

NANO MALZEMELERİN

Bitümün Fizikokimyasal ve Yaşlanma Özellikleri Üzerindeki Etkileri

Yazar
Anıl Öcal



© Copyright 2026

Bu kitabın, basım, yayın ve satış hakları Akademisyen Yayınevi A.Ş.'ye aittir. Anılan kuruluşun izni alınmadan kitabın tümü ya da bölümleri mekanik, elektronik, fotokopi, manyetik kâğıt ve/veya başka yöntemlerle çoğaltılamaz, basılamaz, dağıtılamaz. Tablo, şekil ve grafikler izin alınmadan, ticari amaçla kullanılamaz. Bu kitap T.C. Kültür Bakanlığı bandrolü ile satılmaktadır.

ISBN 978-625-362-186-5	Sayfa ve Kapak Tasarımı Akademisyen Dizgi Ünitesi
Kitap Adı Nano Malzemelerin Bitümün Fizikokimyasal ve Yaşlanma Özellikleri Üzerindeki Etkileri	Yayıncı Sertifika No 47518
Yazar Anıl ÖCAL ORCID iD: 0000-0001-7488-8899	Baskı ve Cilt Vadi Matbaacılık
Yayın Koordinatörü Yasin DİLMEN	Bisac Code TEC021000
	DOI 10.37609/akya.4317

Kütüphane Kimlik Kartı
Öcal, Anıl.

Nano Malzemelerin Bitümün Fizikokimyasal ve Yaşlanma Özellikleri Üzerindeki Etkileri / Anıl Öcal.
Ankara : Akademisyen Yayınevi Kitabevi, 2026.
117 s. : şekil, tablo. ; 135x210 mm.
Kaynakça var.
ISBN 9786253621865

GENEL DAĞITIM
Akademisyen Yayınevi A.Ş.

Halk Sokak 5 / A
Yenişehir / Ankara
Tel: 0312 431 16 33
siparis@akademisyen.com

www.akademisyen.com

ÖNSÖZ

Günümüz şartlarında yaygın kullanım alanı olan nano malzemelerin yol mühendisliğinde de asfalt betonu veya beton için performans artırıcı olarak kullanılabilmesine yönelik araştırmalar ve laboratuvar çalışmaları devam etmektedir. Ancak nanoteknoloji konusunda yapılacak araştırmalarda nano malzemelerin sentezi, görüntülenmesi ve bitüm içerisinde modifiye edici olarak kullanıldıktan sonra gerekli performans deneylerinin yapılabilmesi için araştırmacıların son derece teknolojik deney cihazlarına erişiminin olması gerekmektedir. Ülkemizde bu konu halen araştırmacıların karşılaştığı sorunların başında gelse de zamanla bu problemin üstesinden gelinebileceğine inanıyorum.

Ayrıca nano malzemeler ile yol mühendisliği konusunda yapılacak çalışmaların sadece inşaat mühendisliği değil kimya, fizik, metalurji, nanoteknoloji mühendisliklerini de kapsayan multidisipliner bir çalışma olduğunun göz ardı edilmemesi gerektiğini değerlendiriyorum.

Kitabın hazırlanması sürecinde bana destek olan sevgili eşim Doç.Dr.Duygu ÖCAL ve bugünlere gelmemde büyük emekleri olan anne ve babama çok teşekkür ediyorum.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	iii
------------	-----

BÖLÜM 1

GİRİŞ	1
-------------	---

BÖLÜM 2

BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARDA OLUŞAN BOZULMALAR	3
---	----------

2.1. Tekerlek İzi (Rutting).....	5
----------------------------------	---

2.1.1. Yapısal Tekerlek İzi.....	6
----------------------------------	---

2.1.2. Akma Tekerlek İzi	7
--------------------------------	---

2.1.3. Aşınma Tekerlek İzi	8
----------------------------------	---

2.1.4. Oturma (Konsolidasyon) Tekerlek İzi	9
--	---

2.1.5. Tekerlek İzi Oluşumunun Nedenleri	9
--	---

2.1.5.1. Dış Faktörler.....	10
-----------------------------	----

2.1.5.2. İç Faktörler	12
-----------------------------	----

2.1.6. Tekerlek İzi Hasar Seviyelerinin Değerlendirilmesi	14
---	----

2.2. Çatlaklar	16
----------------------	----

2.2.1. Yorulma (Timsah Sırtı) Çatlakları.....	16
---	----

2.2.2. Termal Çatlaklar	18
-------------------------------	----

2.3. Soyulma (Nem Hasarı)	19
---------------------------------	----

2.4. Aquaplaning (Kızaklama)	21
------------------------------------	----

BÖLÜM 3	
BITÜM VE YAŞLANMA.....	25
3.1. Bitüm	25
3.1.1. Bitümün Reolojik Özellikleri.....	26
3.1.2. Bitümün Yüksek, Düşük ve Orta Sıcaklık Davranışı	27
3.2. Yaşlanma	29
3.2.1. Yaşlanmayı Etkileyen Faktörler	30
3.2.2. Yaşlanma Çeşitleri	34
3.2.2.1. Kısa Dönem Yaşlanma	34
3.2.2.2. Uzun Dönem Yaşlanma	36
3.2.3. Yaşlanmanın Bitüm Performansına Etkileri	37
3.2.4. Yaşlanmayı Değerlendirme Yöntemleri.....	39
BÖLÜM 4	
BITÜM DENEYLERİ	41
4.1. Geleneksel Bitüm Deneyleri	41
4.1.1. Penetrasyon Deneyi (Penetration Test)	41
4.1.2. Yumuşama Noktası Deneyi (Softening Point Test)	43
4.1.3. Düktilite Deneyi (Ductility Test)	44
4.1.4. Özgül Ağırlık Deneyi (Specific Gravity Test)	45
4.2. Bitüm Yaşlandırma Deneyleri.....	45
4.2.1. Dönel İnce Film Etüvü (Rolling Thin Film Oven Test – RTFOT)	45
4.2.2. Basıncılı Yaşlandırma Kabı (Pressure Aging Vessel – PAV)	47
4.3. Performansa Dayalı Bitüm Deneyleri	48
4.3.1. Dönel Viskozimetre Deneyi (Rotational Viscometer Test – RV)	49

4.3.2. Dinamik Kesme Reometresi Deneyi (Dynamic Shear Rheometer Test – DSR)	52
4.3.3. Kiriş Eğme Reometresi Deneyi (Bending Beam Rheometer Test – BBR)	55
4.3.4. Doğrudan Çekme Deneyi (Direct Tension Test – DTT)	59
4.4. Depolama Stabilitesi (Storage Stability)	61
4.4.1. Faz Ayrışmasının Nedenleri	61
4.4.2. Depolama Stabilitesi Deneyi	62
BÖLÜM 5	
NANO MALZEMELER	65
5.1. Giriş	65
5.2. Nano Malzemelerin Sınıflandırılması	66
5.3. Nano Malzemelerin Mekanik, Manyetik, Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri	70
5.4. Nano Malzeme Üretim Yöntemleri	72
5.4.1. Yukarıdan Aşağıya Fiziksel Sentez Yöntemleri	75
5.4.2. Aşağıdan Yukarıya Kimyasal Sentez Yöntemleri	78
5.4.3. Sentez Sonrası Yüzey Modifikasyonu	84
5.5. İnşaat Mühendisliğinde Nanoteknoloji ve Uygulamaları	85
5.6. Bitüm ve BSK’da Kullanılan Nano Malzemeler	88
5.6.1. Tekerlek İzi (Rutting) Oluşumuna Etkisi	90
5.6.2. Yorulma Performansına (Fatigue) Etkisi	91
5.6.3. Soyulma Direncine (Stripping) Etkisi	94
5.7. Yaşlanma Karşıtı Nano Malzemeler	96
5.7.1. Nanokiller (Organofilik Montmorillonit – OMMT, Bentonit)	96

5.7.2. Metal Oksit Nanoparçacıkları (ZnO, TiO ₂ , SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , CeO ₂)	96
5.7.3. Karbon Tabanlı Nanomalzemeler (Karbon Nanotüpler – CNT, Grafen Oksit – GO, Grafen Nanoplakalar – GNP)	98
5.7.4. Diğer Mineral ve Polimer Esaslı Nano-Katkılar	99
5.7.5. Nano Katkıların Asfalt Betonun Fizikokimyasal ve Yaşlanma Özelliklerine Etkisi	101
5.8. Nano Malzemelerin Depolama Stabilitesine Etkisi	102
KAYNAKLAR.....	105

KAYNAKLAR

1. Hunter R.N., Self A., Read J., The Shell Bitumen Handbook, Sixth Edition, London:Ice Publishing, 2015.
2. Fwa T.F., The Handbook of Highway Engineering, USA:Crc Press, 2006.
3. Nikolaides A., Highway Engineering – Pavements, Materials and Control of Quality, USA: Crc Press, 2015.
4. Ali S.I.A., Gallouz K.S., Uwanuakwa I.D., vd., Evaluations on the properties of polymer and nanomaterials modified bitumen under different aging conditions, Nanomaterials, 2025, doi:10.3390/nano15141071.
5. Ayar P., Tavakoli H., A mini-review on incorporating Nanomaterials in asphalt pavements with emphasis on the aging phenomenon, Iranian Journal of Science and Technology, 2026; doi: 10.1007/s40996-026- 02150-y.
6. Speight, J.G., Asphalt Materials Science and Technology, Butterworth-Heinemann, 2015.
7. Asphalt Institute, The Asphalt Handbook, Seventh Edition, USA, 2007.
8. Huber, G.A., Methods to achieve rut resistance durable pavements, Synthesis of Highway Practice 274, Transportation Research Board, National Research Council, 1999.
9. Kutluhan, S., Ağar, E., Bitümlü sıcak karışımlarda tekerlek izi oluşumunu etkileyen faktörler ve azaltmaya yönelik öneriler, İTÜ Mühendislik Dergisi, 2009 8 (6) 179-191.
10. Mallick, R.B., Korchi, T.E., Pavement Engineering: Principles and Practice, CRC Press Taylor & Francis Group, Second Edition, 2013.
11. Tunç, A., Yol Malzemeleri ve Uygulamaları (2. Basım), Nobel Yayın, 2007.
12. Crucho J., Santos L.P., Neves J., vd., A review of Nanomaterials effect on mechanical performance and aging of asphalt mixtures, Applied Sciences, 2019; 9, doi: 10.3390/ app9183657.
13. Zhao S., Wang J., You Q., vd., Insight into the effect of photo-oxidative aging level on the nano-ZnO/SBR asphalt performance:Molecular Dynamics simulation, Construction and Building Materials, 2025; 489, doi: j.conbuildmat.2025.142314.
14. Zhang H., Duan H., Zhu C., vd., Mini-review on the application of nanomaterials in improving anti-aging properties of asphalt, Energy&Fuels, 2021; 35, 11017-11036, doi:10.1021/acs.energyfuels.1c01035.
15. Papagiannakis, A.T., Masad, E.A., Pavement Design and Materials, John Wiley & Sons Inc, (2024).
16. Mekuye B., Abera B., Nanomaterials: An overview of synthesis, classification, characterization, and applications, Nano Select, 2023; 4, 486-501, doi: 10.1002/nano.202300038.

NANO MALZEMELERİN BİTÜMÜN
Fizikokimyasal ve Yaşlanma Özellikleri Üzerindeki Etkileri

17. Iskender E., Evaluation of mechanical properties of nano-clay modified asphalt mixtures, *Measurement*, 2016; 93, 359-371. doi:j.measurement.2016.07.045.
18. Saltan M., Terzi S., Karahancer S., Performance analysis of nano modified bitumen and hot mix asphalt, *Construction and Building Materials*, 2018;173, 228-237. doi: j.conbuildmat.2018.04.014.
19. Karahancer S., Effect of aluminum oxide nano particle on modified bitumen and hot mix asphalt, *Petroleum Science and Technology*, 2020; 38(13), 773-784, doi: 10.1080/10916466.2020.1783292.
20. Enieb M., Cengizhan A., Karahancer S., vd., Evaluation of physical-rheological properties of Nano Titanium Dioxide modified asphalt binder and rutting resistance of modified mixture, *International Journal of Pavement Research and Technology*, 2023;16, 285-303, doi: 10.1007/s42947-021- 00131-0.
21. Saltan M., Terzi S., Karahancer S., Examination of hot mix asphalt and binder performance modified with nano silica, *Construction and Building Materials*, 2017; 156, 976-984. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.09.069.
22. Shamami K.G., Effati M., Mirabdolazimi S.M., Evaluation of properties of hot mix asphalt modified with nano-graphene, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 2022; 54(9), 691-694, doi: 10.22060/ceej.2022.20719.7514.
23. Zarate F.I.O., Ferrero I.Z., Hormaiztegui M.E.V., vd., Effect of nanoclay addition on storage stability, rheological performance and aging resistance of crumb rubber modified bitumen, *International Journal of Pavement Research and Technology*, 2026;19, 2111-2127, doi: 10.1007/s42947-025- 00563-y.
24. Gurjar J., Choudhary J., Aziz G., vd., Multi-performance optimisation of bitumen modified with nanoclay and crumb rubber using a fuzzy AHP technique, *Fuel*, 2026; 406, doi:10.1016/j.fuel.2025.137177.
25. Qian G., Yang C., Huang H., vd., Resistance to ultraviolet aging of Nano-SiO₂ and rubber powder compound modified asphalt, *Materials*, 2020;13, doi: 10.3390/ma13225067.
26. Kadhim H.J., Modarres A., Al-Busaltan S., Rheological and microstructural properties of nano-composite bitumen modified by nano-alumina and low-SBS content, *Case Studies in Construction Materials*, 2024; 20, doi:j.cscm.2024. e03244.
27. Zhu C., Xu Z., Zhang H., vd., Rheological and micro characteristics of asphalt containing different nanocomposite ratios of CeO₂/ MMT during thermal-oxidative and ultraviolet aging, *Construction and Building Materials*, 2025; 495, doi: j.conbuildmat.2025.143732.
28. Zhu C., Li D., Zhang H., vd., Effect of montmorillonite-loaded CeO₂ nanocomposites with different CeO₂ contents on thermal-oxidative and ultraviolet aging properties of asphalt, *Construction and Building Materials*, 2026; 507, doi:j. Conbuildmat.2025.145057.
29. Malinowski S., Wozuk A., Kwasniewska A., vd., Chemical, surface and nanomechanical analyses in the assessment of the ageing process of polythiophene nanofiber-modified road bitumen, *Fuel*, 2026; 421, doi: 10.1016/j.fuel.2026.138931.

30. Khattak M.J., Khattab A., Rizvi H.R., Characterization of carbon nano-fiber modified hot mix asphalt mixtures, *Construction and Building Materials*, 2013; 40, 738-745. doi:j.conbuildmat.2012.11.034.
31. Karahancer S.S., Kiristi M., Terzi S., vd., Performance evaluation of nano-modified asphalt concrete, *Construction and Building Materials*, 2014; 71, 283-288. doi:j.conbuildmat.2014.08.072.
32. Shafabakhsh G.H., Ani O.J., Experimental investigation of effect of Nano TiO_2 / SiO_2 modified bitumen on the rutting and fatigue performance of asphalt mixtures containing steel slag aggregates, *Construction and Building Materials*, 2015; 98, 692-702. doi:j.conbuildmat.2015.08.083.
33. Hong-liang Z., Man-man S., Shi-feng Z., vd., High and low temperature properties of nano-particles / polymer modified asphalt, *Construction and Building Materials*, 2016; 114, 323-332. doi: j.conbuildmat.2016.03.118.
34. Sadeghnejad M., Shafabakhsh G., Use of Nano SiO_2 and Nano TiO_2 to improve the mechanical behaviour of stone mastic asphalt mixtures, *Construction and Building Materials*, 2017; 157, 965-974. doi: j.conbuildmat.2017.09.163.
35. Shi X., Cai L., Xu W., vd., Effects of nano-silica and rock asphalt on rheological properties of modified bitumen, *Construction and Building Materials*, 2018; 161, 705-714. doi:j.conbuildmat.2017.11.162.
36. Karahancer S., Investigating the performance of cuprous oxide nano particle modified asphalt binder and hot mix asphalt, *Construction and Building Materials*, 2019; 212, 698-706. doi: j.conbuildmat.2019.04.041.
37. Mousavinezhad S.H., Shafabakhsh G.H., Ani O.J., Nano-clay and styrene-butadiene-styrene modified bitumen for improvement of rutting performance in asphalt mixtures containing steel slag aggregates, *Construction and Building Materials*, 2019; 226, 793-801. doi: j.conbuildmat.2019.07.252.
38. Mirsepahi M., Tanzadeh J., Ghanoon S.A., Laboratory evaluation of dynamic performance and viscosity improvement in modified bitumen by combining nanomaterials and polymer, *Construction and Building Materials*, 2020; 233, doi: j.conbuildmat.2019.117183.
39. Mamuye Y., Liao M., Do N., Nano- Al_2O_3 composite on intermediate and high temperature properties of neat and modified asphalt binders and their effect on hot mix asphalt mixtures, *Construction and Building Materials*, 2022; 331, doi: j.conbuildmat.2022.127304.
40. Zahid A., Ahmed S., Irfan M., Experimental investigation of nano materials applicability in Hot Mix Asphalt (HMA), *Construction and Building Materials*, 2022; 350, doi: j.conbuildmat.2022.128882.
41. Yang J., Tighe S., A review of advances of Nanotechnology in asphalt mixtures, *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 2013; 96, 1269-1276. doi:10.1016/j.sbspro.2013.08.144.
42. Cao Y., Liu Z., Song W., Performance and overall evaluation of nano-alumina-modified asphalt mixture, *Nanotechnology Reviews*, 2022; 11, 2891-2902, doi:10.1515/ntrev.2022.0485.

NANO MALZEMELERİN BİTÜMÜN Fizikokimyasal ve Yaşlanma Özellikleri Üzerindeki Etkileri

43. Galooyak S.S., Palassi M., Goli A., vd., Performance evaluation of nano-silica modified bitumen, *International Journal of Transportation Engineering*, 2015; 3(1), 55-66.
44. Afshin A., Behnood A., Nanomaterials in asphalt pavements: A state-of- the-art review, *Cleaner Waste Systems*, 2025; 10, doi:j.clwas.2025.100214.
45. Akbarzadeh N., Arabani M., Sadeghnejad M., vd., A multi-purpose evaluation of HMA modified with nano CaO and rice bran oil:Performance, microstructure, and life cycle assessment, *Results in Engineering*, 2026; 31, doi: j.rineng.2026.111329.
46. Zumrawi M.M., *Fundamentals of Highway Engineering*, Second Edition, 2022.
47. Brockenbrough R.L., *Highway Engineering Handbook*, Third Edition, USA: R R Donnelley, 2009.
48. Aljbouri H.J., Albayati A.H., Effect of nanomaterials on the durability of hot mix asphalt, *Transportation Engineering*, 2023;11.doi:10.1016/j.treng.2023.100165.
49. Shafabakhsh G., Mirabdolazimi S.M., Sadeghnejad M., Evaluation the effect of nano TiO₂ on the rutting and fatigue behavior of asphalt mixtures, *Construction and Building Materials*, 2014; 54, 566-571. doi:10.1016/j. conbuildmat.2013.12.064.
50. Garber N.J., Hoel L.A., *Traffic and Highway Engineering*, Fourth Edition, USA: Cengage Learning, 2009.
51. Robinson R., Thagesen B., *Road Engineering for Development*, Second Edition, London:Spon Press, 2004.
52. Al-Hamdou A.M., Albayati A.H., Fatigue performance of asphalt binders modified with varying nanomaterials, *Results in Engineering*, 2025; 28, doi: j.rineng.2025.107238.
53. Shah V., Bhaliya J., Patel G.M., vd., Biodegradable polymer nanocomposites as electrode materials for electrochemical double-layer capacitors and hybrid supercapacitor applications, 2013; doi: 10.1016/B978-0-323- 91696-7.00019-2.
54. Zhou Y., Li Y., Guan Y., vd., Preparation and performance investigation of surface treated nano Fe₃O₄ modified asphalt, *Construction and Building Materials*, 2026;540, doi:j.conbuildmat.2026.147653.
55. Taher Z.K., Ismael M.Q., Rutting prediction of hot mix asphalt mixtures modified by nano silica and subjected to aging process, *Civil Engineering Journal*, 2023;9, doi:10.28991/CEJ-SP2023-09-01.
56. Amini B., Rajabbolookat M.J., Abdi A., vd., Investigating the influence of using nano-composites on storage stability of modified bitumen and moisture damage of HMA, *Petroleum Science and Technology*, 2017; 35(8), 800-805, doi: 10.1080/10916466.2017.1292292.
57. Steyn, W.J.,Applications of Nanotechnology in Road Pavement Engineering, *Nanotechnology in Civil Infrastructure*, K. Gopalakrishnan, B. Birgisson, P. Taylor, N.A. Okine (Eds.), Springer, 49-83, 2011.

58. Wilson, M., Kannangara, K., Smith, G., Simmons, M., Raguse, B., Nanoteknolojiye Giriş, (Çev. E.Şentürk, İ.Okur, S. Duman, S. Akbulut), İstanbul Değişim Yayınları, s. 7-42, 57-76, 2012.
59. Solanki, P., Songera, D.S., Influence of TiO₂ nano particles blends on properties of asphalt, Nano Science And Nano Technology, 2014; 8, 10, 387- 390.
60. Santagata, E., Baglieri, O., Tsantilis, L., Brignone, I., Effect of sonication on high temperature properties of bituminous binders reinforced with nano-additives, Construction And Building Materials, 2015; 75, 395-403.
61. Mann, S., Nanotechnology and Construction, European Nanotechnology Gateway-Nanoforum report, Institute of Nanotechnology, 2006.
62. Nazarov, A.A., Mulyukov, R.R., , Nanostructured materials, Handbook of Nanoscience, Engineering and Technology, W.A. Goddard, D.W. Brenner, S.E. Lyshchevski, G.J. Iafrate (Eds.), CRC Press, 2003.
63. Lavin, P.G., Asphalt Pavements, Spon Press, London and New York, 2003.
64. Ge, Z., Gao, Z., Applications of nanotechnology and nanomaterials in construction, First International Conference on Construction in Developing Countries, Pakistan, 2008.
65. Rao, C.N.R., Cheetham A.K., Materials Science at the Nanoscale, Nanomaterials Handbook, Y. Gogotsi (Ed.), Taylor&Francis Group, CRC Press, ABD, 2006.
66. Zhang D., Huang Z., Yuan G., vd., Research on the anti-aging mechanism of SBS-modified asphalt compounded with multidimensional nanomaterials based on atomic force microscopy, Construction and Building Materials, 2022; 317, doi: j.conbuildmat.2021.125808.