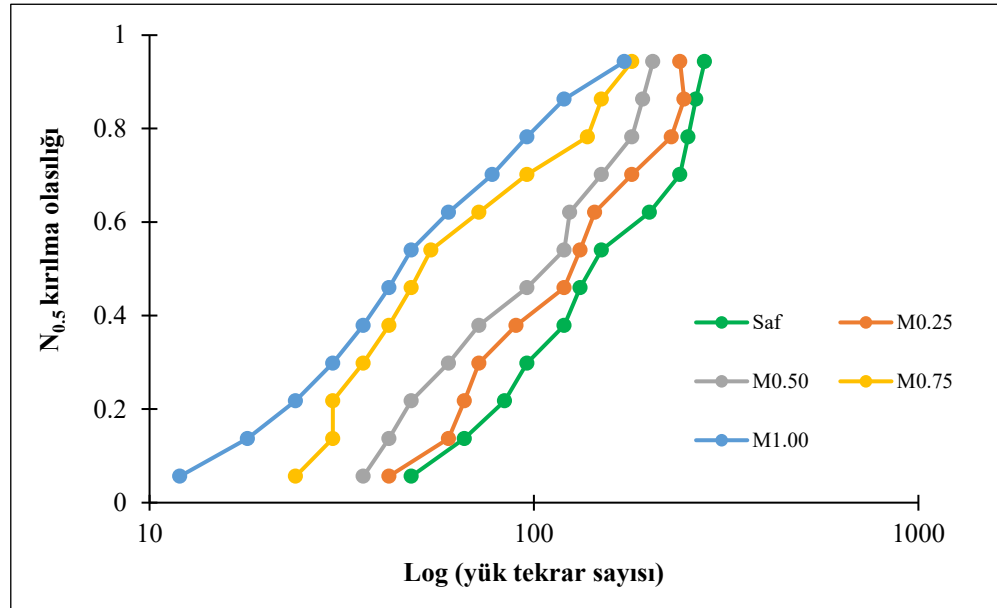
Şekil 8. 1,00 kN yükleme seviyesindeki deney numunelerinin $N_{0,5}$ kırılma olasılığı



Şekil 9. 1,25 kN yükleme seviyesindeki deney numunelerinin $N_{0,5}$ kırılma olasılığı



Şekil 10. 1,5 kN yükleme seviyesindeki deney numunelerinin $N_{0,5}$ kırılma olasılığı



Şekil 11. 1,75 kN yükleme seviyesindeki deney numunelerinin $N_{0,5}$ kırılma olasılığı

Üç noktalı eğilme yorulma testi kullanılarak dört farklı yük seviyesinde, dört farklı oranda kapsül içeriğine sahip asfalt karışım numunelerinin kırılma

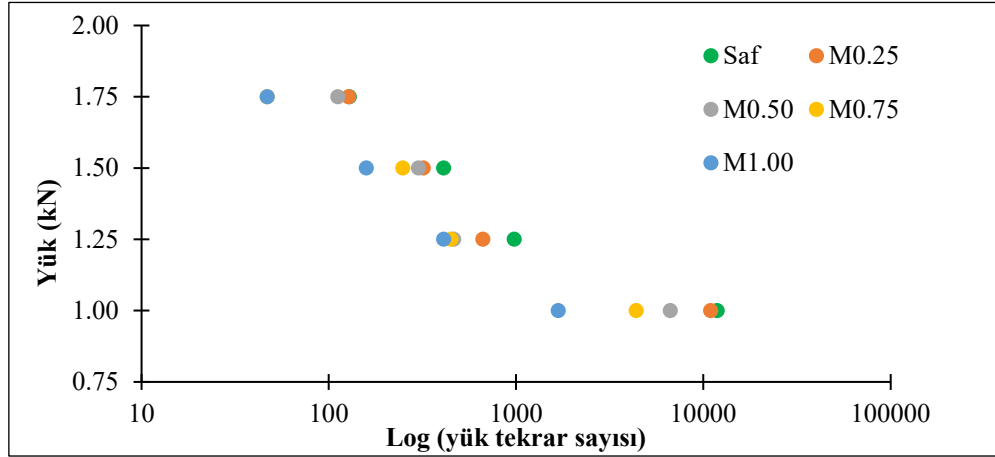
olasılığının 0,5 olduğu andaki yük tekrar sayıları Tablo 1'de verilmiştir. Tabloda görüldüğü üzere yük seviyesi arttıkça yük tekrar sayısında azalma meydana

gelmektedir. En fazla azalma 1 kN'dan 1,25 kN yük seviyesine geçildiği zaman gerçekleşmiştir. Tablo 1'de görüldüğü üzere atık madeni yağın %0,25, %0,50, %0,75 ve %1,00 oranlarında kullanılması durumunda 1,00 kN ve 1,25 kN'deki yük tekrar sayısı değerleri saf karışıma göre sırasıyla %7,83, %43,82, %63,04, %85,82 ve %32,04, %52,55, %54,08, %58,06 azalmıştır. 1,50 kN ve 1,75 kN'deki yük tekrar sayısı değerleri ise saf karışıma göre sırasıyla %22,14, %26,52, %39,41, %61,31 ve %0,78, %13,18, %63,57, %63,57 azalmıştır. Yük seviyesi arttıkça asfalt karışımların yorulma ömürlerinde önemli oranda azalma meydana gelmektedir. Şekil 12'de 0,5 olasılık düzeyinde incelenen beş farklı asfalt karışım numunesi için Wöhler eğrileri

görülmektedir. En yüksek yorulma dayanıklılığını saf ve M0.25 karışım numuneleri sağlamaktadır. En düşük yorulma dayanıklılığı ise M1.00 karışım numunesinde meydana gelmektedir. Beş Wöhler eğrisi paralel olmadığından, beş tip karışım numunesinin dayanıklılığını sayısal olarak karşılaştırmak mümkün değildir. Şekil 12'den elde edilebilecek ana sonuç, asfalt karışım numunelerinde dinlenme süreleri olmadan, kapsüllerin asfalt karışım numunelerinin yük tekrar sayısını azalttığıdır. Kapsül oranı arttıkça bu azalma oranının da arttığı belirlenmiştir. Sonuç olarak kapsül kullanımı asfalt karışımlarının dayanıklılığını azaltmaktadır.

Tablo 1. Yükü bağı olarak asfalt numunelerinin kırılma olasılığı 0,5 olan yük tekrar sayısı

Yük (kN)	Saf	M0.25	M0.50	M0.75	M1.00
1,00	11871	10942	6669	4388	1683
1,25	980	666	465	450	411
1,50	411	320	302	249	159
1,75	129	128	112	47	47



Şekil 12. Wöhler eğrileri (0,5 kırılma olasılığı)

4. Sonuçlar

Kapsüllenmiş atık madeni yağın bitümlü sıcak karışımların yapısını önemli ölçüde değiştirmeden, asfalt karışımlarda meydana gelen yansıtıcı çatlakların büyümesini geciktirebildiğini göstermektedir. Çalışmada üç noktalı eğilme yorulma deneyi kullanılmıştır. Üç noktalı eğilme yorulma deneyi, kapsül içermeyen karışım ile dört farklı oranda atık madeni yağ içeren kapsül (agrega ağırlığına %0,25, %0,50, %0,75 ve %1,00) kullanılarak hazırlanan karışım numuneleri üzerinde uzun dönemli yaşlanma prosedürü uygulandıktan sonra yapılmıştır. Numunelerde meydana gelen hasar, yük tekrar sayısı ile artan mekanik enerji birikimi tarafından üretildiğinden, sonuçlara bir

Weibull istatistiksel dağılımı uyarlandı ve numunelerin kırılma olasılığı 0,5 olan döngü sayısı bir referans yorulma ömrü elde edilerek, $N_{0.5}$ olarak tanımlanmıştır. Yük seviyesindeki artışlar, yorulma ömründe azalmalara neden olmaktadır. Asfalt karışım numunelerinde dinlenme süreleri olmadan, kapsüllerin asfalt karışım numunelerinin yük tekrar sayısını azalttığıdır. Kapsül oranı arttıkça bu azalma oranının da arttığı belirlenmiştir. Sonuç olarak kapsül kullanımı asfalt karışımlarının dayanıklılığını azaltmaktadır.

Teşekkür

Yazarlar, maddi olarak 1001 Program kodlu ve 217M570 numaralı proje ile tez çalışmasını destekleyen Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK)'a teşekkür ederler.

5. Kaynaklar

- Airey, G. D. (2003). State of the art report on ageing test methods for bituminous pavement materials. *International Journal of Pavement Engineering*, 4(3), 165-176.
- Airey, G. D., & Choi, Y. K. (2002). State of the art report on moisture sensitivity test methods for bituminous pavement materials. *Road Materials and Pavement Design*, 3(4), 355-372.
- Ayar, P., Moreno-Navarro, F., & Rubio-Gámez, M. C. (2016). The healing capability of asphalt pavements: a state of the art review. *Journal of Cleaner Production*, 113, 28-40.
- Liu, Q., Schlangen, E., García, Á., & van de Ven, M. (2010). Induction heating of electrically conductive porous asphalt concrete. *Construction and Building Materials*, 24(7), 1207-1213.
- Norambuena-Contreras, J., Yalcin, E., Garcia, A., Al-Mansoori, T., Yilmaz, M., & Hudson-Griffiths, R. (2018). Effect of mixing and ageing on the mechanical and self-healing properties of asphalt mixtures containing polymeric capsules. *Construction and Building Materials*, 175, 254-266.
- Norambuena-Contreras, J., Liu, Q., Zhang, L., Wu, S., Yalcin, E., & Garcia, A. (2019). Influence of encapsulated sunflower oil on the mechanical and self-healing properties of dense-graded asphalt mixtures. *Materials and Structures*, 52(4), 1-13.
- Norambuena-Contreras, J., Arteaga-Perez, L. E., Guadarrama-Lezama, A. Y., Briones, R., Vivanco, J. F., & Gonzalez-Torre, I. (2020). Microencapsulated bio-based rejuvenators for the self-healing of bituminous materials. *Materials*, 13(6), 1446.

- Ozdemir, A. M., Yılmaz, M., Yalçın, E., Vural Kok, B., Norambuena-Contreras, J., & Garcia, A. (2021). Effects of Capsules Containing Waste Oils on the Mechanical Properties of Hot Mix Asphalt: Experimental Approach. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 33(9), 04021242.
- Papagiannakis, A. T., & Masad, E. A. (2008). *Pavement design and materials*. John Wiley & Sons.
- Partl, M. N., Bahia, H. U., Canestrari, F., De la Roche, C., Di Benedetto, H., Piber, H., & Sybilski, D. (Eds.). (2012). *Advances in interlaboratory testing and evaluation of bituminous materials: state-of-the-art report of the RILEM technical committee 206-ATB* (Vol. 9). Springer Science & Business Media.
- Read, J., & Whiteoak, D. (2003). *The shell bitumen handbook*. Thomas Telford.
- Shen, J., Amirghani, S., & Aune Miller, J. (2007). Effects of rejuvenating agents on superpave mixtures containing reclaimed asphalt pavement. *Journal of materials in civil engineering*, 19(5), 376-384.
- Sultana, M., Rahman, A., & Chowdhury, S. (2013). A review of performance based maintenance of road infrastructure by contracting. *International Journal of Productivity and Performance Management*.
- Valdés-Vidal, G., Calabi-Floody, A., Miró-Recasens, R., & Norambuena-Contreras, J. (2015). Mechanical behavior of asphalt mixtures with different aggregate type. *Construction and Building Materials*, 101, 474-481.
- Van Der Zwaag, S. (2007). *Self-healing materials: an alternative approach to 20 centuries of material science*. Delft: Springer.
- Van der Zwaag, S., Van Dijk, N. H., Jonkers, H. M., Mookhoek, S. D., & Sloof, W. G. (2009). Self-healing behaviour in man-made engineering materials: bioinspired but taking into account their intrinsic character. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 367(1894), 1689-1704.
- Yalçın, E. (2018). Development of a self-healing asphalt mixture through the use of encapsulated healing agents/İyileştirici maddeler içeren kapsüller kullanılarak kendini onarabilen bitümlü sıcak karışımların geliştirilmesi.

Araştırma Makalesi / Research Article

**Yüksek Yoğunluklu Polietilen Atık Plastikinin
Pirrolizinden Elde Edilen Ürünlerin Ilık Karışım Asfalt
Katkısı Olarak İncelenmesi**

*¹Hüseyin KÖSE, ²Osman Nuri ÇELİK

¹Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Konya,
Türkiye, hkose@ktun.edu.tr, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2533-6769>

²Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Konya,
Türkiye, oncelik@ktun.edu.tr, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6069-4724>

Geliş / Recieved: 12.05.2022;

Kabul / Accepted: 29.06.2022

Öz

Ilık karışım asfalt (IKA), geleneksel bitümlü sıcak karışımdan (BSK) daha düşük sıcaklıklarda serilip sıkıştırılabilen yeni bir karışım türüdür. Bu çalışmada, yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE) türündeki atık plastiklerin pirolizinden elde edilen çar ve vaks ürünlerin IKA üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çar ve vaks ürünler, sırasıyla 300-350°C ve 450-500°C sıcaklık aralıklarında, 900 gr numune kullanılarak yavaş piroliz yöntemi ile üretilmiştir. Piroliz ürünleri (bitüm ağırlığına %6 oranında) saf bitümle (B50/70) modifiye edilerek 3 farklı formda katkılı bitüm hazırlanmıştır: YYPE_{PÇ} (YYPE piroliz çar) modifiyeli bitüm, YYPE_{PV} (YYPE piroliz vaks) modifiyeli bitüm ve YYPE_{PÇV} (YYPE piroliz çar ve vaks) modifiyeli bitüm. Saf ve modifiye bitümlere penetrasyon, yumuşama noktası ve viskozite testleri yapılarak katkıların bitüm üzerindeki fiziksel değişimleri incelenmiştir. Ayrıca eşdeğer viskoz yöntemi ile modifiye bitümlerin karıştırma-sıkıştırma sıcaklıkları tespit edilmiştir. Bunun yanı sıra, hem saf bitümle hazırlanan BSK'ya hem de piroliz katkıları ile hazırlanan IKA'lara Marshall stabilite-akma analizi yapılmıştır. Bitümlü bağlayıcı test sonuçları gösteriyor ki, piroliz çarı saf bitümü sertleştirirken, vaks ürün yumuşatmaktadır. Dolayısıyla, çar ürünün etkisi ile bitümün penetrasyonu azalırken, yumuşama noktası

*¹Sorumlu yazar / Corresponding author

Bu makaleye atıf yapmak için

Köse, H.& Celik, O. N. (2022). Yüksek Yoğunluklu Polietilen Atık Plastikinin Pirrolizinden Elde Edilen Ürünlerin Ilık Karışım Asfalt Katkısı Olarak İncelenmesi. *Journal of Innovations in Civil Engineering and Technology (JICIVILTECH)*, 4(1), 31-46.

artmaktadır. Vaks ürünün etkisiyle ise tersi sonuçlar elde edilmiştir. Saf bitüme kıyasla modifiye bitümlerin karıştırma-sıkıştırma sıcaklıklarındaki azalma değerleri $YYPE_{PV}$, $YYPE_{PÇV}$ ve $YYPE_{PÇ}$ modifiyeli bitümler için sırasıyla 24°C, 14,5 °C ve 3,5°C olmuştur. İKA'ların Marshall stabilite değeri, BSK'dan az bir farkla daha düşük olmasına rağmen şartname limit değerini rahatlıkla sağlamıştır.

Anahtar kelimeler: *Ilık Karışım Asfalt, Yavaş Piroliz, Plastik Atığı, Yüksek Yoğunluklu Polietilen Piroliz Çarı ve Yüksek Yoğunluklu Polietilen Piroliz Vaksı*

Investigation of Products Obtained from Pyrolysis of High Density Polyethylene Waste Plastic as a Warm Mix Asphalt Additive

Abstract

Warm mix asphalt (WMA) is a new technology that can be mixed and compacted at lower temperatures than hot mix asphalt (HMA). In this study, the effect of pyrolytic products (char and wax) obtain from the waste plastic (High Density Polyethylene-HDPE) on warm mix asphalt was investigated. Char and wax products were produced by slow pyrolysis method using 900 gr samples at the temperature ranges of 300-350°C and 450-500°C, respectively. These products were modified with virgin bitumen (at a rate of 6% by weight of bitumen) in the form of 3 modified bitumen: HDPE Pyrolysis Char (HDPE_{PC}) modified bitumen, HDPE Pyrolysis Wax (HDPE_{PW}) modified bitumen, HDPE Pyrolysis Char+Wax (HDPE_{PCW}) modified bitumen. Penetration, softening point and viscosity tests were carried out to determine the physical properties of modified bitumen and virgin bitumen. Besides, Marshall Test Method was conducted to compare stability performance of the mixtures. The results show that, the addition of char decreased penetration value and increased softening point of virgin bitumen. The opposite results were obtained with the effect of the wax. According to the equivalent viscous method, the mixing and compaction temperature of the bituminous mixture can be reduced by 24°C, 14,5°C and 3,5°C, respectively, when HDPE_{PW}, HDPE_{PCW} and HDPE_{PC} are added to the bitumen. Marshall Test results show that the stability values of the WMA samples were slightly lower than the HMA sample and were also above the specification limits.

Keywords: *Warm Mix Asphalt, Slow Pyrolysis, Plastic Waste, High Density Polyethylene Pyrolysis Char, High Density Polyethylene Pyrolysis Wax.*

*1Sorumlu yazar / Corresponding author

Bu makaleye atıf yapmak için

Köse, H.& Celik, O. N. (2022). Yüksek Yoğunluklu Polietilen Atık Plastiğinin Pirolizinden Elde Edilen Ürünlerin Ilık Karışım Asfalt Katkısı Olarak İncelenmesi. *Journal of Innovations in Civil Engineering and Technology (JICIVILTECH)*, 4(1), 31-46.

1. Giriş

Ilık karışım asfalt (IKA), üretim ve serim sıcaklığı bitümlü sıcak karışımdan (BSK) 20-40°C daha düşük olan bir karışım türüdür. Karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığının düşük olması IKA'ya çeşitli avantajlar sağlamaktadır. Bunlardan bazıları aşağıda belirtilmiştir (Rubio et al., 2012):

- Emisyonları azaltır.
- Zararlı gazların olmamasından dolayı daha iyi çalışma koşulları sağlar.
- Karışımın üretilmesi daha az enerjiyle sağlanır.
- Karışımın serilmesi işleminden çok kısa bir süre sonra yol trafiğe açılır.
- Karışım daha uzun mesafelere taşınabilir.
- Yol inşaa sezonunu uzatır.

IKA sınıflandırmasında kullanılan en yaygın yöntem, kullanılan teknolojiye göre sınıflandırma yapmaktır. Bu yöntemle IKA 3 gruba ayrılır:

- Organik katkılar: Organik katkılı teknolojilerde bitüme parafin veya benzeri maddeler katılır. Sıcaklık, katılan maddenin erime noktasının üzerine çıktığında bitümün viskozitesinde düşmeler meydana gelir. Böylece karışımın karıştırma-sıkıştırma sıcaklık değeri azalır.
- Köpükleme yöntemi: Bu yöntem kendi içinde iki alt kategoriye ayrılır:
 - Su içerikli (dolaylı) teknolojiler: Su içerikli teknolojiler, sentetik zeolit kullanır. Bu ürün, alkali

metallerin alümino silikatlarının bir bileşimidir ve hidrotermal kristal yapıdadır. Kristal yapının bünyesinde, sıcaklık arttıkça buharlaşan su bulunmaktadır. Buharlaşan suyun etkisiyle bitümlü bağlayıcı köpüklenir. Bu köpüklenme işleminin etkisi ile bitümlü bağlayıcının viskozitesi azalır. Dolayısıyla karışımın üretim sıcaklığı da düşürülmüş olur.

- Su bazlı (doğrudan) teknolojiler: Bu yöntemde köpüklenme etkisi oluşturmak için ihtiyaç duyulan su, özel enjektörler yardımıyla doğrudan karışıma ilave edilir. Su hızlı bir şekilde buharlaştıkça, büyük hacimli köpük elde edilir.

- Kimyasal katkılar: Bu yöntemde bağlayıcıya çeşitli kimyasal katkıları eklenir. Karışımın üretim ve sıkıştırma sıcaklığını düşürmek için viskozite azaltmaya veya köpükleme işlemine ihtiyaç duyulmaz. Onun yerine, yüzey etkinleştirici maddeler, polimerler, emülgatörler kullanılarak karışımın işlenebilirlik, sıkıştırılabilirlik ve yapışkanlık özellikleri artırılır.

Plastik atıklar hem insan sağlığını hem de çevreyi olumsuz etkilemesi sebebiyle dünya genelinde büyük bir problem haline gelmiştir. Plastik talebindeki artışın devam etmesi atık plastik sorununun da hızlı bir şekilde büyümesine sebep olmaktadır. Avrupa Plastik Hammadde Üreticileri Birliğinin

2020 yılında yayınlanan raporuna göre, Avrupa'da 2018 yılında 61,8 milyon ton plastik üretilmiş olup, bunun 29 milyonu geri toplanmıştır (PlasticsEurope, 2020). Yaklaşık 7 milyon ton plastik ise geri dönüşüme girmeden toprağa gömülmekte ya da serbest atık olarak doğada var olmaya devam etmektedir. Dolayısıyla hala çok önemli miktarda ömrünü tamamlamış plastik, çevreyi kirletmeye devam etmektedir. Bu nedenle birçok araştırmacı, plastik atıkların geri dönüşümüne yardımcı olmak adına çeşitli çalışmalar yürütmektedir. Bu çalışmalarda, plastik atıklar hem doğrudan hem de çeşitli işlemlerden (piroliz vb.) geçirilerek bitüm veya bitümlü karışım içerisinde kullanılabilir. Aşağıda bu çalışmada kullanılacak plastik türü olan polietilenin asfaltta kullanımı ile ilgili yapılan literatür incelemesine yer verilmiştir:

- Almeida, Capitão, Estanqueiro ve Picado-Santosc (2021) tarafından yapılan bir çalışmada, DYPE (Düşük yoğunluklu polietilen) türünde plastik film atığının IKA ve BSK üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışmada, DYPE bitüm ağırlığınca %6 oranında kuru yöntemle IKA ve BSK'ya dahil edilmiştir. IKA katkısı olarak Sasobit-Redux® kullanılmıştır. Karışımlara yapılan tekerlek izi testinde, IKA numuneleri BSK'dan çok daha başarılı sonuç vermiştir. Tekerlek izindeki azalmanın BSK'ya göre %67 oranlarında olduğu belirtilmiştir.
- Costa, Silva, Peralta ve Oliveira (2019) yaptıkları bir çalışmada, atık

polimerlerden EVA (Etilen vinil asetat) ve YYPE'nin, 35/50 penetrasyon dereceli bitüm üzerindeki reolojik etkilerini incelemiştir. Ayrıca, SBS (Stiren-Butadien-Stiren) modifiyeli bitümle de karşılaştırma yapılmıştır. Çalışmanın sonucunda, EVA ve SBS modifiyeli bitümün viskozite ve reolojik özellikler açısından birbirine yakın sonuçlar verdiği, ancak YYPE modifiyeli bitümün özellikle MSCR (Multiple Stress Creep Recovery) sonuçlarının istenilen düzeyde olmadığı belirtilmiştir.

- Arabani ve Pedram (2016) tarafından yapılan bir çalışmada, YYPE atık plastiğinin ve atık camın BSK'nın performansını nasıl etkilediği araştırılmıştır. Çalışmada, atık cam maksimum 4,75 mm boyutta doğrudan karışıma dahil edilirken, YYPE 0,075-0,15 mm boyutlarında bitüme ilave edilmiştir. Karışımlara yapılan testlerden biri olan dolaylı çekme testinde, YYPE miktarı arttıkça karışımın yorulmaya karşı direncinin arttığı, optimum dozajın ise %6-10 arasında olduğu görülmüştür. Benzer sonuçlar dinamik sünme testinde de elde edilmiştir.
- Attaelmanan, Feng ve AI (2011) yaptıkları bir çalışmada, yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE) plastiğinin bitümlü sıcak karışımın performansı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Test sonuçlarına göre, YYPE ilavesi ile karışımın

Marshall stabilitesi yükselmiştir. Marshall oranındaki en büyük artış (%55), %5 YYPE ilavesi sonucu gerçekleşmiştir. YYPE içerikli karışımların dolaylı çekme gerilmesi oranı %85'ten daha fazla çıkmıştır. Bu sonuç, bu tip modifiye karışımların nem hassasiyetine karşı direncinin yüksek olduğunu göstermektedir.

- Shang, Wang ve Zhang (2011) tarafından yapılan bir çalışmada, geri dönüştürülmüş çapraz bağlı polietilen (PEX) maddesinin pirolizinden elde edilen katı ürünün ılık karışım asfalt performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Elde edilen katı piroliz ürününün hem saf bitüm hem de SBS modifiyeli bitüm üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Yapılan DSR (Dynamic Shear Rheometer) test sonuçlarına göre, PEX katkı maddesi hem saf bitümün hem de SBS modifiyeli bitümün kompleks modül değerini arttırmış, faz açısını ise azaltmıştır.
- Al-Hadidy ve Tan (2009) tarafından yapılan bir çalışmada, DYPE atık plastiğin pirolizinden elde edilen katı ürünün taş mastik asfalt (TMA) üzerindeki etkileri incelenmiştir. Test sonuçları gösteriyor ki, LDPE ilavesi bitümün penetrasyon değerini düşürürken, yumuşama noktası değerini arttırmıştır. %6 DYPE oranına kadar duktilite

sonuçları şartname limitlerini sağlamıştır. Yine %6 oranında DYPE kullanımı ile Marshall stabilitesi (en yüksek değerine ulaşarak) BSK'ya kıyasla %58 daha yüksek sonuç vermiştir.

- Hınıslioğlu ve Ağar (2004), YYPE içeren plastik atıkların, BSK'da polimer katkısı olarak kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Çalışmada, YYPE içeren modifiye bitümler farklı oranlarda (%4-6-8), farklı karıştırma sıcaklıklarında (145-155-165°C) ve farklı sürelerde (5-15-30 dk) hazırlanmıştır. Hazırlanan karışımlara ve saf bitümle hazırlanan kontrol karışımına Marshall testi yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre, optimum modifikasyon parametreleri %4 YYPE, 165°C karıştırma sıcaklığı ve 30 dk karıştırma süresi olarak belirlenmiştir.

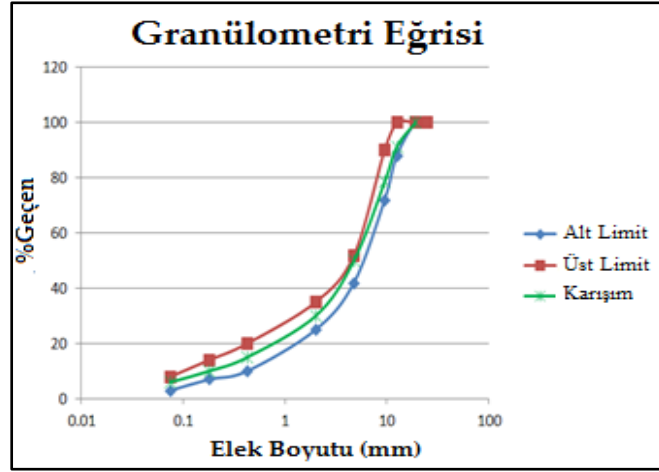
Literatür incelendiğinde, YYPE atık plastiğinin kullanımı ile ilgili yapılan çalışmaların önemli bir kısmının BSK performansını geliştirmek üzere yapıldığı görülmektedir. Bu çalışmada, literatürden farklı olarak YYPE atık plastiğinin yavaş pirolizinden elde edilen çar ve vaks ürünlerin İKA performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir.

2. Materyal ve Yöntem

2.1 Materyal

Bu çalışmada, atık plastik olarak Petilen YY S türünde yüksek yoğunluklu polietilen yağ bidonları kullanılmıştır. Plastikler, Konya'da çeşitli sanayi bölgelerinden küçük parçalara ayrılmış vaziyette toplanmıştır. Kontrol numunesi olarak kullanılan B50/70

sınıfına ait saf bitüm, Kırıkkale Rafinerisi'nden temin edilmiştir. Bitümlü karışımlarda kullanılan agrega kalker olup, Karaömerler taş ocağından alınmıştır. Agrega gradasyonu, Karayolları Teknik Şartnamesi Aşınma Tabakası Tip 1 Gradasyonu'na (Karayolları Teknik Şartnamesi, 2013) uygun olacak şekilde hazırlanmıştır (Şekil 1).



Şekil 1. Hazırlanan agrega karışımına ait granülometri eğrisi

2.2 Yöntem

Çalışmada, YYPE atık plastikler piroliz yöntemi ile çar ve vaks ürünlere dönüştürülmüştür (Şekil 2). Çar ve vaks ürünlere ait bazı fiziksel özellikler Tablo 1'de gösterilmiştir. Elde edilen piroliz ürünleri saf bitümle ıslak yöntem ile

karıştırılarak modifiye bitümler hazırlanmıştır. Dolayısıyla, İKA yöntemi olarak organik katkı ilaveli yöntem kullanılmıştır. Saf ve modifiye bitümlere penetrasyon, yumuşama noktası ve viskozite testleri yapılmıştır. BSK ve İKA'lara ise Marshall stabilite-akma analizi uygulanmıştır.

Tablo 1. YYPE piroliz çar ve vaks ürünlerin fiziksel özellikleri

Fiziksel Özellikler	YYPE Piroliz Çarı	YYPE Piroliz Vaksı
Yoğunluk (g/cm ³)	0,92-1,11	0,89-0,91
Fiziksel Görünüm	Katı	Vaks
Renk	Siyah	Açık Sarı
Suda Çözünürlük	Çözünmez	Çözünmez



Şekil 2. YYPE piroliz çar (solda) ve vaks ürünü (sağda)

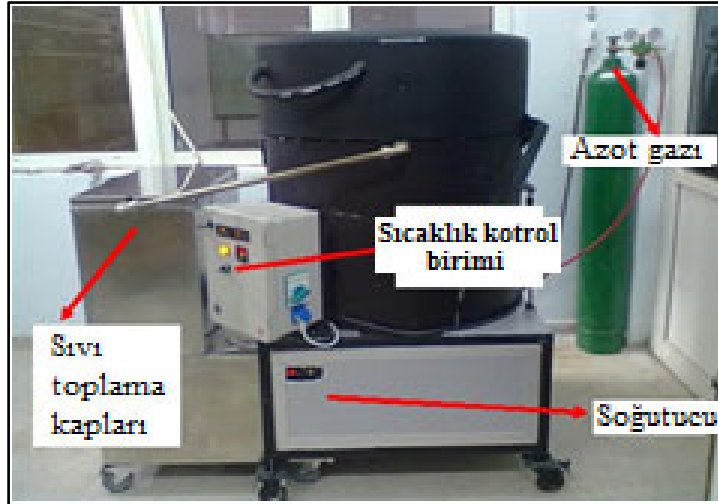
2.2.1 Piroliz sistemi

Piroliz, malzemelerin oksijensiz ortamda yüksek sıcaklıkta termal olarak ayrıştırılması işlemidir. YYPE pirolizi, Şekil 3'te görülen deney düzeneği kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneyde ortamı oksijensiz hale getirmek için azot gazı kullanılmıştır. Sistem, 3-5°C/dk ısıtma hızı ile ısıtılarak istenilen sıcaklığa getirilmiştir. Piroliz ürünlerinin verimini maksimize etmek amacıyla deney iki farklı sıcaklık aralığında yapılmıştır:

- İlk grupta, çar ürün verimini maksimumda tutmak amacıyla

piroliz sıcaklığı 300-350°C bandında tutulmuştur. Bu sıcaklık yapılan ön testler sonucunda belirlenmiş olup, benzer sıcaklık aralığı Ahmad, Khan, Khan, Ishaq, Tariq ve Gul (2014) tarafından yapılan çalışmada da kullanılmıştır.

- İkinci grupta ise, vaks ürün verimini maksimize etmek için sıcaklık aralığı 450-500°C'de tutulmuştur. Seçilen sıcaklık aralığı, Cepellioguları & Putun (2013) ve Kumar & Singh (2011) tarafından yapılan çalışmalarda da tercih edilmiştir.



Şekil 3. Piroliz deney düzeneği

2.2.2 Modifiye bitümlerin hazırlanması

YYPE pirolizinden elde edilen çar ve vaks ürünleri ayrı ayrı ve birlikte olmak üzere bitüm ile %6 oranında (bitüm ağırlığınca) modifiye edilmiştir. Katkı oranı literatürdeki araştırmalar dikkate alınarak seçilmiştir. Şöyle ki, literatür incelendiğinde gerek polietilen atık plastiğinin doğrudan bitüme katıldığı çalışmalarda (Almeida et al., 2021; Arabani ve Pedram, 2016; Attaelmanan et al., 2011) gerekse de plastiğin piroliz edilip elde edilen ürünün bitümle modifiye edildiği çalışmada (Al-Hadidy ve Tan, 2009) katkı maddesinin optimum dozajının %5-6 arasında değiştiği gözlenmiştir. Çalışmada kullanılacak modifiye bitümler aşağıda belirtildiği gibi oluşturulmuştur:

- YYPE_{PÇ}: Sadece piroliz çarının kullanıldığı modifiye bitüm. Bu süreçte, bitüm 160°C'ye kadar ısıtılmış, ardından piroliz çarı bitüme katılarak 30 dk boyunca 2000 dönüş/dk hızında yüksek kesmeli mikserle karıştırılmıştır.
- YYPE_V: Sadece piroliz vaksının kullanıldığı modifiye bitüm. Bu aşamada, bitüm 120°C'ye kadar ısıtılmış, ardından vaks ürün bitüme katılarak 20 dk boyunca 2000 dönüş/dk hızında karıştırılmıştır.
- YYPE_{PÇV}: Hem çar hem de vaks ürününün kullanıldığı modifiye bitüm. Bu modifikasyon mekanizmasında, önce bitüm 160°C'ye kadar ısıtılıp çar ürün yukarıda belirtilen süre ve hızda bitüme katılmıştır. Sonrasında, bitüm 120°C'ye kadar soğutulup

vaks ürün bitüme dahil edilmiştir.

Katkıların bitümle modifikasyon sürecinde, seçilen sıcaklık, süre ve hız parametrelerinin, bu konuda benzer çalışmalar yapan Al-Hadidy (2006), Al-Hadidy ve Tan (2009), Shang et al. (2011), Appiah, Berko-Boateng ve Tagbor (2017) tarafından da kullanıldığı tespit edilmiştir. Hazırlanan modifiye bitümlerin, aynı kap içerisinde 3 farklı bölgesinden alınan örneklerine yapılan bitümlü bağlayıcı testlerinde deney sonuçlarının birbirine oldukça yakın olduğu görülmüştür. Sonuçlar ayrıntılı olarak EKLER kısmında sunulmuştur. Bu sonuçlardan, karışımın homojen olma yönünde güçlü göstergelere sahip olduğu anlaşılmıştır.

2.2.3 Bitümlü bağlayıcı ve karışım testleri

2.2.3.1 Penetrasyon testi (ASTM D5/D5M-13)

Bitümün kıvamını ölçmek için kullanılan bir testtir. Numuneye standart bir penetrasyon iğnesi 5 sn boyunca batırılır. Numuneye uygulanan yük 100 gr'dır. Standart deney sıcaklığı ise 25°C'dir. İğnenin batma derinliği milimetrenin onda biri cinsinden penetrasyon değerini verir.

2.2.3.2 Yumuşama noktası testi (ASTM D36/D36M-14)

Bitümün, başlangıç sıcaklığı 5°C olan içi su/gliserin dolu bir kap içerisinde belirli sıcaklık artış hızında (5°C/dk) ısıtılması sonucu, üzerinde duran 3,5 gr

ağırlığındaki bilyelerin etkisi ile yumuşayarak 25 mm altındaki tablaya temas ettiği sıcaklık yumuşama noktası olarak adlandırılır.

2.2.3.3 Rotasyonel viskozimetre testi (ASTM D4402/D4402M-15)

Bitümün belirli bir sıcaklıktaki viskozitesi bu deney ile belirlenir. Bu yöntemde, tabanı konik biçimli bir aparat istenilen sıcaklığa kadar ısıtılan bitüm numunesine daldırılır. Cihaz istenilen bir hızda bu aparatı numune içerisinde döndürür. Numunenin dönmeye karşı gösterdiği bu direnci, cihaz tork cinsinden kaydeder. Elde edilen tork, hız ve aparatın geometrik bilgileri kullanılarak malzemenin viskozitesi pascal saniye veya centipoise cinsinden tespit edilir.

Eşdeğer viskoz yöntemi ile sıcaklık-viskozite grafiği çizilerek karışımın, karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıkları tespit edilmektedir. Bu yöntemde, $0,17\pm 0,02$ Pas değerlerine karşılık gelen aralık, karıştırma sıcaklık aralığı olarak kabul edilmektedir. Sıkıştırma sıcaklık aralığı için belirlenen viskozite değer aralığı ise $0,28\pm 0,03$ Pas'dir (Asphalt Institute, 2014).

2.2.3.4 Marshall stabilite-akma analizi (ASTM D6927-15)

Marshall stabilite-akma analizi ile ASTM D6926-20'ye göre hazırlanan briketlerin (60°C 'deki su banyosunda 30-40 dk bekletildikten sonra) taşıyabildiği maksimum yük tespit edilir. Bu test ile ayrıca briketlere ait akma (deformasyon) değerleri de belirlenir.

3. Bulgular

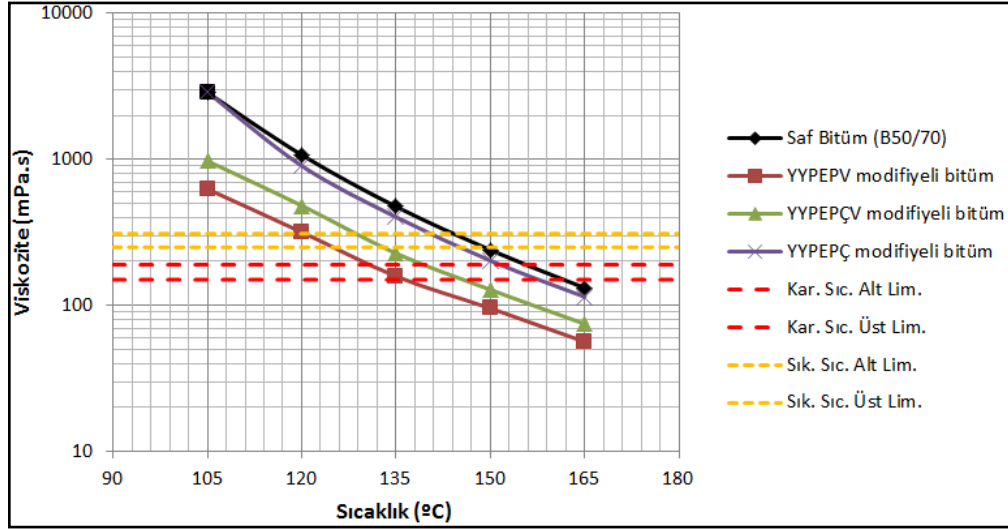
3.1 Bitümlü bağlayıcı test sonuçları

Saf ve katkıli bitümlere yapılan penetrasyon ve yumuşama noktası sonuçları Tablo 2'de, viskozite sonuçları ise Şekil 4'te sunulmuştur.

Tablo 2'den görüleceği üzere, bitüme sadece çar ilavesi yapıldığında ($\text{YYPE}_{\text{PÇ}}$), bitüm sertleşmekte, buna bağlı olarak bitümün penetrasyon değeri azalırken yumuşama noktası artmaktadır. Sadece vaks etkisi ile ise bitümün penetrasyon değerinde artış olurken, yumuşama noktasında azalma görülmüştür. Hem çar hem de vaks modifiyeli bitümde ($\text{YYPE}_{\text{PÇV}}$ modifiyeli bitüm) ise saf bitüme kıyasla penetrasyon değerinde artış gözlenirken, yumuşama noktası değeri azalmıştır. $\text{YYPE}_{\text{PÇV}}$ modifiyeli bitüm sonuçlarından, vaksın yumuşatıcı etkisinin çarın sertleştirici etkisinden daha baskın olduğu anlaşılmıştır.

Tablo 2. Saf ve katkıli bitümlere ait penetrasyon ve yumuşama noktası test sonuçları

Deney	Saf Bitüm (B50/70)	$\text{YYPE}_{\text{PÇ}}$ modifiyeli bitüm	$\text{YYPE}_{\text{PÇV}}$ modifiyeli bitüm	YYPE_{PV} modifiyeli bitüm
Penetrasyon (0.1 mm)	58	51	144	243
Yumuşama noktası ($^{\circ}\text{C}$)	52	54	44	38



Şekil 4. Saf ve katkıli bitümlere ait viskozite test sonuçları

Şekil 4'te saf ve katkıli bitümlere ait 105-165°C aralığındaki viskozite değerleri görülmektedir. Grafikte ayrıca, kırmızı ve sarı kesikli çizgilerle karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığı alt ve üst limit değerleri de gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde, sıcaklık arttıkça bitümlerin tamamının viskozite değerlerinin azaldığı görülmektedir. YYPE_{PV} ve YYPE_{ÇV} modifiyeli bitümlerin her sıcaklıkta viskozite değerinin saf bitümden daha aşağıda olduğu görülmektedir. YYPE_Ç modifiyeli bitümün viskozite değerleri ise 105°C'den itibaren azalmaya başlamıştır (105°C'den itibaren ortaya çıkan bu düşüşün, piroliz çarının erimeye başladığı sıcaklık sebebi ile olduğu düşünülmektedir). Ancak grafikten de görüleceği üzere YYPE_Ç ile saf bitümün viskozite sonuçları birbirine oldukça yakındır. Eşdeğer viskoz yöntemi ile bitümlerin karıştırma-sıkıştırma sıcaklık değerleri tespit edilmiştir (Tablo 3). Saf bitüme kıyasla

modifiye bitümlerin karıştırma-sıkıştırma sıcaklıklarındaki azalma değerleri YYPE_{PV}, YYPE_{ÇV} ve YYPE_Ç modifiye bitümler için sırasıyla 24°C, 14,5 °C ve 3,5 °C olmuştur. Bu sonuçlardan, YYPE_{PV} ve YYPE_{ÇV} modifiyeli bitümlerin, organik katkıli yöntemle hazırlanan İKA'lara benzer davranış sergilediği söylenebilir. YYPE_Ç modifiyeli bitümün ise, viskozite değerleri yeterince düşük olmadığından İKA özelliğinin güçlü olmadığı görülmüştür.

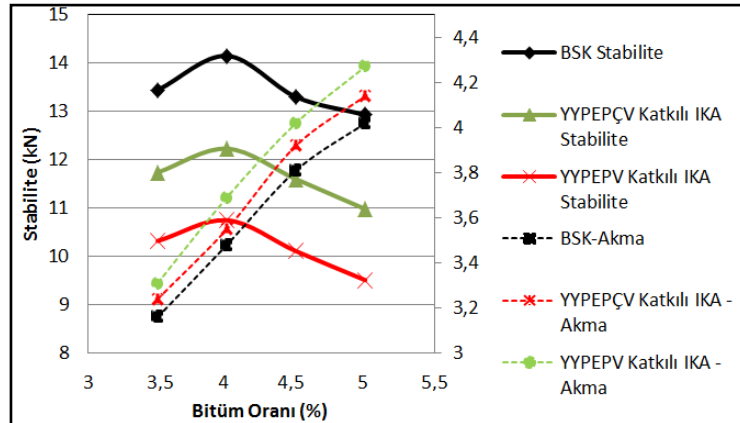
Tablo 3. Saf ve katkıli bitümlere ait karıştırma-sıkıştırma sıcaklık aralıkları

Bitüm türü	Karıştırma Sıcaklığı (°C)	Sıkıştırma Sıcaklığı (°C)
Saf Bitüm	155-160	146-150
YYPE _Ç	151-157	142-146
YYPE _{ÇV}	141-145	131-136
YYPE _{PV}	131-136	121-125

3.2. Marshall stabilite-akma analizi sonuçları

BSK ve IKA numunelerin stabilite-akma analizlerinin yapılması için, %3,5-4-4,5-5 bitüm oranlarında (agrega ağırlığınca) briketler hazırlanmıştır. YYPE_{PV} ve YYPE_{PÇV} modifiyeli bitümler kullanılarak hazırlanan IKA numuneler ile saf bitüm kullanılarak hazırlanan BSK numuneler Tablo 3'te belirtilen karıştırma-sıkıştırma sıcaklığında hazırlanmış olup, bu aşamada YYPE_{PÇ} modifiyeli bitüm (IKA özelliği yeterli olmadığı için) kullanılarak karışım hazırlanmamıştır. Şekil 5, ilgili karışımlara ait stabilite ve akma sonucunu göstermektedir. Grafik incelendiğinde görülüyor ki, hem IKA hem de BSK numuneler %4 bitüm

oranında maksimum stabiliteye ulaşmıştır. BSK'nın maksimum stabilite değeri 14,15 kN olarak ölçülürken, onu sırasıyla 12,23 kN ile YYPE_{PÇV} katkılı IKA ve 10,75 kN ile YYPE_{PV} katkılı IKA takip etmiştir. Sadece vaks ilavesi ile hazırlanan IKA karışımının (YYPE_{PV}) maksimum stabilite değerinin BSK'nın maksimum stabilitesine oranı %76 olarak belirlenmiştir. Vaks ve çarın birlikte kullanıldığı IKA'da ise bu oran %87 seviyelerine ulaşmıştır. Öte yandan, tüm sonuçların Karayolu Teknik Şartnamesi Aşınma Tabakası Stabilite Limiti olan 900 kg (8,83 kN) değerinden yüksek olduğu görülmüştür. Akma sonuçları incelendiğinde, stabilitesi yüksek olan karışımın akma değerlerinin daha düşük olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 5. BSK ve IKA'lara ait Marshall stabilite ve akma değerleri

4. Sonuçlar

Çalışmada, YYPE pirolizinden elde edilen çar ve vaks ürünlerin IKA üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çar ve vaks ürünler (bitüm ağırlığınca %

oranında olmak üzere) hem ayrı ayrı hem de birlikte bitümle modifiye edilerek 3 farklı formda katkılı bitüm (YYPE_{PV}, YYPE_{PÇV} ve YYPE_{PÇ}) hazırlanmıştır. Hem saf hem de katkılı bitümlere penetrasyon, yumuşama

noktası ve rotasyonel viskozimetre testleri yapılmıştır. Ayrıca, BSK ve IKA karışımlara Marshall stabilite-akma analizleri yapılmıştır. Deneylerden elde edilen sonuçlar şu şekildedir:

- Saf ve katkıli bitümlerin penetrasyon değerleri incelendiğinde şöyle bir sıralama oluşmuştur: $YYPE_{PV}$ modifiyeli bitüm > $YYPE_{PCV}$ modifiyeli bitüm > Saf Bitüm > $YYPE_{PC}$ modifiyeli bitüm. Bu sıralama incelendiğinde, çarın ilavesi ile bitümün sertleştiği, vaksın ilavesi ile ise, bitümün yumuşadığı görülmektedir. Vaks ve çarın birlikte bitüme katılması durumunda ise, modifiye bitümün, saf bitümden daha yumuşak özellikte olduğu anlaşılmıştır. Bu sonuç, vaksın bitüm içerisinde daha baskın bir rol oynadığını göstermiştir. Yumuşama noktasındaki sıralama ise, beklendiği gibi yukarıda belirtilen sıralamanın tam tersi şeklinde olmuştur.
- Viskozite sonuçları, vaks ürününün etkisi ile bitümün viskozitesinin önemli ölçüde azaldığını göstermiştir. Bu azalma neticesinde $YYPE_{PV}$ ve $YYPE_{PCV}$ modifiyeli bitümlerin karıştırma-sıkıştırma sıcaklık değerleri saf bitümden sırasıyla $24^{\circ}C$ ve $14,5^{\circ}C$ daha düşük çıkmıştır. Çar ürün ise, bitümün viskozite değerini $105^{\circ}C$ 'den sonra azaltmaya başlamış ancak bu azalma oldukça az miktarda olmuştur.

Bu sebeple sadece çar ürünün kullanıldığı $YYPE_{PC}$ modifiyeli bitüm ile saf bitümün viskozite sonuçları birbirine oldukça yakın çıkmıştır. Buradan, IKA üretiminde katkı maddesi olarak sadece $YYPE$ piroliz çarı kullanmanın yeterli olamayacağı çıkarımı yapılmıştır.

- Marshall stabilite sonuçları gösteriyor ki, bitümde sadece vaks ürün kullanımı ($YYPE_{PV}$) ile hazırlanan IKA karışımın stabilitesi, BSK'nın stabilitesinin %76'sına ulaşmıştır. Bitüme vaks ile birlikte çar ilavesi ($YYPE_{PCV}$) yapılarak IKA karışım hazırlandığında ise, bu oran %11 artarak %87 seviyelerine erişmiştir. Öte yandan, tüm sonuçların şartname limitini sağladığı görülmüştür.
- Akma değerleri incelendiğinde, şöyle bir sıralama olduğu gözlenmiştir: $YYPE_{PV}$ katkıli IKA > $YYPE_{PCV}$ katkıli IKA > BSK. Sıralamaya bakıldığında stabilite değeri düşük olan karışımın akma değerlerinin fazla olduğu görülmüştür.

Tüm sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, $YYPE_{PV}$ ve $YYPE_{PCV}$ katkı maddelerinin IKA üzerinde olumlu etki yaptığı görülmüştür. $YYPE$ piroliz çarının tek başına kullanıldığı $YYPE_{PC}$ modifiyeli bitümün IKA özelliklerinin ise yeterli düzeyde olmadığı anlaşılmıştır.

Teşekkür

Bu çalışma, Hüseyin KÖSE'nin doktora tez çalışması kullanılarak hazırlanmıştır. Yazar, çalışmaya 2016-ÖYP-050 proje numarası ile destek veren Öğretim Üyesi Yetiştirme Programı'na ve kıymetli yardımlarından dolayı Prof. Dr. Osman Nuri ÇELİK'e içtenlikle teşekkür eder.

5. Kaynaklar

- Ahmad, I., Khan, M. I., Khan, H., Ishaq, M., Tariq, R. and Gul, K. (2014, March). Pyrolysis study of polypropylene and polyethylene into premium oil products, *International Journal of Green Energy*, vol. 12, pp. 663-671. doi: 10.1080/15435075.2014.880146.
- Al-Hadidy, A.I. (2006). Evaluation of Pyrolysis Polypropylene Modified Asphalt Paving Materials, *Al-Rafidain Engineering Journal (AREJ)*, vol.14 (2), pp. 36-50. doi: [10.33899/rengj.2006.46555](https://doi.org/10.33899/rengj.2006.46555)
- Al-Hadidy, A.I. and Tan, Y. (2009, September). Evaluation of pyrolysis LDPE modified asphalt paving materials, *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol.21 (10), pp. 618-623. doi: 10.1061/.ASCE.0899-1561.2009.21:10.618.
- Almeida, A., Capitão, S., Estanqueiro, C. and Picado-Santosc, L. (2021, April). Possibility of incorporating waste plastic film flakes into warm-mix asphalt as a bitumen extender, *Construction and Building Materials*, vol.291, 123384. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123384.
- American Society for Testing and Materials. (2013). Standard No: ASTM D5/D5M-13. Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials
- American Society for Testing and Materials. (2020). Standard No: ASTM D36/D36M-14. Standard Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus)
- American Society for Testing and Materials. (2015). Standard No: ASTM D4402/D4402M-15. Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer.
- American Society for Testing and Materials. (2020). Standard No: ASTM D6926-20. Standard Practice for Preparation of Asphalt Mixture Specimens Using Marshall Apparatus.
- American Society for Testing and Materials. (2015). Standard No: ASTM D6927-15. Standard Test Method for Marshall Stability and Flow of Asphalt Mixtures
- Appiah, J.K., Berko-Boateng, V.N., and Tagbor, T.A. (2017). Use of waste plastic materials for road construction in Ghana, *Case Studies in Construction Materials*, vol.6, pp. 1-7. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cscm.2016.11.001>
- Arabani, M. and Pedram, M. (2016, May). Laboratory investigation of rutting and fatigue in glassphalt containing waste plastic bottles, *Construction and Building Materials*, vol.116, pp. 378-383. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.105>
- Asphalt mix design methods*, (2014), Yer: Asphalt Institute.
- Attaelmanan, M., Feng, P.C. and Al, A. (2011, January). Laboratory evaluation of HMA with high density polyethylene as a modifier, *Construction and Building Materials*, vol.25, pp. 2764-2770. doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.12.037.
- Cepeliogullar, O. and Putun, A.E. (2013). Utilization of two different types of plastic wastes from daily and industrial life, *International Conference on Environmental Science and Technology*. Cappadocia, Turkey.
- Costa, L.M.B., Silva, H.M.R.D., Peralta, J. and Oliveira, J.R.M. (2019). Using waste polymers as a reliable alternative for asphalt binder modification – Performance and morphological assessment, *Construction and Building Materials*, vol.198, pp.237-244.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.279>.

- Hınısloğlu, S. and Açar., E. (2004). Use of waste high density polyethylene as bitumen modifier in asphalt concrete mix, *Materials Letters*, vol.58, pp.367-271. doi:10.1016/S0167-577X(03)00458-0
- Karayolu teknik şartnamesi*, (2013), Yer: Karayolları Genel Müdürlüğü.
- Kumar, S. and Singh, R.K. (2011, October-December). Recovery of hydrocarbon liquid from waste high density polyethylene by thermal pyrolysis, *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, vol. 28 (4), pp. 659–667. doi: :10.1590/S0104-66322011000400011.
- PlasticsEurope (the Association of Plastics Manufacturers in Europe) (2020, December). *Plastics – the Facts 2020: An analysis of European plastics production, demand and waste data*. Retrieved September 4, 2021, from <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-facts-2020/>
- Rubio, M.C., Martínez, G., Baena, L. and Moreno, F. (2012). Warm mix asphalt: an overview, *Journal of Cleaner Production*, vol. 24, pp. 76-84. doi:10.1016/j.jclepro.2011.11.053
- Shang, L., Wang, S., Zhang, Y. and Zhang, Y. (2011, February). Pyrolyzed wax from recycled cross-linked polyethylene as warm mix asphalt (WMA) additive for SBS modified asphalt, *Construction and Building Materials*, vol. 25 (2) , pp. 886–891. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.097>

EKLER

Ek.1 Modifiye bitümlerin aynı kap içerisinde 3 farklı bölgesinden alınan örneklerine ait penetrasyon test sonuçları

Bitüm türü	Penetrasyon (1/10 mm)		
	1.Numune	2.Numune	3.Numune
YYPE _{PÇ} modifiyeli bitüm	51	53	50
YYPE _{PÇV} modifiyeli bitüm	238	250	242
YYPE _{PV} modifiyeli bitüm	140	148	143

Ek.2 Modifiye bitümlerin aynı kap içerisinde 3 farklı bölgesinden alınan örneklerine ait yumuşama noktası test sonuçları

Bitüm türü	Yumuşama Noktası (°C)		
	1.Numune	2.Numune	3.Numune
YYPE _{PÇ} modifiyeli bitüm	54	54	54,5
YYPE _{PÇV} modifiyeli bitüm	38	37,5	38
YYPE _{PV} modifiyeli bitüm	44	43,5	44

Ek.3 Modifiye bitümlerin aynı kap içerisinde 3 farklı bölgesinden alınan örneklerine ait viskozite test sonuçları

Bitüm türü	Viskozite (mPa.s) @135°C		
	1.Numune	2.Numune	3.Numune
YYPE _{PÇ} modifiyeli bitüm	402,9	404,3	400,7
YYPE _{PÇV} modifiyeli bitüm	158,3	159,8	156,3
YYPE _{PV} modifiyeli bitüm	227,2	225,0	229,1