

Geri Dönüştürülmüş Asfalt Kaplama Malzemesinin Betonda Kullanımı Üzerine Bir Araştırma

A Research on The Use of Recycled Asphalt Coating Material in Concrete

Dursun KIR¹, Yakup KIR²

¹Iğdır Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği ABD, Iğdır

²Çankırı Karatekin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Çankırı

Doi: 10.51764/smutgd.1059750

Geliş Tarihi : 18.01.2022

Kabul Tarihi : 29.05.2022

ÖZET

Doğal kaynaklarımızın giderek yok olması, agrega temini için yeni kaynakların araştırılması ve bitüm malzemesi konusunda dışa bağımlı olunması, yıpranmış asfalt kaplamaların yeniden kullanımı konusunda teşvik edici olmaktadır. Ayrıca asfalt kaplamaların ekonomik açıdan yüksek değere sahip olması da kaplamaların yeniden kullanılabilirliği üzerinde çalışılması gerektiği düşüncesini doğurmaktadır.

Bu çalışmada; yol inşasında kullanılan asfalt kaplamanın geri dönüştürülmesi ve geri dönüşüm yöntemlerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Ayrıca geri kazanılmış asfalt kaplama malzemesi üzerine yapılan bilimsel çalışmalar incelenmiştir. Çalışma sonucunda; geri dönüştürülmüş asfalt kaplama agregalarının betonun basınç dayanımı ve akışkanlık değerlerinde azalma, tuza ve dona karşı dayanımlarında ise artış meydana geldiği görülmüştür. Bunun yanı sıra atık asfalt kaplamaların ekonomiklik, sürdürülebilirlik ve enerji tasarrufu yönünden oldukça değerli bir atık olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca yıpranmış, bozulmuş eski asfalt kaplamaların yeniden kullanımı çevre korunumu açısından oldukça önem arz ettiği anlaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Geri dönüşüm, asfalt, beton, bitüm

ABSTRACT

The gradual disappearance of our natural resources, the search for new resources for aggregate supply and foreign dependence on bitumen materials encourage the reclaimed asphalt pavement. In addition, the high economic value of asphalt pavements gives rise to the idea that the reusability of the pavements should be studied.

In this study; It is aimed to recycle the asphalt pavement used in road construction and to examine the recycling methods. In addition, scientific studies on recycled asphalt pavement material were examined. In the result of study; It was observed that the compressive strength and fluidity values of the recycled asphalt pavement aggregates decreased and the resistance to salt and frost increased. In addition, it has been determined that waste asphalt pavements are a very valuable waste in terms of economy, sustainability and energy saving. In addition, it has been understood that the reuse of worn and deteriorated asphalt pavements is very important in terms of environmental protection.

Keywords: Recycle, asphalt, concrete, bitumen

1. GİRİŞ

Yolların yapımı, işletimi ve bakımı önemli bir çevresel etki taşımaktadır (Anastasiou vd., 2015). Yol çalışmaları, küresel enerji tüketiminin yaklaşık %28'ini ve küresel CO2 emisyonlarının yaklaşık %22'sini oluşturmaktadır (Abergel vd., 2017).

Asfalt betonu dünyada en çok geri dönüştürülen malzemedir (Jahangiri vd., 2019). Bununla birlikte, onlarca yıllık artan kullanımın ardından, geri kazanılmış asfalt kaplamanın asfalt karışım tasarımlarına dahil edilmesine yönelik prosedürler tamamen performansa dayanmamaktadır (Xiao vd., 2019). Bu malzemelerin asfalt kaplamalarda geri dönüştürülmesi, potansiyel olarak sürdürülebilir bir çözüm olmakta ve doğru kullanıldığında genellikle performans faydaları sağlayabilmektedir (Shirzad vd., 2018).

Yıpranmış ya da deforme olmuş asfalt kaplamaların bulunduğu alandan kazınarak yeni üretilen asfalt karışımlarda tekrardan kullanılmasına geri dönüşüm denilmektedir. Eski asfalt kaplamanın yeni üretime katılması mevcut kaynaklarımızın ekonomik ve teknik açıdan daha etkili kullanılması için önem arz etmektedir. Sürekli büyüyen ve genişleyen bir karayolu ağına sahip ülkemizde ihtiyacı karşılamak amacıyla üst yapılarda sürekli bir iyileşmeye gidilmektedir. Eski asfalt kaplamanın tekrar üretime katılması hem ekonomik açıdan hem de çevre korunumu açısından büyük faydalar sağlamaktadır (Güngör vd., 2008).

Geri kazanılmış asfalt kaplama, eski asfalt kaplama malzemesinin kaldırılmasının sonucudur. Geri kazanılmış asfalt kaplama, eskitilmiş asfalt çimentosu ile kaplanmış yüksek kaliteli, iyi derecelenmiş agregadan oluşur. Asfalt betonunun kaldırılması, yeniden yapılanma, yeniden kaplama veya gömülü tesislere erişim sağlamak için yapılmaktadır (Al-Oraimi vd., 2009).

Geri kazanılmış asfalt kaplamanın geri dönüştürülmesi, günümüzde üstyapı endüstrisinde, işlenmemiş inşaat malzemelerinden ve inşaat maliyetlerinden tasarruf sağlayan yaygın bir sürdürülebilir uygulamadır (Wang vd., 2018).

Asfalt kaplamaların yapım ve çevresel maliyetleri, değerli geri dönüştürülebilir malzemeler kullanıldığında tutarlı bir şekilde azaltılabilmektedir (Moon vd., 2014).

Bu çalışmada; yol inşasında kullanılan asfalt kaplamanın geri dönüştürülmesi ve geri dönüşüm yöntemlerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Ayrıca geri kazanılmış asfalt kaplama malzemesi üzerine yapılan bilimsel çalışmalar incelenmiştir.

2. ASFALT ENDÜSTRİSİ

Türkiye'de asfalt imalatı ilk olarak özel sektör tarafından 1956 yılında yapılmıştır. Ardından 1960 yılında Karayolları Genel Müdürlüğü asfalt plenti satın alarak üretime devam etmiştir. Bu tarihten sonra asfalt kaplamalı yolların sayısı artmaya başlamıştır. 1970 yılında asfalt kaplı yol uzunluğu 17.124 km'ye ulaşmıştır. 1970 ortalarında çevre yolu yapımına başlanılmasının ardından asfalt endüstrisinde patlama yaşanmıştır. Özel sektördeki çoğu firma asfalt üretimi amacıyla makine parkları kurup asfalt endüstrisine hızlı bir giriş yapmışlardır (Ünlü, 2019).

Otomotiv sanayisinin gelişmesi yük ve yolcu taşımada karayolunun aktif bir şekilde kullanılması asfalt kaplamalı yol talebini arttırmıştır. 1980 yılında asfalt kaplı yol uzunluğu 34.205 km'dir. Nüfusun artması yeni yollar ihtiyacını doğurmuş bu durumda Türk asfalt enstitüsü çalışmalarını hızlandırmıştır. 2000'li yıllarda trafiğin artması bölünmüş yol yapım çalışmalarını da beraberinde getirmiştir (Ünlü, 2019).

Ülkemizde her yıl yaklaşık 15 milyon ton asfalt üretimi gerçekleşmektedir. Bunun 3-4 milyon tonluk kısmı KGM tarafından yol yapım çalışmalarında kullanılmaktadır. 1 milyon tonluk kısmı özel sektörler tarafından, kalan 10 milyon tonluk kısım ise yol yapımında kullanılmak üzere belediyelere verilmiştir (Dikicioğlu, 2021).

3. ASFALTIN YENİDEN KULLANIMI (GERİ DÖNÜŞÜM)

Yeniden kullanım (geri kazanım/geri dönüşüm), işlevini tamamlamış malzemenin başka bir işlev için yeniden kullanılması durumuna denilmektedir. Atık yönetiminin devam arz etmesi ve geri dönüşümün teşvik edilmesi amacıyla halk, kamu ve özel kurum ve kuruluşlar birlikte hareket etmekte ve yeniden kullanılabilir atıklar için alanların oluşturulması konusunda bilgilendirilmektedir.

Çeşitli uygulamalarda katı atıkların geri dönüşümü üzerinde çalışılmaktadır. Karayolları dünyanın en iyi geri kazanım alanlarıdır.

Asfalt kaplamasının geri dönüşümünde, eski kaplamadan alınan malzemeler yeni malzemelerle karıştırılmaktadır. Elde edilen karışımlar genellikle şartnamelerde yer alan özellikleri taşımaktadır. Üretilen karışımlar eski kaplamaların çıkarılmış oldukları bölgelere serilmekte veya asfalt kullanımını gerektiren herhangi bir yere uygulanabilmektedir (Mazlum, 2014). Günümüz teknolojisiyle kullanılan teknik ve uygulama yöntemleri asfaltın geri kazanımının yeni asfalt üretiminde kullanım oranı yaklaşık %80 civarındadır (Al-Ali, 2016).

Asfalt kaplamaların geri kazanımı genellikle sıcak karışım asfalt üretiminde kullanılmaktadır. Enerjinin verimli bir şekilde kullanımı, atık asfaltın tekrar kullanımı sonucu elde edilen ekonomik kazanç, agrega kaynaklarının hızla tükenmesi ve üretim maliyelerinde meydana gelen artış parametreleri göz önüne alındığında, sadece Dünya değil Türkiye’de asfalt kaplamalarının geri kazanımı konusunda yoğun çalışmalar yürütülmektedir (Mazlum, 2014)

3.1. Dünya’da Asfaltın Yeniden Kullanımı

ABD başta olmak üzere, Kanada, Hollanda, İngiltere, İspanya, Japonya, Almanya ve Fransa gibi ekonomik açıdan güçlü, çevre konusunda hassas, teknolojik olarak gelişmiş ülkelerde geri kazanılmış asfalt kaplama yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Gürer vd., 2004). Geri kazanılmış asfalt kaplama uygulaması ilk olarak 1977 yılında petrol krizinin baş gösterdiği yıllarda, ABD’de Florida West Palm Beach’te yapılmıştır. Yapılan denemeler sonucunda kullanılan geri dönüştürülmüş malzemelerin optimum karışım oranı belirlenmiştir. Bunun neticesinde büyük ekonomik ve çevresel kazançlar elde edilmiştir. Zaman içerisinde diğer Avrupa ülkeleri de geri kazanımlı asfalt kaplaması uygulamalarını uygulamaya başlamışlardır. 1978’de Panama City’de, 1979 yılında, Ocala’da yeni bir deneme yapılmış ve geri kazanımlı asfalt kaplama karışımı 31.500 ton yeni asfalt üretilmiştir (Mazlum, 2014). 1980 yılında düzenlenen şartnamede geri kazanımlı asfalt kaplama kullanımı %60 olarak sınırlandırılmıştır. Bugün Florida’da bulunan mevcut yollarda %60 oranında geri kazanımlı asfalt kaplama malzemesi katkılı karışımlar kullanılarak yollar yapılmıştır (Al-Ali, 2016).

2001 yılında, Avrupa’da 80,3 milyon ton asfalt kaplama geri kazanılmıştır (Sönmez, 2014). ABD’de yılda yaklaşık 70 milyon ton asfalt kaplama geri kazanılmaktadır. Bunların %97’sinden fazlası üstyapı uygulaması için yeniden kullanılmakta ve bu da asfalt kaplamayı ABD’de en çok geri dönüştürülmüş üstyapı malzemesi haline getirmektedir (West vd., 2014; Felchhetto vd., 2017). Ayrıca ABD’de her yıl üretilen asfaltın yaklaşık %15’i geri kazanımlı asfalt kaplamalardan meydana gelmektedir. Bu da ABD’nin bir yılda 300 milyon dolar tasarruf etmesi anlamına gelmektedir (Mazlum, 2014).

3.2. Türkiye’de Asfaltın Yeniden Kullanımı

Türkiye’de geri kazanımlı asfalt kaplama uygulamaları 1980’li yıllarda başlamıştır. 2000’li yıllara gelindiğinde ise büyük bir ivme kazanarak hızlı bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Ülkemizde sürekli yol yapım çalışmalarının yapılması ve yeni yollara ihtiyaç duyulması, günümüzde ve gelecekte üstyapı iyileştirilmelerine gidileceğini göstermektedir. Geri kazanımlı asfalt kaplamanın tekrardan üretime katılmasıyla asfalt üretim maliyeti azalacak ve çevre sağlığı açısından önemli bir adım atılmış olacaktır (Mazlum, 2014)

Türkiye’de geri kazanımlı asfalt uygulamasına geç başlanılmasının nedeni, her yere rahatlıkla taş ocağının açılmasından dolayı kullanılan agreganın maddi açıdan ucuz olmasıdır. En önemli nedeni ise ne yazık ki toplum olarak çevre koruma bilincinin yeterince oluşmamasıdır (Anonim 1, 2012)

4. ASFALTIN YENİDEN KULLANIM YÖNTEMLERİ

Asfaltın yeniden kullanım yöntemleri, Asfalt Geri Dönüşüm ve Rehabilitasyon Birliği (Asphalt Recycling and Reclaiming Association-ARRA) tarafından beş guruba ayrılmıştır (Tablo 1) (Miliutenko vd., 2013).

Tablo1. Geri Dönüşüm Yöntemlerinin Sınıflandırılması

GERİ DÖNÜŞÜM YÖNTEMLERİ	Soğuk Düzeltme	
	Sıcak Geri Dönüşüm	
	Sıcak Yerde Geri Dönüşüm	
	Soğuk Geri Dönüşüm	Soğuk Yerde Geri Dönüşüm Soğuk Plentte Geri Dönüşüm
	Tam Derinlikli Geri Dönüşüm	

Soğuk düzeltme (Cold planing); Yol üzerinde bulunan asfalt kaplamanın arzu edilen boy kesit, enine eğim ve derinlikte özel kazı araçları yardımıyla kaldırılması işlemine denilmektedir. Şekil 1’de verilen soğuk düzeltme işlemi sonrasında oluşan yüzey trafik için herhangi bir engel teşkil etmemektedir (Kuyucu, 2019).



Şekil 1. Soğuk düzeltme işlemi

Sıcak geri dönüşüm (Hot recycling); Geri kazanılmak için kaldırılmış asfalt malzemesinin asfalt plentlerinde yeni agrega ve bitüm ile karıştırılmasına denir (Kaya, 2011). Sıcak geri dönüşüm teknolojisi yıllardır dünya çapında bilinmekte ve kullanılmaktadır. Birçok ülkede oldukça yaygın olarak kullanılmakta ve asfalt tabakalarının frezelenmesinden elde edilen geri kazanılmış asfalt kaplamanın maksimum yeniden kullanımı için girişimlerde bulunmaktadır (Bankowski, 2018; Elkashef, 2017). Sıcak yerde geri dönüşüm (Hot in-place recycling); Katar diye adlandırılan ve birbirine dizili bir şekilde iş makinalarının alanda geri kazanım işlemini gerçekleştirmesine denilmektedir (Şekil, 2). Bu yöntem yüzeysel, yeniden karıştırma ve yeniden kaplama olmak üzere üç biçimde uygulanmaktadır (Buczynski, 2016).



Şekil 2. Sıcak yerde geri dönüşüm (4) hülya

Soğuk geri dönüşüm (Cold in-place recycling); Isıl işlem uygulanmadan yıpranmış, bozulmuş ya da hasara uğramış asfaltların kazılması, karıştırılması ve serilip sıkıştırılması işlemlerinden meydana gelmektedir (Şekil 3) (Yılmaz, 2011).



Şekil 3. Soğuk geri dönüşüm (Kuyucu, 2019)

Tam derinlikten geri kazanma (Full depth reclamation); Yıpranmış ve hasara görmüş alanın herhangi bir ısıtma işlemi uygulanmadan daha önceden tespit edilmiş derinlikte ve eğimde kazılarak geri dönüşüme kazandırılması için yapılan işlemlere denilmektedir (Ünlü, 2019).

5. GERİ DÖNÜŞÜMLÜ ASFALT KAPLAMALAR KONUSUNDA LİTERATÜRDE YER ALAN ÇALIŞMALAR

Wang vd., (2018) yaptıkları çalışmada, soğuk geri dönüştürülmüş karışımların dayanıklılığını artırmak için bir geri dönüşüm maddesi, bir emülsifiye edici madde, bir polimer değiştirici, su ve çimento dahil olmak üzere birden fazla katkı maddesini toplu olarak kullanarak bir soğuk geri dönüşüm yöntemi geliştirmeyi amaçlamışlardır. Hem emülsifiye asfalt kullanılarak geleneksel yöntemi hem de çoklu katkı maddeleri kullanılarak önerilen yöntemi, soğuk geri dönüştürülmüş karışımlar üretmek için uygulamışlardır. Sonuç olarak; Önerilen soğuk geri dönüşüm yönteminin, geleneksel yöntemden önemli ölçüde daha iyi genel performans sağladığına sahip olduğunu bildirmişlerdir.

Falchetto vd., (2017) yaptıkları çalışmada, geri dönüştürülmüş geri kazanılmış asfalt kaplama kullanılan betonun özelliklerini araştırmışlardır. Normal agregalı iki kontrol karışımı, 0,45 ve 0,5 su çimento oranları ile tasarlanmışlardır. Kontrol karışımına (%0) ek olarak, geri kazanılmış asfalt kaplama içeren karışımlar çökme, basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve elastisite modülü açısından değerlendirmişlerdir. Sonuç olarak; karışımların, 28 günlük kürlenmenin ardından 50 ve 33 MPa'lık basınç dayanımları ile sonuçlandığını bildirmişlerdir.

Kenai, vd., (2002) çalışmalarında betonda agrega olarak geri dönüştürülmüş beton ve tuğla kullanımı üzerine bir araştırma yapmışlardır. Çalışmalarında, ince agrega değişimi, kaba agrega değişimi ve her ikisini de kullanmışlardır. Yer değiştirme yüzdeleri, agreganın %25, %50, %75 ve %100 olarak belirlemişlerdir. Sonuç olarak; Geri dönüştürülmüş agrega değişiminin artmasıyla birlikte basınç dayanımında bir azalma meydana geldiğini bildirmişlerdir. Ayrıca doğal agregalı beton için çekme ve basınç dayanımı arasındaki ilişkilerin geri dönüştürülmüş agrega betonu için kullanılabileceğini bildirmişlerdir.

Güngör vd., (2009), yaptıkları çalışmada, Sakarya Köprüsü Kavşağı ve Gümüşova Arası Otoyol ve Bağlantı Yollarından temin ettiği eski asfalt kaplamayı, yeni asfalt ile birlikte kullanarak geri kazanım işlemi uygulamışlardır. Sonuç olarak; başarılı bir üretim yapıldığını bildirmişlerdir.

Elaty vd., (2020), yapmış oldukları çalışmada, beton kaplama üretimi için 250, 300 ve 350 kg/m³ dozajlı, kaba agrega yerine ağırlıkça % 0, % 15 ve % 30 oranında geri dönüştürülmüş asfalt agregası kullanarak beton üretimi yapmışlardır. Çalışmada sonuç olarak; geri dönüştürülmüş asfalt içeriğinin artmasıyla basınç dayanımı, elastisite modülü ve poisson oranında azalma meydana geldiğini tespit etmiştir. Ayrıca geri dönüştürülmüş asfaltın betonda kullanımının herhangi bir sakınca oluşturmayacağını bildirmişlerdir.

Rezaei vd., (2020), yapmış oldukları çalışmada silindirle sıkıştırılmış betonlarda silika ve geri dönüştürülmüş asfalt agrega kullanımını incelemişlerdir. Ürettikleri numunelerin mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Çalışmada %50 oranında geri dönüştürülmüş asfalt ve %3, %6, %9 ve %12 oranında silika kullanmışlardır. Sonuç olarak silika miktarının artmasıyla basınç dayanım değerinde artış meydana geldiğini bildirmişlerdir.

Li-Ping vd., (2020), yapmış oldukları çalışmada çimento bazlı, yüksek süneklik özelliğine sahip kompozit üretiminde doğal agrega yerine geri dönüştürülmüş asfalt agrega kullanımının kompozit özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Geri dönüştürülmüş asfalt agregasını %0 %20 %40 %60 %80 %100 oranlarında kullanmışlardır. Çalışmada sonuç olarak; geri dönüştürülmüş asfalt agregasının kompozitlerin akışkanlığını düşürdüğünü ve çekme gerilme dayanımını arttırdığını bildirmişlerdir. Ayrıca geri dönüştürülmüş asfalt agregalarının doğal agrega yerine kullanılmalarında herhangi bir sakınca olmadığını tespit etmişlerdir.

Abraham ve Ransinchung (2019), yapmış oldukları çalışmada çimento harcında geri dönüştürülmüş asfalt agregalarının kullanımını incelemişlerdir. Çalışmada ince agrega yerine hacimce %25, %50, %75 ve %100 oranında geri dönüştürülmüş asfalt agregası ile silis dumanı ve aktif şeker kamışı külü kullanmışlardır. Çalışmada sonuç olarak; geri dönüştürülmüş asfalt agregalarının üretilen numunelerin basınç ve eğilme dayanımlarını olumlu yönde etkilediğini bildirmişlerdir. Bunun yanı sıra geri dönüştürülmüş asfalt agrega katkıları içerisinde sürüklenen havanın numunenin don ve sülfat etkisinden koruduğunu tespit etmişlerdir.

Ghazy vd., (2022), yapmış oldukları çalışmada, kaba agrega yerine hacimce %0, %15, %30, %45, %60 ve %100 oranında geri dönüştürülmüş asfalt kaplama malzemesi kullanmış ve betonun performansını değerlendirmişlerdir. Çalışmada, 250, 300 ve 350 kg/m³ olmak üzere üç farklı çimento miktarı kullanmışlardır. Bunun yanı sıra çimento yerine ağırlıkça %10, %20 ve %30 uçucu kül ve hacimce %0.5 ve %1 oranında polipropilen elyaf kullanmışlardır. Elde edilen numunelere basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, eğilme dayanımı, elastisite modülü, Poisson oranı ve tokluk deneyleri uygulamışlardır. Elde ettikleri veriler incelendiğinde; geri dönüştürülmüş asfalt kaplama agregalarının betonun tüm yaşlarında (7, 28, 56 gün) basınç dayanımında azalma (referans numunesine göre) meydana getirdiğini, bu azalmanın nedeninin geri dönüştürülmüş asfalt kaplama partikülleri ile çevreleyen çimento harcı arasındaki ara yüzey bağının zayıflığından kaynaklandığını bildirmişlerdir. En iyi basınç dayanımının 28 günde, %15 geri dönüştürülmüş asfalt kaplama agregalı, 300 kg/m³ çimento içeriği ve %10 uçucu kül katkılı beton numunelerinden elde etmişlerdir. Kullanılan polipropilen elyaf katkısının betonun basınç dayanımına olumlu etkisi olduğunu tespit etmişlerdir. Geri dönüştürülmüş asfalt kaplama agrega miktarının artmasının yarmada çekme dayanımı ve eğilme dayanımı değerlerinde azalma meydana getirdiğini bildirmişlerdir. Uçucu kül ikamesinin bu azalmayı bir miktar iyileştirdiğini tespit etmişlerdir. Ayrıca polipropilen elyaf kullanımı sonucu eğilme dayanımında iyileşme olduğunu bildirmişlerdir. Elastisite modülü, Poisson oranı ve tokluk deney verilerine bakıldığında; Geri dönüştürülmüş asfalt kaplama agrega miktarının artmasıyla elastisite modülünün önemli ölçüde azalma meydana geldiğini ifade etmişlerdir. Beton karışımına uçucu kül ve polipropilen elyaf ikame edilmesi durumunda da elastisite modülünün azaldığını tespit etmişlerdir. Ayrıca geri dönüştürülmüş asfalt kaplama agregası ile üretilen betonların, çimento harcındaki asfalt kaplama filminin ara yüzü ve agrega parçacıkları, çatlağın yayılmasını önleyebilmekte ve ardından betonun sünekliğini ve tokluğunu artırabilmekte olduğunu ifade etmişlerdir. Ayrıca uçucu kül ve polipropilen elyaf ikamesinin tokluk değerinde artışa neden olduğunu tespit etmişlerdir.

Abadelqader vd., (2021) yaptıkları alışmada geri dönüştürülmüş asfalt kaplamasını ve geri dönüştürülmüş kaba agregayı 20 °C, 200 °C, 400 °C ve 500 °C sıcaklığa maruz bıraktıktan sonra beton üretimine dahil etmişlerdir. Beton üretiminde kullanılan doğal kaba agrega yerine ağırlıkça %10, %20 ve %30 oranlarında geri dönüştürülmüş asfalt kaplama ve yine doğal kaba agrega yerine ağırlıkça %20, %40, %60 ve %100 oranında geri dönüştürülmüş kaba agrega kullanarak toplam 7 farklı seri beton üretimi yapmışlardır. Ayrıca %90 geri dönüştürülmüş kaba agrega + %10 geri dönüştürülmüş asfalt kaplama, %80 geri dönüştürülmüş kaba agrega + %20 geri dönüştürülmüş asfalt kaplama, %70 geri dönüştürülmüş kaba agrega + %30 geri dönüştürülmüş asfalt kaplama olmak üzere 3 farklı seri, genel toplamda ise 10 farklı seri beton üretimi yapmışlardır. Ürettikleri beton numunelerine basınç dayanımı, yarmada çekme ve eğilme dayanımları, basınç gerilme-şekil değiştirme eğrileri ve elastisite modülünü incelemişlerdir.

Çalışmanın sonucunda; aynı sıcaklıkta geri dönüştürülmüş asfalt kaplama miktarının artmasıyla basınç dayanımı değerlerinde azalma meydana geldiğini tespit etmişlerdir. Mukavemetteki bu düşüşlerin ana nedeninin, karışımlardaki agregalar ile yeni çimento arasındaki bağı etkileyen geri dönüştürülmüş agregaları kaplayan eski asfalt tabakası olduğunu ve bunun arayüz geçiş bölgesinin (ITZ) zayıf davranışına neden olduğunu, böylelikle mukavemette azalma meydana geldiğini bildirmişlerdir. Geri dönüştürülmüş asfalt kaplama bitümlü bir malzeme olması nedeniyle agregaları kaplamakta olduğunu, sıcaklık artışları karşısında viskozitesinde azalma meydana geldiğini bildirmişlerdir. 200 °C'de geri dönüştürülmüş asfalt agrega içerisindeki suyun buharlaştığı ve bu buharlaşmanın basınca yol açtığını bildirmişlerdir. 400 °C sıcaklıkta, CH kristallerinin büyük bir kısmının ayrıştığını, 500 °C sıcaklıkta, hemen hemen tüm CH kristalleri ve C-S-H jelin bir kısmı ayrıştığını tespit etmişlerdir. Daha gevşek hale gelen içyapının, basıncın düşmesine neden olduğunu tespit etmişlerdir.

Geri dönüştürülmüş kaba agrega + geri dönüştürülmüş asfalt kaplama karışımları incelendiğinde; tüm sıcaklıklarda basınç dayanımında azalma meydana geldiğini tespit etmişlerdir. Sıcaklığın artmasıyla mikro yapının bozulduğunu, matrisin daha gevşek hale geldiğini ITZ'nin davranışının çok daha kötü olduğunu bu durumda bağın azalmasına neden olarak basınç dayanımının düşmesine yol açtığını tespit etmişlerdir.

Yarmada çekme dayanım değerleri incelendiğinde; basınç dayanımında olduğu gibi aynı sıcaklıkta geri dönüştürülmüş asfalt kaplama ikame oranı arttığında yarmada çekme dayanım değerlerinde azalma meydana geldiğini bildirmişlerdir. Dayanımın azalmasının nedeninin, ITZ'de zayıflığa neden olan ve buna bağlı olarak karışımlardaki agregalar ve yeni çimento arasındaki bağı etkileyen geri dönüştürülmüş agregaları kaplayan eski asfalt tabakasından kaynaklandığını tespit etmişlerdir.

Geride dönüştürülmüş kaba agrega + geride dönüştürülmüş asfalt kaplama karışımları yarmada çekme dayanımı incelendiğinde; aynı sıcaklıkta geride dönüştürülmüş asfalt kaplama ikame oranı arttığında yarmada çekme dayanım değerlerinde azalma meydana geldiğini bildirmişlerdir. Ayrıca sıcaklığın armasıyla da dayanım değerinde azalma meydana geldiğini bildirmişlerdir. Bunun nedenini ise sıcaklık arttığında, geride dönüştürülmüş asfalt kaplamanın viskozitesinde azalma, mikro çatlaklar, ITZ'nin zayıf bağı ve performansı, CH kristallerinin toplam ayrışması ve C-S-H jelinin kısmi ayrışması olarak açıklamışlardır.

Eğilme dayanımı değerleri incelendiğinde; Tüm farklı sıcaklıklar için aynı sıcaklıkta geride dönüştürülmüş asfalt kaplamanın değiştirme oranı arttığında eğilme dayanımın azaldığını ve bu azalma aralığının %27'den %31'e çıktığını bildirmişlerdir.

Geride dönüştürülmüş kaba agrega + geride dönüştürülmüş asfalt kaplama karışımları eğilme dayanımı incelendiğinde; tüm farklı sıcaklıklar için aynı sıcaklıktaki geride dönüştürülmüş kaba agrega + geride dönüştürülmüş asfalt kaplama karışımlarında, geride dönüştürülmüş asfalt kaplama değiştirme seviyesi arttığında mukavemet azaldığı bildirilmiştir.

Basınç gerilme-şekil değiştirme eğrileri incelendiğinde; Sıcaklık arttıkça, tepe gerilimi eğrilerin sağ tarafına doğru hareket ettiğini ve tepe gerilimi azaldığını bildirmişlerdir. Tüm karışımlar için en yüksek tepe geriliminin 20 °C sıcaklıkta elde edildiğini ifade etmişlerdir.

Elastisite modülü incelendiğinde; Tüm farklı sıcaklıklar için aynı sıcaklıkta geride dönüştürülmüş asfalt kaplama ve geride dönüştürülmüş kaba agreganın yer değiştirme oranı arttığında elastisite modülü değerlerinin azaldığını bildirmişlerdir. Tüm karışımlarda elastik modül, sıcaklık 20 °C'den 500 °C'ye yükseltildiğinde azaldığını, bu yüzden mikro yapıdaki hasar derecesinin yüksek olduğunu ve karışımların daha az kompakt hale geldiğini tespit etmişlerdir.

Yung-Vergas vd., (2022) yaptıkları çalışmada, geride dönüştürülmüş asfalt çimento kaplamalarının granülometrik dağılımını ve asfalt çimento içeriğini analiz etmişlerdir. Çalışmada heterojenliklerini doğrulamak için Kolombiya'nın dört şehrinden geride kazanılmış asfalt kaplama örnekleri almışlardır. Alınan geride kazanılmış asfalt kaplama malzemesinin, "Instituto Nacional de Vías"ın Kolombiya yönetmeliklerine uygun olarak ekstraksiyon ve asfalt içeriği testleri ile malzeme granülometrik dağılımını belirlemişlerdir. Çalışmada sonuç olarak; dört şehirden alınan numuneler için heterojen olduklarını doğrulayan farklı granülometriler bulmuşlardır. Kullanılan agregalar, bir MDC-19 asfalt karışımı için INVÍAS yönetmeliğinin üst sınırına doğru bir eğilim gösterdiğini bildirmişlerdir. Bu eğilim agregaların ince bir malzeme olma eğiliminde olduğunu ifade ettiğini ve ince parçacık oluşumunun öğütme işlemi ile ilişkili olduğunu bildirmişlerdir. Bunun yanı sıra tüm şehirlerin granülometrisinin, 2 mm'lik parçacıklarda bir üst sınıra doğru hareket eden merkezi bir eğilime (ortalama) sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Dört şehrin granülometrisini ayrı ayrı incelediklerinde, asfalt granülometrilerinde heterojenliklerini gösteren farklı bir eğilim sergilediklerini vurgulamışlardır. Ayrıca asfalt çimentosu içeriğini %4.0 ile %5.0 arasında değerlere sahip olduğunu tespit etmişlerdir.

Bittencourt vd., (2021) yaptıkları çalışmada geride dönüştürülmüş asfalt kaplama agregalarının geçirimli betonlar üzerinde etkisini araştırmışlardır. Doğal (referans numunesi) ve geride dönüştürülmüş asfalt kaplama agregalarla beş seri karışım yapmışlardır. Karışımlarda doğal agrega yerine ağırlıkça %10, %20, %30, %50 ve %100 oranında geride dönüştürülmüş asfalt kaplama agregası kullanmışlardır. Elde ettikleri numunelere fiziksel (boşluk içeriği ve yoğunluk), mekanik (basınç dayanımı, çekme dayanımı ve elastisite modülü) ve hidrolik (sızma ve tıkanma testine dayalı) deneyler uygulamışlardır. Çalışma sonucunda, çimento matrisi ve asfalt kaplı agregalar arasında daha büyük ve daha gözenekli bir ITZ oluştuğunu ve bunun da daha büyük bir çatlak başlangıcı olasılığına ve daha kolay çatlak ilerlemesine izin verdiğini böylece mukavemet ve modülü azalma meydana geldiğini bildirmişlerdir. Geride dönüştürülmüş asfalt kaplama agrega miktarının artmasıyla eğilme dayanımında azalma meydana geldiğini tespit etmişlerdir. Ayrıca tüm betonların sızma ve dayanım gereksinimlerine göre geçirimli beton sınıfına girdiğini ve optimum karışımın ağırlıkça %20 oranında geride dönüştürülmüş asfalt kaplama agrega katkılı beton numunelerinden elde edildiğini bildirmişlerdir. Bakım gerektirmeyen işlemle tıkanma testinde, tüm numunelerin sızma kapasitesinde ani bir düşüşle ni kabul etmişlerdir. 28 günlük basınç dayanımı yaklaşık 11 MPa, eğilme dayanımı 2.1 MPa ve su sızması 2.9 103 m/s olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca elde edilen beton karışımlarının genel bisiklet yolları, kaldırımlar veya daha düşük dayanım düzeyine sahip diğer amaçlar için yapısal olmayan geçirimli beton olarak kullanım için standartlarda belirlenen minimum değerleri elde etmişlerdir.

Ashteyat vd., (2021) yaptıkları çalışmada silindirle sıkıştırılmış beton (SSB) üretiminde geri dönüştürülmüş asfalt kaplama agregası, geri dönüştürülmüş beton agregası ve silis dumanının (SD) kullanım potansiyelini incelemiştir. Çalışmalarında doğal agrega tamamen geri dönüştürülmüş asfalt kaplama agregası (RAP) ve geri dönüştürülmüş beton agregası (RCA) ile değiştirmişlerdir. Agreganın kullanım oranını %90 RAP+%10 RCA, %80 RAP+%20 RCA, %70 RAP+%30 RCA, %60 RAP+%40 RCA, %50 RAP+%50 RCA, %40 RAP+%60 RCA, %30 RAP+%70 RCA, %20 RAP+%80 RCA ve %10 RAP+%90 RCA olarak belirlemiştir. Ayrıca Silis dumanını %2,5 ve %5 oranında çimento ikame malzemesi olarak kullanmışlardır. Üretilen numuneler üzerinde fiziksel (su emme, yoğunluk, elastisite modülü), mekanik (basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, eğilme dayanımı) deneyleri yapmışlardır. Sonuç olarak; silindirle sıkıştırılmış beton numunelerinde RCA ve RAP kullanılması durumunda, tüm karışımların basınç dayanımının önemli ölçüde azaldığını bildirmişlerdir. Dayanımdaki bu azalmanın nedenini, RAP ve RCA, harç matrisi ve arayüzey geçiş bölgesi (ITZ) özelliklerinden kaynaklandığını ifade etmişlerdir. Ayrıca eski harç ve asfalt tabakasının varlığı, karışımdaki agrega ile yeni çimento arasındaki bağı etkilediğini, ITZ'nin zayıf davranışına neden olduğunu ve bu da mukavemette azalmaya yol açtığını tespit etmişlerdir. %2,5 ve %5 oranında SD kullanılmasının bu karışımların basınç dayanımı sonuçları üzerinde önemli bir etkisinin olmadığını not etmişlerdir. En yüksek basınç dayanımı, 15.25 MPa ve 16.44 MPa ile %50 RCA+%50 RAP ve %30 RCA+%70 RAP+5 SF karışımlarından elde ettiklerini bildirmişlerdir.

SSB'un yarmada çekme dayanımının önemli ölçüde azaldığını ve RCA ve RAP için basınç mukavemeti sonuçlarıyla aynı eğilimi gösterdiğini ifade etmişlerdir. En yüksek yarmada çekme dayanımı 15.25 MPa ve 16.44 MPa ile %50 RCA + %50 RAP ve %30 RCA + %70 RAP + %5 SF karışımlarından elde edildiğini vurgulamışlardır.

Eğilmede çekme dayanım değerlerinin, normal agregalı referans numunelerine kıyasla azaldığını bildirmişlerdir. Ancak SSB'nun eğilmede çekme dayanımındaki yüzde azalma, RCA ve RAP'nin sıkıştırma ve yarma mukavemetindeki azalmaya kıyasla önemli olmadığını tespit etmişlerdir. Eğilmede çekme dayanımındaki maksimum azalma %36 iken, aynı karışımlar %70 ve %60 daha düşük basınç ve yarma dayanımına sahip olduğunu bildirmişlerdir.

RCA ve RAP'li SSB'nin elastisite modülünün önemli ölçüde azaldığını ve en yüksek elastisite modülü değerinin %30 RCA+%70 RAP+5 SF karışımı numunelerden elde edildiği ifade edilmiştir. Bununla birlikte, SF'nin çimento ile değiştirilmesi, agrega yığını ile SSB karışımlarında basınç dayanımını azalmasına neden olduğunu vurgulamışlardır. Ayrıca %30 RCA + %70 RAP karışımı dışında elastisite modülünde azalma meydana geldiğini tespit etmişlerdir. Yazarlar tüm bu azalmaların nedeninin yeni çimento hamuru ile SSB'deki yeni agrega yığını arasındaki zayıf yapışma özelliği olduğunu ifade etmişlerdir.

Ulaşılan en yüksek su emilim değeri %7.22 ile %60 RAC+%40 RAP numunelerinden sağlamışlardır. Ayrıca %90 RAC+%10 RAP, %0 SF, %80 RAC+%20 RAP, %0 SF, %90 RAC+%10 RAP, %2.5 SF, %80 RAC+dışındaki tüm karışımların kriterleri karşıladığını vurgulamışlardır. %20 YYEP, %2,5 SF, %60 RAC+%40 YYEP, %2,5 SF, %50 RAC+%50 YYEP, %2,5 SF, %90 RAC + %10 YYEP, %5 SF, %80 RAC+%20 YYEP, %5 SF, %70 RAC+%30 YYEP, %5 SF ve %60 RAC+%40 YYEP, %5 SF su absorpsiyonu adil beton absorpsiyon limiti içerisinde olduğunu tespit etmişlerdir.

SD'nin özgül ağırlığının geleneksel ve modifiye edilmiş agregalardan daha düşük olduğu için karışım içerisindeki SD oranının artmasıyla yoğunluğunda azalma meydana geldiğini tespit etmişlerdir. Ayrıca, RCA ve RAP malzemeleri, agrega ile birleştirilmiş bitüm ve çimento nedeniyle NA'dan farklı olduğunu ve daha düşük yoğunluk ve daha yüksek su emme kapasitesi sağladığını vurgulamışlardır. Yoğunluktaki azalma oranının yaklaşık %12-14 olduğunu ifade etmişlerdir. Son olarak, RCA-RAP karışımlarının hiçbirisi, ana yapısal katman olarak kullanılmak üzere önerilen basınç dayanımını sağlayamadığını, ancak temel veya alt temel katmanı olarak kullanılabileceğini tespit etmişlerdir.

Patel vd., (2022) yapmış oldukları çalışmada, standart yapısal mukavemeti sağlayan ve çevresel maliyetleri azaltan beton kaplamalarda geri kazanılmış asfalt kaplama ve geri dönüştürülmüş atık camın optimal oranını araştırmışlardır. Absorpsiyon, basınç, eğilme ve yarma çekme dayanımı testlerini, değişen oranlarda kazanılmış asfalt kaplama ve geri dönüştürülmüş atık camdan oluşan üç grup beton numune üzerinde gerçekleştirmişlerdir. Laboratuvarında yaptıkları deneylerden elde ettikleri değerler göz önüne alındığında, geri dönüştürülmüş malzemeler içeren beton numunelerinin, işlenmemiş agregalara sahip kontrollü numunelerden daha iyi yapısal kaliteye sahip olduğunu tespit etmişlerdir.

%15 geri kazanılmış asfalt kaplama ve %15 geri dönüştürülmüş atık camlı numunelerin, basınç, yarma çekme ve eğilme mukavemeti değerlerinin sırasıyla %9,36, 1 ve %3,88 oranında arttığını bildirmişlerdir. Ayrıca %10 geri kazanılmış asfalt kaplama ve %20 geri dönüştürülmüş atık cam içeren beton blokların, basınç, yarmada çekme ve eğilme mukavemetinin sırasıyla %18,77, %48,9 ve %3,09 oranında arttığını tespit etmişlerdir.

Yao vd., (2022) çalışmalarında yaşam döngüsü perspektifinden üstyapı bakımı ve rehabilitasyonunda geri kazanılmış asfalt kaplama içeren Polietilen Tereftalat modifiye asfalt kullanımının teknik, çevresel ve ekonomik fizibilitesini araştırmışlardır. Yapmış oldukları teknik fizibiliteyi laboratuvar test sonuçları ile kanıtlamışlardır. Çevresel ve ekonomik etkiyi ölçmek için yaşam döngüsü değerlendirmesi ve yaşam döngüsü maliyet analizi yapmışlardır. Daha sonra, kritik değişkenleri belirlemek, tolere edilebilir değişken varyasyonlarını belirlemek ve karamsar senaryo altında potansiyel kaybı tahmin etmek için duyarlılık analizi yapmışlardır.

Çalışma sonucunda, atık Polietilen Tereftalat ve geri kazanılmış asfalt kaplamanın kaldırılma dahil edilmesinin yaşam döngüsü maliyetlerini ve sera gazı emisyonlarını sırasıyla %26,2 ve %29,0'a kadar azaltılabileceğini tespit etmişlerdir. Ayrıca Polietilen Tereftalat modifiye asfalt kullanmanın faydalarının potansiyel kayıplardan önemli ölçüde daha fazla olduğunu bildirmişlerdir.

Gnanamurthy ve Kumar, (2022) yapmış oldukları çalışmada, yüksek geri dönüştürülmüş asfalt kaplama malzemesi ve atık plastik içeren yüzey tabakasının inşası için kapsamlı saha ve laboratuvar çalışmaları yoluyla tasarım metodolojisini formüle etmişlerdir. Ağırlıkça %20 oranında bakır agrega, %80 oranında geri dönüşüm asfalt kaplama agregaları ve %8 oranında bitüm içeren ve atık plastik içeren 25 mm kalınlığında yakın dereceli premiks halıdan oluşan bir test parkuru yapmışlardır. Bu parkuru mevcut yol ve trafik koşullarında performans değerlendirmesine tabi tutmuşlardır. Laboratuvar ve saha test sonuçları baz alındığında; geri dönüşüm ajanı olarak bitümün ağırlığına göre %8 atık plastik ile yüksek geri dönüştürülmüş asfalt kaplama malzemesi içeriği (%80 geri dönüştürülmüş agrega) içeren bitümlü karışımın, streç ile streçten daha iyi performans gösterdiği ve ekonomik bulunduğunu tespit etmişlerdir. Standart ve şartnamelere göre gerekli özellikleri ve performans kriterlerini karşılayan, yüksek geri dönüştürülmüş asfalt kaplama içeriğine sahip, kabul edilebilir kalitede bitümlü karışımın tanımlanmasının mümkün olduğunu bildirmişlerdir.

Zhang vd., (2021) yaptıkları çalışmada, geri dönüştürülmüş asfalt karışımlarına farklı viskozitelere sahip kendi geliştirdikleri iki gençleştirici katmış ve bunların mekanik özellikleri üzerindeki etkileri kapsamlı bir şekilde değerlendirmişlerdir. Geri dönüştürülmüş asfalt karışımlarının tekerlek izi direncini ve çatlama davranışını değerlendirmek için sırasıyla tekerlek izleme testi ve üç nokta eğilme testi yapılmıştır. Geri dönüştürülmüş asfalt karışımlarının nem dayanıklılığını ve dinamik tepkisini değerlendirmek için Hamburg Tekerek İzleme (HWT) testi ve Basit Performans Testi (SPT) uygulamışlardır. Geri dönüştürülmüş asfalt karışımlarının yorulma direncini, iki noktalı eğilme testi kullanılarak değerlendirmişlerdir. Sonuç olarak; kendi geliştirdikleri gençleştiricilerin kullanılmasının, geri dönüştürülmüş asfalt karışımlarının çatlama davranışını ve yorulma ömrünü iyileştirdiğini tespit etmişlerdir. geri dönüştürülmüş asfalt kaplamaların dahil edilmesi, geri dönüştürülmüş asfalt karışımlarının tekerlek izi direncini ve dinamik modülünü iyileştirdiğini, yenileyicilerin eklenmesinin, geri dönüştürülmüş asfalt karışımlarının kalıcı deformasyona uğramasına neden olsa da, nem dayanıklılıklarının yeni asfalt karışımından daha iyi olduğunu bildirmişlerdir.

Hou vd., (2021) yaptıkları çalışmada, sıcak karışım katkısı içeren bakır ve eskitilmiş asfaltların harmanlanma derecesini değerlendirmeyi amaçlamış ve bu amaç için Fourier Dönüşümü Kızılötesi Spektroskopisi kullanılmışlardır. Bunun yanı sıra, çalışmada harmanlama verimliliği, harmanlama süresi, harmanlama sıcaklığı ve geri dönüştürülmüş asfalt kaplama içeriği gibi bazı faktörleri de araştırmışlardır. Çalışma sonucunda, tüm bu faktörlerin geri dönüştürülmüş asfalt karışımlarının harmanlanma derecesi üzerinde bireysel veya birleşik etkilere sahip olduğunu bildirmişlerdir. Uzatılmış bir harmanlama süresinin, ilk 3 dakika içinde harmanlama derecesini arttırmada daha iyi bir enerji etkinliğine sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca, harmanlama sıcaklığının artırılarak daha az enerji tüketimi ile harmanlama derecesinin verimli bir şekilde iyileştirilebileceğini ifade etmişlerdir. Bunun yanı sıra, sıcak karışım katkı maddesinin kullanılması durumunda, harmanlama verimliliğini önemli ölçüde arttırılabileceğini vurgulamışlardır.

6. SONUÇLAR

Bu çalışmada; yol yapımında kullanılan asfalt kaplamanın geri dönüştürülmesi ve geri dönüşüm yöntemlerinin incelenmesi amaçlanmış ve geri kazanılmış asfalt kaplama malzemesi üzerine yapılan bilimsel çalışmalar incelenmiştir.

Yapılan incelemeler sonucunda; Geri dönüştürülmüş asfalt kaplama malzemelerinin sürdürülebilirlik açısından oldukça önemli olduğu ve yıpranmış asfalt kaplamaların yeniden kullanımının ekonomik olarak ciddi kazançlar sağladığı görülmüştür. Asfalt kaplamaların tekrar kullanılması enerji tasarrufu yönünden fayda sağladığı ve atık depolama maliyetini düşürdüğü görülmüştür. Geri dönüştürülmüş asfalt agregalar beton yapı malzemesinin basınç dayanım değerlerini olumsuz yönde etkilediği, betonun akışkanlığını azalttığı ve tuz ve dona karşı dayanıklı olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca yapılan çalışmaların genelinde bozulmuş, atık asfalt kaplama malzemelerinin mutlaka yeniden kullanılması gereken değerli bir atık olduğu bildirilmiştir.

7. KAYNAKLAR

- Anastasiou, E.K., Liapis, A., Papayianni, I. (2015). Comparative life cycle assessment of concrete road pavements using industrial by-products as alternative materials, *Resources, Conservation & Recycling*, 101 (2015), 1-8
- Abergel, B., Dean, J., Dulac Towards (2017). Zero-Emission, Efficient, and Resilient Buildings and Construction Sector: Global Status Report 2017 United Nations Environment and International Energy Agency, Paris, France (2017), p. 43
- Jahangiri, B., Majidifard, H., Meister, J., Buttlar, W.G. (2019). Performance Evaluation of Asphalt Mixtures with Reclaimed Asphalt Pavement and Recycled Asphalt Shingles in Missouri. *Transportation Research Record*. 2673(2) 392–403.
- Xiao, F., Li, R., Zhang, H., Amirkhanian, S. (2017). Low Temperature Performance Characteristics of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) Mortars with Virgin and Aged Soft Binders. *Applied Sciences*, 7(3), 304.
- Shirzad, S., Aguirre, M.A., Bonilla, L., Elseifi, M.A., Cooper, S., Mohammad, L.N. (2018). Mechanistic-Empirical Pavement Performance of Asphalt Mixtures with Recycled Asphalt Shingles. *Construction and Building Materials*, 160, 2018, 687–697.
- Güngör, A.G., Orhan, F., Kaşak, S. ve Doşt, Y., (2008). Kazılmış Asfalt Kaplamaların Yeniden Kullanımı, Karayolu 1. Ulusal Kongresi, Ankara.
- Al-Oraimi, S., Hassan, S.F., Hago, A. (2009). Recycling of Reclaimed Asphalt Pavement in Portland Cement Concrete. *The Journal of Engineering Research*, 6(1), 37-45.
- Wang, Y., Leng, Z., Li, X., Hu, C. (2018). Cold recycling of reclaimed asphalt pavement towards improved engineering performance, *Journal of Cleaner Production*, 171 (2018), 1031-1038.
- Moon, K. H., Falchetto, A.C, Marasteanu, M. O., Turos, M.(2014). Using recycled asphalt materials as an alternative material source in asphalt pavements. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 18(1), 149- 159.
- Ünlü, F. (2019). İstanbul'da Kazınmış Asfalt Kaplamaların Binder Tabakasında Yeniden Kullanılabilirliğinin Araştırılması. (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Dikicioğlu, A. E., Belediyelerde Yol Üstyapısı Sorunlarına Genel Bakış ve Antalya Örneği, Erişim: 19 Aralık 2021. <http://www.imo.org.tr/resimler/ekutuphane/pdf/11160.pdf>
- Mazlum, M.S., (2014). Ekonomik Ömrünü Tamamlamış Asfalt Kaplamaların Kazınarak Bitümlü Sıcak Karışımlarda Yeniden Kullanılabilirliğinin Araştırılması, (Yüksek Lisans Tezi), Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Alı Ali, F.S. (2016). Geri Kazanılmış Asfalt Betonu Malzemesinin Aşınma Tabakasında Kullanılabilirliğinin Araştırılması, (Yüksek Lisans Tezi), Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Gürer, C., Akbulut, H., Kürklü, G. (2004). İnşaat Endüstrisinde Geri Dönüşüm ve Bir Hammadde Kaynağı Olarak Farlı Yapı Malzemelerin Yeniden Değerlendirilmesi, Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, İzmir.
- Sönmez, İ., (2009). İnşaat atıklarının asfaltta geri dönüşüm malzemesi olarak kullanılması, [PowerPoint slides]. Erişim: <https://www.khlgroup.com/events/demolition-conference-turkey/assets/ibrahimsonmez.pdf>.
- West, R. C., Willis, J. R. (2014). Case studies on successful utilization of reclaimed asphalt pavement and recycled asphalt shingles in asphalt pavements. No. NCAT Report 14-06.
- Falchetto, A.C., Moon, K.H., Wang, D., Riccardi, C., Kang, M.S., Wiştuba, M.P. (2017). Investigation on the combined recycling of reclaimed asphalt pavement and steel slag in asphalt mixture at low temperature. In Proceedings of the 5th International Conference on Sustainable Solid Waste Management, Athens, Greece,
- Anonim 1, (2012). *Yol Teknolojileri Dergisi*, Ocak-Şubat, 2012.
- Miliutenko, S., Björklund, A., Carlsson, A. (2013). Opportunities for environmentally improved asphalt recycling: the example of Sweden, *Journal of Cleaner Production*, 43 (2013), 156-165
- Kuyucu, H. (2019). Bitümlü Sıcak Asfalt Karışımlarda Geri Dönüşüm Ve Türkiye'deki Uygulamaları, Yüksek Lisans Tezi, Kto Karatay Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

- Kaya, B. (2011). Bitümlü Karışımların Geri Dönüşümü, Çevresel Etkileri Ve Maliyet Analizi, (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Wojciech Bankowski, (2018). Evaluation of Fatigue Life of Asphalt Concrete Mixtures with Reclaimed Asphalt Pavement. *Applied Sciences*, 2018, 8, 469.
- Elkashef, M., Williams, R.C., Cochran, E. (2017). Investigation of fatigue and thermal cracking behavior of rejuvenated reclaimed asphalt pavement binders and mixtures. *International Journal of Fatigue* , 11, 90–95.
- Buczynski, P. (2016). The Frost Resistance of Recycled Cold Mixes with Foamed Bitumen and Different Types of Road Binders. *Procedia Engineering*, 161, 54–59.
- Kenai, S., Debieb, F., Azzouz, L. (2002). Mechanical Properties and Durability of Concrete made with Coarse and Fine Recycled Aggregates, *Proceedings of the International Conference: Sustainable Concrete Construction*, Dundee, UK.
- Elaty, A., Abd Allah, M., & Ghazy, M. F. (2020). Feasibility of Using Recycled Asphalt Pavement Aggregates in Concrete Pavement, *Engineering Research Journal*, 43(4), 337-343.
- Rezaei, M. R., Kordani, A.A., Zarei, M. (2020). Experimental investigation of the effect of Micro Silica on roller compacted concrete pavement made of recycled asphalt pavement materials. *International Journal of Pavement Engineering*, 1-15.
- Li-Ping, G., Miao, W., Cong, D., Li-Juan, C. (2020). Effect of incorporating reclaimed asphalt pavement on macroscopic and microstructural properties of high ductility cementitious composites. *Construction and Building Materials*, 260, 119956.
- Abraham, S. M., Ransinchung, G. D. (2019). Effects of reclaimed asphalt pavement aggregates and mineral admixtures on pore structure, mechanical and durability properties of cement mortar. *Construction and Building Materials*, 216, 202-213.
- Ghazy, M.F., Elaty, M.A.A.A., Abo-Elenain, M.T. (2022). Characteristics and optimization of cement concrete mixes with recycled asphalt pavement aggregates. *Innovative Infrastructure Solutions* (2022) 7:53.
- Yung-Vargas, Y.V., Rondón-Quintana, H.A, Córdoba-Maquilón, J.E. (2022). Evaluation of recycled asphalt pavement in Colombia, *Journal of Physics: Conference Series* 2153 (2022) 012007.
- Patel, N., Amin, S., Iqbal, R. (2022). Use of Reclaimed Asphalt Pavement and Recycled Waste Glass as Partial Aggregate Replacements in Concrete Pavements, *Role of Circular Economy in Resource Sustainability*, 97-109.
- Yao, L., Leng, Z., Lan, J., Chen, R., Jiang, J. (2022). Environmental and economic assessment of collective recycling waste plastic and reclaimed asphalt pavement into pavement construction: A case study in Hong Kong. *Journal of Cleaner Production*, 336 (2022) 130405.
- Gnanamurthy, P.B., Kumar, B.V.K. (2022). Performance Evaluation of Bituminous Pavement with High Recycled Asphalt Pavement Material content—A Case Study, *Sustainability Trends and Challenges in Civil Engineering*, 181-200.
- Abedalqader, A., Shatarat, N., Ashteyat, A., Katkhuda, H. (2021). Influence of temperature on mechanical properties of recycled asphalt pavement aggregate and recycled coarse aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 269(2021), 121285.
- Zhang, J., Guo, C., Chen, T., Zhang, W., Yao, K., Fan, C., Liang, M., Guo, C., Yao, Z. (2021). Evaluation on the mechanical performance of recycled asphalt mixtures incorporated with high percentage of RAP and self-developed rejuvenators. *Construction and Building Materials*, 269 (2021) 121337.
- Bittencourta, S.V., Magalhães, M.S., Tavares, M.E.N. (2021). Mechanical behavior and water infiltration of pervious concrete incorporating recycled asphalt pavement aggregate. *Case Studies in Construction Materials*, 14 (2021), e00473.
- Ashteyat, A. Obaidat, A., Kirgiz, M., AlTawallbeh, B. (2021). Production of Roller Compacted Concrete Made of Recycled Asphalt Pavement Aggregate and Recycled Concrete Aggregate and Silica Fume. *International Journal of Pavement Research and Technology*, <https://doi.org/10.1007/s42947-021-00068-4>.
- Hou, X., Hettiarachchi, C., Xiao, F., Zhao, Z., Xiang, Q., Yong, D. (2021). Blending efficiency improvement and energy investigation of recycled asphalt mixture involved warm mix technology. *Journal of Cleaner Production*, 279 (2021), 123732.