



Araştırma Makalesi/ Research Article

Hurma çekirdeği tozunun bitümlü bağlayıcıların ortalama karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları üzerindeki etkisinin belirlenmesi

Determination of the effect of palm kernel powder on the average mixing and compaction temperatures of bituminous binders

Ceren Beyza İnce^{1*}

¹Malatya Turgut Özal Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, ceren.ince@ozal.edu.tr

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6385-0964>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 5 Mart 2025
Revizyon 6 Nisan 2025
Kabul 7 Haziran 2025
Online 30 Haziran 2025

Anahtar Kelimeler:

Bitüm, hurma çekirdeği, tarımsal artık, modifiye bitüm, konvensiyonel özellik, viskozite

ÖZ

Çalışmada, tarımsal bir artık olan hurma çekirdeği tozunun bitümlü bağlayıcıların konvensiyonel ve işlenebilirlik özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu amaç doğrultusunda, B 50/70 saf bağlayıcı içerisine ağırlıkça %5, %10, %15 ve %20 oranlarında hurma çekirdeği tozu (HÇT) eklenerek modifiye bağlayıcılar hazırlanmıştır. Konvensiyonel özellikleri tespit etmek için tüm bağlayıcılar yumuşama noktası, penetrasyon, düktilite ve dönel ince film etüvü (RTFO) testine maruz bırakılmıştır. İşlenebilirlik özelliğini tespit edebilmek için ise bağlayıcılar üzerinde dönel viskozimetre (RV) testi uygulanmıştır. Ayrıca, HÇT'nin bağlayıcıların ısıya karşı duyarlılığı üzerindeki etkisini belirleyebilmek için ise penetrasyon indeksi (PI) değerleri hesaplanmıştır. Testler sonucunda, HÇT katkısıyla bağlayıcıların sertliğinin ve PI değerlerinin giderek artış gösterdiği, uzama kabiliyetinin ise azalmaya başladığı görülmüştür. Bununla birlikte, HÇT katkı oranı arttıkça bağlayıcıların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının da giderek artış gösterdiği görülmüştür. Sonuç olarak, bir tarımsal artık olan hurma çekirdeği tozunun bitümlü bağlayıcıların karakteristik özelliklerini geliştirmede olumlu bir etkisi olduğu görülmüştür.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 5 March 2025
Received in revised form 6 April 2025
Accepted 7 June 2025
Available online 30 June 2025

Keywords:

Bitumen, date kernel, agricultural residue, modified bitumen, conventional property, viscosity

ABSTRACT

In this study, the effect of date kernel powder, an agricultural residue, on the conventional and workability properties of bituminous binders were investigated. For this purpose, modified binders were prepared by adding date kernel powder (DKP) to B 50/70 pure binder at the rates of 5%, 10%, 15% and 20% by weight. All binders were subjected to softening point, penetration, ductility and rotational thin film oven (RTFO) tests to determine the conventional properties. Rotational viscometer (RV) test was applied on the binders to determine the workability properties. In addition, penetration index (PI) values were calculated to determine the effect of DKP on the heat sensitivity of the binders. As a result of the tests, it was observed that the hardness and PI values of the binders gradually increased with the addition of DKP, and the elongation ability began to decrease. However, it was observed that the mixing and compaction temperatures of the binders gradually increased as the DKP addition rate increased. As a result, it was observed that date kernel powder, an agricultural residue, has a positive effect in improving the characteristic properties of bituminous binders.

DOI: 10.24012/dumf.1651872

* Sorumlu Yazar

Giriş

Geleneksel bitüm ile inşa edilen yol kaplamaları çeşitli hava ve çevre koşulları sebebiyle zaman içerisinde bozularak deforme olmaktadır. Kaplamalarda en sık görülen deformeler ayrışmalar, tekerlek izleri ve çatlaklardır. Deformeler, yalnızca yol güvenliği ve uzun ömürlülüğünün önüne geçtiği gibi aynı zamanda bakım ve onarım maliyetlerini de arttırmaktadır. Tüm bu olumsuz durumlara karşı yol mühendisleri kaplamanın kullanım ömrünü uzatmak ve performansını arttırmak için çeşitli katkı malzemeleri kullanarak bitümün özelliklerini geliştirmeye çalışmaktadır [1–6].

Üstün yol kaplama malzemelerine olan ihtiyacı karşılayabilmek için araştırmacılar, ticari malzemelerden (stiren-bütadien-stiren (SBS) başta olmak üzere, fiberler vs.) kompozit malzemelere hatta atık ve artık malzemelere (PET, PE, PVC gibi plastik kökenli atıklar başta olmak üzere çeşitli tarımsal, ormansal ve evsel atıklar vs.) kadar birçok malzemeyi bitüm yada sıcak karışım (bitüm+agrega) içerisinde kullanmış ve böylece bağlayıcıların özellikleri geliştirilmeye çalışılmıştır. Ancak son yıllarda, birçok araştırmacının da ifade ettiği gibi, malzemede ucuz ve kolay temin edilebilirlik durumu göz önünde bulundurduğunda atık/artık malzemeler daha çok katkı malzemesi olarak çalışmalarda kullanılmaktadır [7–18].

Atıklar, günümüzde birçok alanda oluşan, canlı ve çevre sağlığı üzerinde olumsuz etkileri olan atıl durumdaki malzemelerdir. Bu malzemelerin önemli bir kısmı geri dönüşüme tabi tutulabiliyorken bir kısmı ise atıl durumda birikerek ekolojik sistem üzerinde olumsuz durumlara sebep olmaktadır. Artıklar ise, belirli bir üretim sonucunda ortaya çıkan ve tekrar kullanılabilen yan ürünlerdir [19]. Atık ve artık denilince ilk akla gelen endüstriyel (cürufklar, madeni yağlar vb.) ve evsel atıklar (pet şişe, poşet, çöp vb.) olsa da tarım alanında da birçok artık malzeme oluşmaktadır [20–24]. Özellikle zeytin ve ayçiçeği başta olmak üzere pamuk, şeker pancarı ve tütün hasadı sonucunda da büyük miktarlarda artık malzemeler açığa çıkmaktadır [25–29].

Bu çalışmada, tarımsal bir artık olan hurma çekirdeğinin bitümlü bağlayıcıların karakteristik özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

Hurma, yeryüzünde tarım kültürünün ilk dönemlerinde yetiştirilen ve “antik ürün” olarak da anılan Hurma ağacının meyvesidir. İlk olarak eski Mezopotamya bölgesinde ve batı Hindistan bölgesinde yetiştirilen hurma ağacı, günümüzde ise Orta Doğu, Kuzey Afrika ve Orta Amerika’da yetiştirilmektedir. Genellikle sıcak iklime sahip bölgelerde yetiştirilen hurma ağacının dünya çapında yaklaşık 100 farklı çeşidi bulunmaktadır. Dünya üzerinde hurma üretiminde Suudi Arabistan, Birleşik Arap Emirlikleri (BAE), Bahreyn, İran, Irak, Umman, Kuveyt, Pakistan, Yemen ve Türkmenistan ilk sırada yer alırken (yaklaşık 60 milyon ton); Afrika, Cezayir, Mısır, Fas, Moritanya, Libya, Mali, Nijer, Sudan, Çad, Tunus ve Somali 32 milyon ton üretimle ikinci sırada yer almaktadır. ABD ve Meksika’da yıllık 600.000 ton, İspanya 320.000 ton ve Avustralya da 30.000 ton hurma üretilmektedir. BAE, yıllık yaklaşık 1.5 milyon ton hurma üreten dünyanın en büyük doku kültürü laboratuvarına sahip tek ülkedir [30].

Hurma, kısa sürede tüketilebildiği için yenilenebilir enerji kaynağı olarak kabul edilmektedir. Hurmanın ekiminden hemen sonra meyve verebilmesi için 4 ila 8 yıl, ticari olarak hasat edilebilmesi için ise 7 ila 10 yıl geçmesi gerekmektedir. Tipik bir hurma ağacı yılda 20 kilogram kadar kuru yaprak üretirken, hurma çekirdekleri hurma meyvelerinin neredeyse %10’unu oluşturmaktadır [31,32]. Yapılan çalışmalarda, Irak ve Mısır gibi ülkelerde hurma atıklarının küçük bir kısmı hayvan yemi olarak kullanıldığı ancak geri kalan kısmının ise atıl olarak biriktirildiği belirtilmiştir. Başka bir çalışmada, Suudi Arabistan’ın tek başına her yıl 200.000 tondan fazla hurma ağacı atığı ürettiği bildirilmiştir [33]. Yıldız ve Sohrabi ise, hurma atıklarının (ağaç kalıntıları ve çekirdekleri) genellikle çiftliklerde yakma işlemine tabi tutulduğunu, hurma üreten ülkelerde ise bu atıkların çöplüklerde biriktirilerek büyük çevre kirliliklerine sebep olduğunu belirtmiştir [30].

Genel olarak tarımsal artıkların karayolu mühendisliğinde kullanıldığı çalışmalar incelendiğinde, pamuk, ayçiçeği ve zeytin kalıntılarının bitüm veya sıcak karışımın özelliklerini geliştirmede kullanıldığı görülmüştür [33–38]. Hurma çekirdeği ile yapılan çalışmalara bakıldığında, doğrudan hurma çekirdeğinin bitüm veya sıcak karışım içerisinde kullanıldığı çalışmanın hiç olmadığı, hurma çekirdeğinin yakılarak kül haline getirildiği çalışmaların ise oldukça az olduğu görülmüştür [31,39,40]. Bunlardan Mirhosseini ve arkadaşlarının (2016) yapmış oldukları çalışmada, hurma çekirdeği külü kullanılarak hazırlanan sıcak karışımların nem hasarı direnci araştırılmış ve çalışma sonucunda hurma çekirdeği külü katkılı karışımların nem hasarına karşı dirençlerinin oldukça yükseldiği ifade edilmiştir [31]. Başka bir çalışmada, hurma çekirdeği külü kullanımının bitüm ve sıcak karışımların yorulma davranışı üzerindeki etkisi de araştırılmış, sonuçlar hurma çekirdeği külünün hem bitüm hem de sıcak karışımın yorulma davranışını iyileştirdiği ifade edilmiştir [39].

Bu çalışmada ise, tarımsal bir artık olan hurma çekirdeği katkısının (HÇT) bitümlü bağlayıcıların konvensiyonel ve işlenebilirlik özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bunun için, ilk olarak HÇT’ye ait çeşitli özellikler belirlenmiş ve ardından modifiye bağlayıcılar hazırlanarak bu bağlayıcılar üzerinde yumuşama noktası, düktilite, penetrasyon ve kısa süreli yaşlanma testleri uygulanmıştır. Ardından, tüm bağlayıcıların viskozite değerleri belirlenerek ortalama işlenebilirlik sıcaklıkları tespit edilmiştir.

Malzemeler ve yöntem

Malzemeler

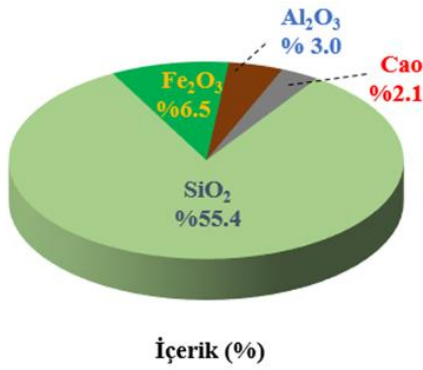
Çalışmada, katkı malzemesi olarak hurma çekirdeği tozu, bağlayıcı olarak B 50/70 saf bitümü kullanılmıştır. Hurma çekirdeği tozu (Şekil 1), atıl durumdaki hurma meyvesine ait çekirdeklerin önce kurutulup ardından öğütücü yardımıyla toz (No:200 elek altı) formuna getirilmesiyle elde edilmiştir. Hurma çekirdeği tozuna (HÇT) ait özellikler Tablo 1’de, çekirdeğe ait kimyasal içerik sonuçları Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 1. Hurma çekirdeği tozu (HÇT).

Tablo 1. HÇT'nin özellikleri.

Özellik	HÇT
Koku	Kokusuz
Form	Pudra
Renk	Sarımtırak
Suda çözünme	Çözünmez
Yapı	Lifli



Şekil 2. Hurma çekirdeğinin kimyasal içeriği.

B 50/70 sınıfı bitüm Kırıkkale TÜPRAŞ rafinerisinden temin edilmiştir. Bitüme ait geleneksel test sonuçları Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Bağlayıcıya ait özellikler.

Özellik	Standart	Sonuç
Penetrasyon (0.1 mm)	TS EN 1426	62
Yumuşama noktası (°C)	TS EN 1427	49
Parlama noktası (°C)	TS EN 22592	322
Düktilite (cm)	TS EN 13589	151
Özgül ağırlık (gr/cm ³)	TS 1087	1.021

Yöntem

Çalışmada, saf bağlayıcının özelliklerini iyileştirmek amacıyla bağlayıcıya çeşitli oranlarda (%5, %10, %15 ve %20) ilave edilen HÇT malzemesi, aşağıdaki işlem adımları takip edilerek bağlayıcıya eklenmiştir. Tüm oranlar için aynı işlem adımları uygulanmış olup sonuçta HÇT katkılı bağlayıcılar elde edilmiştir.

1. İlk olarak saf bağlayıcı, yaklaşık 155 °C sıcaklıkta akışkan hale gelinceye kadar ısıtılmıştır.

2. Isıtılan saf bağlayıcı içerisine, bitüm ağırlığının %5, %10, %15 ve %20 oranlarında HÇT ilave edilmiş ve 160 °C sıcaklıkta sıcak sabit tutularak 90 dk boyunca 1900 rpm hızında karıştırma işlemi yapılmıştır.
3. Karıştırma işlemi bitince her bir numune saklama kaplarına alınarak kodlanmıştır.

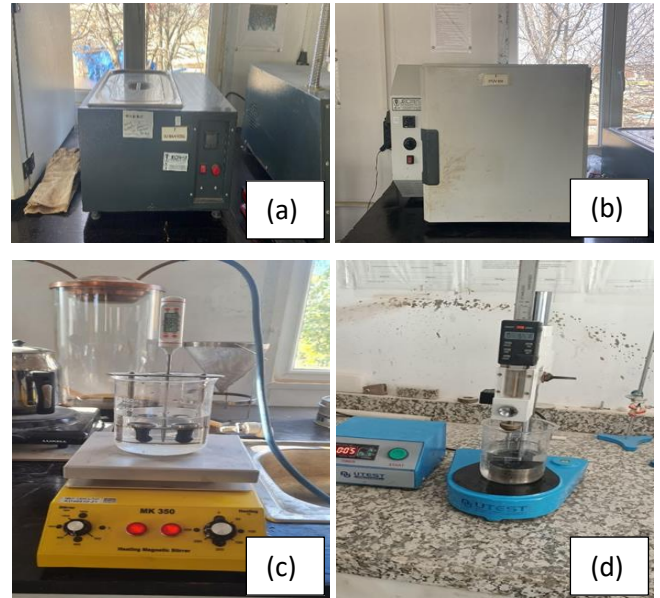
Çalışma boyunca, katkısız ve HÇT katkılı bağlayıcılar katkı artış oranı sırasına göre 0-HÇT, 5-HÇT, 10-HÇT, 15-HÇT ve 20-HÇT olarak kodlanmıştır.

Test prosedürü

Çalışmada, HÇT ilaveli bağlayıcıların karakteristik özelliklerini belirleyebilmek ve saf bağlayıcı ile kıyaslayabilmek amacıyla hem saf hem de HÇT ilaveli bağlayıcılar yumuşama noktası, penetrasyon, düktilite, dönel ince film etüvü (RTFO) ve dönel viskozimetre (RV) testlerine tabi tutulmuştur. Ayrıca bağlayıcıların sıcaklığa karşı hassasiyetlerinin bir ölçüsü olarak bilinen penetrasyon indeksi (PI) değerleri de hesaplanmıştır.

Konvensiyonel (Geleneksel) testler

HÇT katkılı bağlayıcıların, yüksek sıcaklıklar altındaki direncini belirleyebilmek amacıyla bağlayıcılar TS EN 1427 standardına göre yumuşama noktası testine, HÇT katkısının bağlayıcıların sertliği ya da kıvamı üzerindeki etkisini belirleyebilmek amacıyla bağlayıcılar TS EN 1426 standardına göre penetrasyon testine tabi tutulmuştur. Ayrıca, bağlayıcıların uzama yeteneği TS EN 13589 standardına göre düktilite testi ile belirlenmiştir. Ek olarak, bağlayıcıların üzerinde kısa süreli yaşlanmanın etkisini belirleyebilmek için tüm bağlayıcılar ASTM D2872 standardına göre dönel ince film etüvü (RTFO) testine maruz bırakılmıştır [41-44]. Numunelerin hazırlanmasında kullanılan su banyosu ve etüv ile testlerde kullanılan yumuşama noktası ve penetrasyon cihazları Şekil 3'de verilmiştir.



Şekil 3. Su banyosu (a), etüv (b), yumuşama noktası (c) ve penetrasyon (d) cihazları.

Konvensiyonel özellikleri belirlenen saf ve HÇT katkılı bağlayıcıların, ısıya karşı duyarlılıklarının bir ölçüsü olarak bilinen penetrasyon indeksi (PI) değerleri de denklem 1 kullanılarak belirlenmiştir.

$$PI = \frac{1952 - 500 \times \log(Pen_{25}) - 20 \times SP}{50 \times \log(Pen_{25}) - SP - 120} \quad (1)$$

Burada, bağlayıcıların oda sıcaklığındaki penetrasyon değerini “ Pen_{25} ”, bağlayıcıların yumuşama değerini ise “ SP ” sembolize etmektedir. PI değerinin artış göstermesi, bitümlü bağlayıcıların ısıya karşı duyarlılığının azaldığını ve sertliğinin (kıvamının) arttığını göstermektedir [31].

RV testi

HÇT katkılı bağlayıcıların plentte karıştırma ve yolda sıkıştırma esnasındaki karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları ASTM D4402 [45] standardına göre RV testi ile tayin edilmiştir. Testte, bağlayıcıların 135 °C ve 165 °C’deki viskozite değerleri tespit edilerek viskozite- sıcaklık grafiği çizilmektedir ve buradan karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarını belirleyebilmek için 170±20 ve 280±30 cP viskozite sınırlarına karşılık gelen sıcaklık aralıklarının kullanılmaktadır [46].

Bulgular

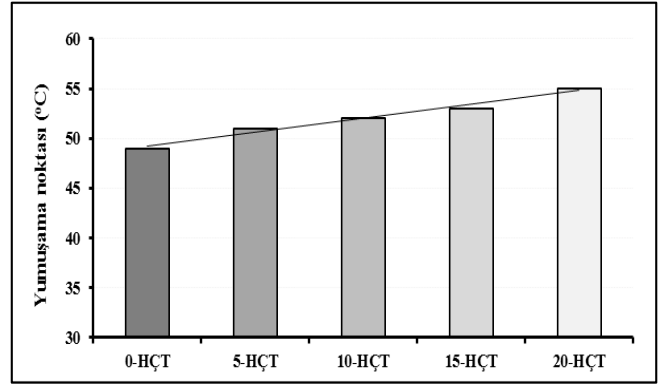
Yapılan çalışmada, HÇT katkılı bağlayıcıların konvensiyonel özellikleri yumuşama noktası, penetrasyon, duktilite ve RTFO testleri ile, karıştırma-sıkıştırma sıcaklıkları ise RV testi ile belirlenmiştir. Ek olarak, bağlayıcılara ait PI değerleri de belirlenerek tüm sonuçlar Tablo 3’de verilmiştir.

Tablo 3. Saf ve modifiye bağlayıcılara ait deney sonuçları.

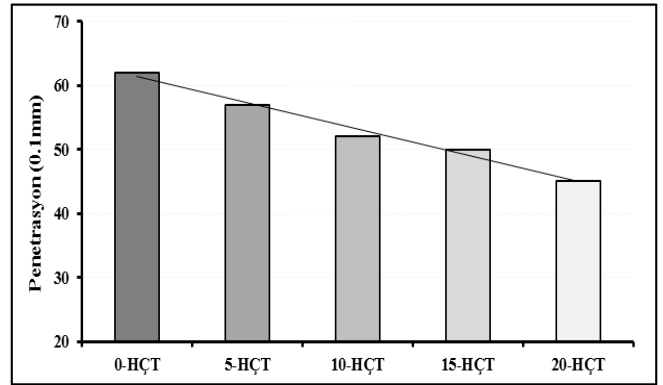
Deney	0-HÇT	5-HÇT	10-HÇT	15-HÇT	20-HÇT
Yumuşama noktası (°C)	49	51	52	53	55
Penetrasyon (mm ⁻¹)	62	57	52	50	45
PI	-0.95	-0.65	-0.63	-0.48	-0.28
Duktilite (cm)	151	140	135	128	105
Kütle kaybı (%)	0.32	0.27	0.25	0.21	0.13
Viskozite (135°C) (cP)	623.8	650	715.5	744.1	810.6
Viskozite (165°C) (cP)	177.6	185.4	228.2	190.4	215.4
Ort. karıştırma sıcaklığı (°C)	166.7	167.4	172.35	167.50	171.20
Ort. sıkıştırma sıcaklığı (°C)	153.65	155.5	159.75	157.35	158.65

Tüm bağlayıcıların konvensiyonel ve işlenebilirlik özelliklerinin HÇT artış miktarına göre değişimi sırasıyla Şekil 4-8’de verilmiştir.

Yumuşama noktası değerlerine bakıldığında (Şekil 4), HÇT katkısı ile, yumuşama değerlerinde artışlar meydana geldiği ve en yüksek artışın %12.2 oranıyla %20 HÇT katkılı bağlayıcılarda olduğu görülmektedir. Bu sonuçla beraber, penetrasyon değerleri de (Şekil 5) yumuşama deney sonuçları ile uyumluluk göstererek HÇT katkısı ile azalmaya başlamış ve en fazla azalmanın yine %20 HÇT oranında %27.4 kadar olduğu görülmüştür.

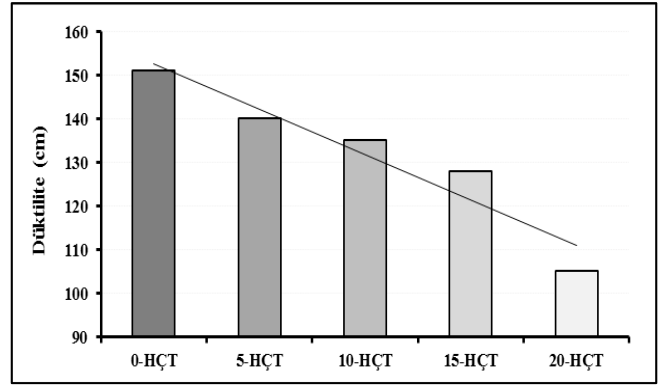


Şekil 4. HÇT içeriğine göre yumuşama noktası değişimi.



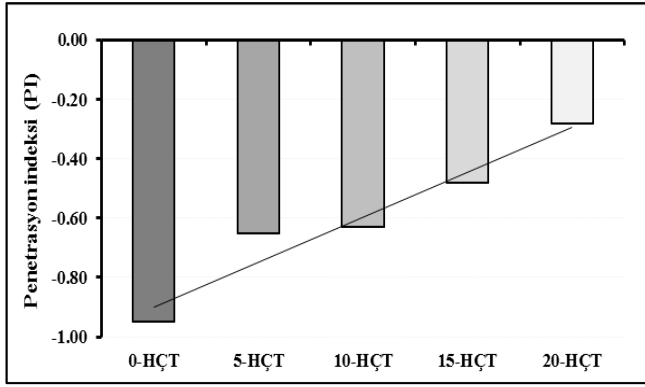
Şekil 5. HÇT içeriğine göre penetrasyon değişimi.

Bu sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, HÇT katkısı ile bağlayıcıların sertliğinin giderek arttığını (penetrasyon değerlerinin azaldığı) ve bu sebeple yumuşama değerlerinin arttığı ifade edilebilir. Ayrıca, HÇT katkılı bağlayıcıların oldukça yüksek sıcaklığa sahip bölgelerde kullanılabileceğini söylemek mümkündür.



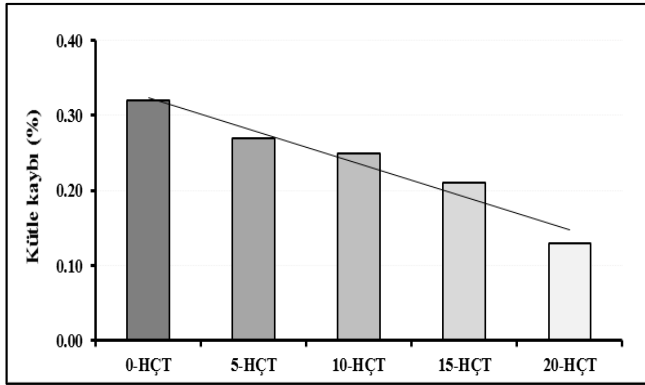
Şekil 6. HÇT içeriğine göre duktilite değişimi.

Duktilite değerlerine bakıldığında, HÇT katkısı ile bu değerlerin oldukça azaldığı ve en çok azalmanın %20 HÇT oranında %30.5 kadar elde edildiği görülmektedir. Şekil 6 değerlendirildiği zaman, HÇT katkısının bağlayıcıların uzama kabiliyetlerini azalttığı, ancak elde edilen değerlerin Karayolları Teknik Şartnamesi (KTŞ)’ne göre [47] 100cm den az olmaması sebebiyle bu durum olumsuz değerlendirilmemektedir.



Şekil 7. HÇT içeriğine göre PI değişimi.

B 50/70 sınıfı saf bağlayıcıya HÇT eklenmesiyle bağlayıcıların PI değerlerinin giderek artış gösterdiği Şekil 7'de görülmektedir. PI değerinin yükselmesi, bağlayıcının ısıya karşı duyarlılığının azaldığını göstermektedir. Bu durumda, HÇT katkısı ile bağlayıcıların ısıya karşı duyarlılıklarının azaldığı yani bağlayıcıların sertleştiği ifade edilebilir.



Şekil 8. Bağlayıcıların kütle kaybı değişimleri.

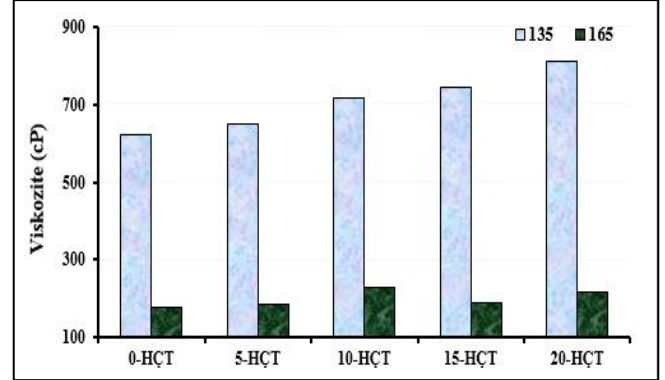
Şekil 8'e bakıldığında, HÇT katkısının modifiye bağlayıcıların yapısında meydana gelen kısa süreli yaşlanma sonucundaki kütle kayıplarının giderek azaldığı ve şartname limitinin (maks. 0.5) [47] oldukça altında kaldığı görülmektedir. HÇT katkısının bu sonuca göre, bağlayıcıların uçucu madde kaybı üzerinde negatif bir etkiye sahip olmadığı ifade edilebilir. Bu sonucun, HÇT'nin lifli yapısından dolayı kaynaklanabileceği değerlendirilmektedir.

RV test sonuçları

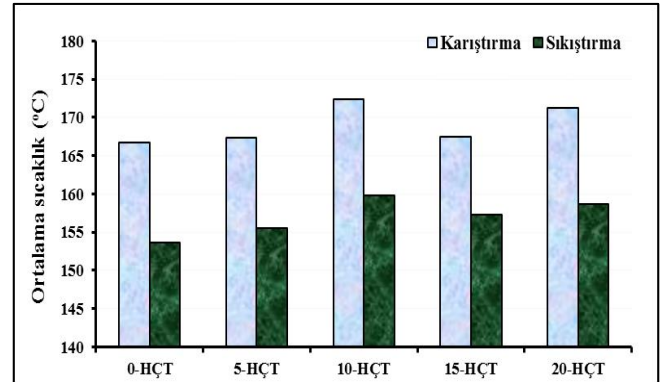
Çalışmada, HÇT katkısının bağlayıcıların işlenebilirlik sıcaklıkları üzerindeki etkisini belirleyebilmek için 135 °C ve 165 °C sıcaklıklarda tüm bağlayıcıların viskozite değerleri belirlendi. Bağlayıcılara ait her iki sıcaklıktaki viskozite değerleri Şekil 9'da, bu değerlerin kullanılarak bağlayıcılara ait belirlenen ortalama işlenebilirlik sıcaklıkları ise Şekil 10'da verilmiştir.

Şekil 9'a bakıldığında, HÇT katkısıyla her iki sıcaklık değerinde de bağlayıcıların viskozite değerleri katkısız bağlayıcıya (0-HÇT) göre artış göstermiştir. Meydana gelen artışlar 0-HÇT'ye göre 135 °C'de %4.2, %14.7, %19.3 ve %30.0 kadar, 165 °C'de %4.4, %28.5, %7.2 ve %21.3 kadardır. Artış oranları dikkate alındığında 20-HÇT katkılı bağlayıcıların en yüksek viskozite değerlerine sahip olduğu anlaşılmaktadır.

Bağlayıcıların ortalama işlenebilirlik sıcaklıklarındaki değişime bakıldığında (Şekil 10), 0-HÇT'ye göre karıştırma sıcaklığında %0.42, %3.4, %0.48 ve %2.7; sıkıştırma sıcaklığında ise % 1.2, %4.0, %2.4 ve 3.3 kadar artışlar olmuştur. En yüksek artışlar diğer deney sonuçlarında olduğu gibi %20 HÇT katkılı bağlayıcılardan elde edilmiştir. İşlenebilirlik sıcaklıklarındaki artış, bağlayıcıların sertliğindeki artış sebebiyle beklenen bir sonuç olup, bu durum HÇT katkılı bağlayıcıların plentte hazırlanma (karıştırma) ve yol inşası esnasındaki sıkıştırma anındaki enerji sarfiyatının artacağını ifade etmektedir. Fakat, HÇT katkısının bir atık olduğu ve çevreye verdiği zarar göz önünde alındığında bu durumun ihmal edilebileceği değerlendirilmektedir.



Şekil 9. HÇT katkısının viskozite değerlerine etkisi.



Şekil 10. Bağlayıcıların ait ortalama işlenebilirlik sıcaklık değerleri.

Sonuçlar

Tarımsal bir artık olan hurma çekirdeği tozu (HÇT)'nin bitümlü bağlayıcıların konvansiyonel ve işlenebilirlik özellikleri üzerindeki etkisinin araştırıldığı bu çalışmada aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

1. Yumuşama değerlerine bakıldığında, HÇT oranı arttıkça bağlayıcıların sıcaklığa karşı dirençlerinin arttığı, yani yumuşama değerlerinin yükseldiği görülmüştür. Bu durumda, HÇT ilavesiyle bitümlerin yüksek sıcaklık altındaki direncinin artarak daha yüksek sıcaklığa sahip bölgelerde kullanılabileceği söylenebilir.

2. Penetrasyon değerlerine bakıldığında, HÇT katkısı ile bağlayıcıların kıvamının arttığı, yani penetrasyon değerlerinin giderek azaldığı görülmüştür. Bununla birlikte, bu sonuçların yumuşama sonuçları ile uyum içinde olduğu, kıvamın azalmasıyla bağlayıcıların sertleşerek yüksek

sıcaklık altındaki bozulma direncinin arttığını ifade etmek mümkündür.

3. PI değerlerine bakıldığında, HÇT katkısı ile genel olarak bağlayıcıların ısıya karşı duyarlılıklarının azaldığı belirlenmiştir.

4. Bağlayıcıların uzama kabiliyetleri değerlendirildiğinde (düktilite), HÇT ilavesi ile uzama miktarlarında büyük oranda azalmalar meydana geldiği görülmüştür. Modifiye bağlayıcı şartname limiti (min.100) aşılmadığından bu azalmalar olumsuz olarak değerlendirilmemektedir.

5. Kütle kaybı değerlerine göre, HÇT katkısının bağlayıcıların kısa süreli yaşlanması üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğu görülmüştür.

6. RV sonuçları değerlendirildiğinde, HÇT katkısı ilave bitümlerin sertliğinin artması sebebiyle işlenebilirlik sıcaklıklarının arttığı ve bu sebeple de enerji tüketiminin artacağı görülmüştür. Enerji tüketimindeki bu artışın, atık HÇT'nin çevreye verdiği olumsuzluklar göz önüne alındığında ihmal edilebileceği değerlendirilmektedir.

Sonuçta, HÇT katkısının bitümün kıvamını azalttığı ve bitümü sertleştirdiği, ayrıca işlenebilirlik sıcaklıklarını arttırdığı belirlenmiştir. Ek olarak, HÇT'nin yol mühendisliğinde doğrudan bir katkı malzemesi olarak kullanılabilirliği ve böylece bu tarımsal atıkların çevreye verdiği zararı oldukça azaltarak ülke ekonomisine faydalar sağlayacağı değerlendirilmektedir.

Kaynaklar

- [1] J. Gao, H. Wang, Z. You, M. R. Mohd Hasan, Y. Lei, ve M. İrfan, "Rheological behavior and sensitivity of wood-derived bio-oil modified asphalt binders", *Appl. Sci.*, c. 8, sayı 6, s. 919, 2018.
- [2] N. S. A. Yaro vd., "Evaluation of the impact of short-term aging on volumetric and Marshall properties of palm oil clinker fine modified asphalt concrete (POCF-MAC)", içinde *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, c. 1793, sayı 1, s. 12054.
- [3] S. A. Tahami, M. Arabani, ve A. F. Mirhosseini, "Usage of two biomass ashes as filler in hot mix asphalt", *Constr. Build. Mater.*, c. 170, ss. 547–556, 2018.
- [4] M. R. Hainin vd., "Performance of hot mix asphalt mixture incorporating kenaf fibre", içinde *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018, c. 140, s. 12092.
- [5] M. T. Rahman, A. Mohajerani, ve F. Giustozzi, "Recycling of waste materials for asphalt concrete and bitumen: A review", *Materials (Basel)*, c. 13, sayı 7, s. 1495, 2020.
- [6] N. S. A. Yaro vd., "Modeling and optimization of asphalt content, waste palm oil clinker powder and waste rice straw ash for sustainable asphalt paving employing response surface methodology: A pilot study", *Clean. Mater.*, c. 8, s. 100187, 2023.
- [7] S. Xu vd., "Application of reactive rejuvenator in aged SBS modified asphalt regeneration: A review", *Constr. Build. Mater.*, c. 421, s. 135696, 2024.
- [8] Y. Zhao vd., "Aging characteristics and microscopic mechanisms of SBS asphalt based on coupled light–heat–water aging", *Constr. Build. Mater.*, c. 456, s. 139190, 2024.
- [9] Y. Wen vd., "Evaluation on the fatigue and self-healing properties of aged and rejuvenated SBS-modified asphalt", *Constr. Build. Mater.*, c. 412, s. 134773, 2024.
- [10] J. Wu vd., "Recent development and application of natural fiber in asphalt pavement", *J. Clean. Prod.*, s. 141832, 2024.
- [11] I. U. Usman ve M. Kunlin, "Influence of Polyethylene Terephthalate (PET) utilization on the engineering properties of asphalt mixtures: A review", *Constr. Build. Mater.*, c. 411, s. 134439, 2024.
- [12] C. A. Vargas ve A. El Hanandeh, "Eco-friendly asphalt mixtures: examining the performance of PE pyrolytic wax-modified bitumen for road construction", *Clean Technol. Environ. Policy*, c. 26, sayı 2, ss. 447–465, 2024.
- [13] M. Arabani, A. Amiri, ve M. H. Hassanjani, "Utilizing olive pomace oil and the extrusion of SBS and PVC to enhance the physical and rheological characteristics of asphalt binder", *Case Stud. Constr. Mater.*, c. 21, s. e04097, 2024.
- [14] S. Jain, A. K. Chandrappa, ve R. Neelancherry, "Utilization of Agricultural Wastes and By-Products in Asphalt: A Critical Review", *Agric. Waste to Value-Added Prod. Bioprod. its Appl.*, ss. 207–227, 2024.
- [15] A. A. A. Abdelmagid ve Y. Qiu, "Repurposing agricultural waste: The effectiveness of peanut husk ash in improving asphalt mixture properties", *Constr. Build. Mater.*, c. 411, s. 134476, 2024.
- [16] N. Bardella, M. Facchin, E. Fabris, M. Baldan, ve V. Beghetto, "Waste cooking oil as eco-friendly rejuvenator for reclaimed asphalt pavement", *Materials (Basel)*, c. 17, sayı 7, s. 1477, 2024.
- [17] A. Ahmed, S. Ali, A. Ahmed, ve F. Khan, "Investigating the Impact of Domestic Sewage on Asphalt Concrete Pavement Strength", *Eng. Technol. Appl. Sci. Res.*, c. 14, sayı 2, ss. 13617–13623, 2024.
- [18] S. Shirzad ve H. Zouzas, "Enhancing the performance of wood-based bio-asphalt: strategies and innovations", *Clean Technol. Environ. Policy*, c. 26, sayı 7, ss. 2095–2115, 2024.
- [19] M.E. Çeloğlu, "Farklı Biyokütlelerin Pirolizinden Elde Edilen Biyoçarların Bitüm Ve Bitümlü Sıcak Karışımlarda Kullanılabilirliğinin Araştırılması", *Doktora Tezi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Fırat Üniversitesi, Elazığ*, 2020.
- [20] Y. Avşar, "Atık Yönetimi Stratejisi Olarak 'Sıfır Atık Projesi' ve Türkiye'deki Uygulama Örnekleri", *Türk Yönetim ve Ekon. Araştırmaları Derg.*, c. 5, sayı 2, ss. 82–93, 2024.

- [21] A. Akdeniz ve J. P. Svensson, "Sürdürülebilir Atık Yönetimi ve Geri Dönüşüm", Akad. Bakış Tur. Sektörü, s. 1, 2024.
- [22] M. A. Alkur, P. Uyanık, S. Göncü, Z. Y. Avdan, ve K. Gedik, "Endüstriyel atık suların prostele tekrar kullanılabilirliğine yönelik metodolojik değerlendirme", Int. J. Eng. Res. Dev., c. 16, sayı 1, ss. 383–393, 2024.
- [23] Ö. Apaydın, "Evsel katı atıkların kaynağa ikili ayrılması özel halinin çevresel, ekonomik, sosyal ve teknik kriterler açısından analitik hiyerarşi prosesi yardımıyla analizi", Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilim. Derg., c. 1000, sayı 1000, s. 0.
- [24] Y. Ayaz, M. A. Kırpık, T. Daldal, S. Çakır, ve A. Daldal, "Evsel Atık Suları ile Yağmur Sularının Geri Dönüşüm Serüveni", Kafkas Üniversitesi Fen Bilim. Enstitüsü Derg., c. 16, sayı 2, ss. 63–69, 2024.
- [25] H. Yıldız, "Tarım Atıklarından Aktif Karbon Üretimi ve Atıksudan Boya Giderimi: Karakterizasyon, Kinetik ve Değer Çalışmaları", Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Tarım ve Doğa Derg., c. 27, sayı 6, ss. 1269–1281, 2024.
- [26] İ. Ö. Gökdeniz ve B. Bağrıaçık, "Şeker Pancarı Atığı Katkılı Kil Zeminin Serbest Basınç ve Konsolidasyon Verilerinin İrdelenmesi", Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Derg., c. 39, sayı 4, ss. 1081–1092.
- [27] T. Uslu, "Biberiye (Rosmarinus Officinalis L.) Bitkisi İçin Bazı Atıkların Yetiştirme Ortamı Olarak Kullanılması Ve Bitkinin Gelişimi Üzerine Etkileri". Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi-Fen Bilimleri Enstitüsü, 2024.
- [28] M. Gencay, "Tütün ve Tütün Mamulleri Atıklarının Denizel Çevreye Etkileri: Konyaaltı Sahili ve Denizel Bölgesi". Kapadokya Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim, Öğretim ve Araştırma Enstitüsü, 2024.
- [29] B. Yemen ve S. Belgüzar, "Yağlık Ayçiçeği Üretiminde Karşılaşılan Bitki Koruma Sorunlarının Belirlenmesi: Sivas İli Örneği, Türkiye", Türkiye Tarımsal Araştırmalar Derg., c. 11, sayı 1, ss. 48–57, 2024.
- [30] N. Yıldız ve M. Sohrabi, "Hurma Ağacının (Phoenix dactylifera L.) İklim ve Toprak İstekleri", Uluslararası Mühendislik Tasarım ve Teknoloji Derg., c. 1, sayı 2, ss. 64–70, 2019.
- [31] S. A. F. Mirhosseini, M. M. Khabiri, A. Kavussi, ve M. H. J. Kamali, "Applying surface free energy method for evaluation of moisture damage in asphalt mixtures containing date seed ash", Constr. Build. Mater., c. 125, ss. 408–416, 2016.
- [32] S. Zafar, "No Title", 2023. <https://www.ecomena.org/biomass-date-palm-wastes/>
- [33] M. Arabani ve M. H. Hassanjani, "The influence of olive kernel ash obtained from canning factory as a bitumen modifier", Constr. Build. Mater., c. 441, s. 137532, 2024.
- [34] M. A. Tarar, A. H. Khan, Z. Ur Rehman, S. Qamar, ve M. N. Akhtar, "Compatibility of sunflower oil with asphalt binders: a way toward materials derived from renewable resources", Mater. Struct., c. 53, ss. 1–15, 2020.
- [35] A. Garcia, C. J. Austin, ve J. Jelfs, "Mechanical properties of asphalt mixture containing sunflower oil capsules", J. Clean. Prod., c. 118, ss. 124–132, 2016.
- [36] T. Khedaywi, N. Al Kofahi, ve M. Al-Zoubi, "Effect of olive waste ash on properties of asphalt cement and asphalt concrete mixtures", Int. J. Pavement Res. Technol., c. 13, ss. 276–285, 2020.
- [37] J. Liu, Z. Li, H. Chen, B. Guan, ve K. Liu, "Investigation of cotton straw fibers for asphalt mixtures", J. Mater. Civ. Eng., c. 32, sayı 5, s. 4020105, 2020.
- [38] X. Yu vd., "Influence of chemically-modified cotton straw fibers on the properties of asphalt mortar", Case Stud. Constr. Mater., c. 18, s. e01787, 2023.
- [39] A. Foroutan Mirhosseini, A. Kavussi, M. H. Jalal Kamali, M. M. Khabiri, ve A. Hassani, "Evaluating fatigue behavior of asphalt binders and mixes containing Date Seed Ash", J. Civ. Eng. Manag., c. 23, sayı 8, ss. 1164–1175, 2017.
- [40] S. AlKheder, M. Alkhedher, ve K. A. Alshraideh, "The effect of using activated dates seed on Hot Mix Asphalt performance", Constr. Build. Mater., c. 269, s. 121239, 2021.
- [41] Bitüm ve bitümlü bağlayıcılar-Yumuşama noktası tayini-Halka ve bilge yöntemi, TS EN 1427, 2015.
- [42] Bitüm ve bitümlü bağlayıcılar-İğne batma derinliği tayini, TS EN 1426, 2025.
- [43] Bitümler ve bitümlü bağlayıcılar - Kuvvet uygulamalı süneklik yöntemiyle modifiye bitümün gerilme özelliklerinin belirlenmesi, TS EN 13589, 2018.
- [44] Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt Binder (Rolling Thin-Film Oven Test), ASTM D2872, 2022.
- [45] Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer, ASTM D 4402, 2012.
- [46] C. B. İnce, "Çöp Atıklarından Elde Edilen Geopolimerlerin Sıcak Karışım Asfalt Kaplamalarda Kullanımının Araştırılması", Doktora Tezi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İnönü Üniversitesi, Malatya, 2023.
- [47] K. G. Müdürlüğü, Karayolu Teknik Şartnamesi. İstanbul, 2023.

Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

"Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur."

"Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır."

Teşekkür

Bu çalışmada, laboratuvar çalışmalarında yardımları olan Mersin Karayolları Bölge Müdürlüğüne ait yol inşaatı şantiyesinde çalışan arkadaşım İnş. Müh. Erhan Göldoğan'a katkılarından dolayı teşekkür ederim.