



ASFALT BETON KAPLAMALARINDA TUNÇBİLEK UÇUCU KÜLÜNÜN FİLLER OLARAK KULLANILMASININ ARAŞTIRILMASI

Mohd Ismail TIMORI*, Mesut TİĞDEMİR

Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

Anahtar Kelimeler	Öz
<i>Uçucu Kül, Mineral Filler, Superpave Tasarım Yöntemi, İndirekt Çekme Dayanımı, Tunçbilek Termik Santrali.</i>	<p>Bu çalışmada, atık olarak görülen Kütahya'nın Tavşanlı ilçesinde bulunan Tunçbilek Termik Santralinden çıkan uçucu külün (UK) asfalt betonunda filler malzemesi olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Öncelikle çalışma için Superpave Tasarım Yöntemi'ne göre gradasyon sınırları içerisinde, agrega oranlarını değiştirerek üç tip agrega gradasyon eğrisi elde edilmiştir. Her gradasyonun optimum bitüm oranını belirlemek için UK filler içerisinde %25, %50, %75, %100 oranlarında kullanılmıştır. Daha sonra belirlenen bitüm yüzdesi kullanılarak Superpave Karışım Tasarım Yöntemine göre numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler AASHTO T283 standardına uygun olacak şekilde tasarlanmıştır. Tasarlanan numunelerin nem hassasiyetinin belirlenmesi için İndirekt Çekme Dayanım (ITS) Deneyi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde UK kullanım ile herhangi bir katkı maddesi kullanılmayan sıcak karışım asfaltlara göre daha yüksek İndirekt Çekme Dayanım Oranı (TSR) elde edilmiştir. Yapılan bu çalışma sonuçlarına göre UK ile hazırlanan Bitümlü sıcak karışımların (BSK) neme karşı direncinin arttığı gözlenmiştir. Dolayısıyla UK ile hazırlanan BSK'ların şiddetli ve uzun süreli yağış alan bölgelerde kullanılmasının daha verimli sonuçlar verebileceği tespit edilmiştir. Ayrıca UK'nın yol üst yapısının, aşınma tabakasında kullanılması, çevresel kirlilikleri önlemekle birlikte ekonomik açıdan da büyük katkılar sağlayacaktır.</p>

INVESTIGATION OF THE USAGE OF TUNÇBİLEK FLY ASH AS FILLERS IN ASPHALT CONCRETE PAVEMENTS

Keywords	Abstract
<i>Fly Ash, Tuncbilek Power Station, Mineral Filler, Indirect Tensile Strength, Superpave Design Method.</i>	<p>In this study, the usability of fly ash (UK) from Tunçbilek Thermal Power Plant in the Tavşanlı district of Kütahya, which is seen as waste, as filler material in asphalt concrete was investigated. First of all, three types of aggregate gradation curves were obtained by changing the aggregate ratios within the gradation limits according to the Superpave Design Method for the study. In order to determine the optimum bitumen ratio of each gradation, 25%, 50%, 75% and 100% were used in UK fillers. Then, the samples were prepared according to the Superpave Mixture Design Method using the determined bitumen percentage. The prepared samples are designed to comply with the AASHTO T283 standard. Indirect Tensile Strength (ITS) test was carried out to check the moisture sensitivity of the designed samples. When the obtained results were examined, a higher Indirect Tensile Strength Ratio (TSR) was obtained with the use of UK compared to the hot mix asphalts without any additives. According to the results of the study, it was observed that the Bituminous hot mixture (BSK) prepared with UK increased the resistance against moisture. Therefore, it has been determined that BSKs prepared with UK can be used in heavy and long-term rainfall areas, giving more efficient results. In addition, the use of UK's road pavement in the wear layer can provide great contributions in terms of economy as well as preventing environmental pollution.</p>

Alıntı / Cite

Timori, M. I., Tığdemir, M. (2022), Asfalt Beton Kaplamalarında Tunçbilek Uçucu Külünün Filler Olarak Kullanılmasının Araştırılması, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(1), 126-141.

* İlgili yazar / Corresponding author: ismailtimori0@gmail.com

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process
M. I. Timori, 0000-0002-1683-7361	Başvuru Tarihi / Submission Date 02.08.2021
M. Tiğdemir, 0000-0002-5303-2722	Revizyon Tarihi / Revision Date 29.09.2021
	Kabul Tarihi / Accepted Date 04.10.2021
	Yayın Tarihi / Published Date 23.03.2022

1. Giriş (Introduction)

Atıklar genel olarak dünyada çevre ve sağlık açısından aşırı sorunlar ve zararlar ortaya çıkarmaktadırlar. Atıkların en önemli sorunlarından çevrenin normal dengesini bozmak ve çevre kirliliğine neden olmasıdır. Bu çevre kirliliğine neden olan atık ürünlerin miktarı zaman geçtikçe hızlı bir şekilde artış göstermektedir. Dünya nüfusunun artışı ise atıklarının miktarına etki eden en önemli ve belirleyici faktörlerden biri olarak görülmektedir. Atık sorunlarının en büyük kısmı ise ülkemizin özellikle sanayi bölgelerinde meydana gelmektedir. Atık ürünlerin eski seneler olduğu gibi insanların yaşadığı yerlerden uzak bölgelerde toplamaya gerek olmadığı görülmekte, çünkü günümüzde teknolojinin gelişmesiyle beraber atık ürünlerin belirli gruplarda ayıklanarak bertaraf edilmektedir ve aynı zamanda bu atıkların geri dönüşümü mümkün olduğu görülmektedir. Endüstriyel atık ürünlerin değerlendirmek amacıyla son zamanlarda teknolojinin gelişmesiyle beraber ülkemizde birçok araştırmalar ve çalışmalar yapılmıştır. Yapılmış olan bu çalışmalarda, araştırmacıların genel olarak temel amaçları atık ürünlerin hangisini hangi amaç için kullanılabilirliğini belirlemektir (Öntürk ve Vural, 2014). Son yıllarda, gelişmiş ülkelerde de inşaat ve yıkım atıklarının kullanımı konusunda birçok çalışma yapılmıştır. En önemli ilgi, atık malzemelerin yeni inşaat sektörlerinde yeniden kullanılmasıdır. Bilim adamlarının ve araştırmacıların yanı sıra yetkili kişilerin amacı, çevresel ve ekonomik avantajlar için atık malzemelerin geri dönüşümünü ve ayrıca yol yapımında endüstriyel atıkların yeniden kullanım olasılığını araştırmaktır (Xue vd., 2009). Atık malzemelerin yeniden kullanılması, endüstriyel ve kentsel alanlarda aşırı katı atık madde sorununu çözmenin birçok yolundan biridir. Doğal kaynakların aşırı kullanımının azaltılması ve tükenmeden önlem alınması, kentsel ve endüstriyel alanlarda üretilen atık maddelerden çevre kirliliğinin azaltılması, enerji ve para tasarrufuna katkı sağlanması gibi çevreye ve ekonomiye önemli katkılar sağlayabilir. Bu nedenle çevreye olan olumsuz etkilerini azaltmak için bu atık malzemelerin mühendislik ve endüstriyel uygulamalarda ve ayrıca yol üstü yapısında tekrar kullanılması mantıklıdır (Pourtahmasb ve Karim, 2014). Bu çalışmanın amacı ekonomik bir malzeme kaynağı kullanmak ve aynı zamanda çevre problemi olarak görülen Tunçbilek Termik Santrali'nden elde edilen UK'nın asfalt beton kaplamalarında filler malzemesi olarak kullanılabilirliğinin araştırılmasıdır.

2. Kaynak Özetleri (Resources Summaries)

Ali vd. (1996), UK ilave edilen asfalt karışımların mekanik özelliklerini ve asfalt beton kaplamanın performansını iyileştirmede etkisini incelemiştir. Bu çalışmada, %5 bitümlü bağlayıcı ve dört farklı kül içeren, BSK numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerin Marshall Stabilite Yöntemiyle elastisite modülü, kalıcı deformasyon, sünme ve yorulma gibi mekanik özellikleri üç farklı sıcaklıkta elde edilmiştir. Deney sonuçlarına göre BSK'larda filler olarak %2 uçucu külün kullanımının, kaplamaların esneklik modülünü yüksek ve düşük sıcaklıklarda iyileştirildiği sonucuna varılmıştır.

Güngör (1996), Afşin Elbistan UK'nın BSK'larda kullanılan kırmataş tozu ve Portland Çimentosu yerine filler olarak kullanılmasının etkisini araştırmıştır. Bu çalışmada aynı granülometri eğrisine sahip UK, Portland Çimentosu ve taş tozu fillerli numunelerde %4.0, 4.5, 5.0, 5.5, 6.0 ve 6.5 oranlarda bitümlü bağlayıcı kullanılarak BSK numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerin optimum bitüm yüzdesi Marshall Stabilite Deneyi ve Akma Deneyi yapılarak elde edilmiştir. Elde edilen optimum bitüm yüzdesini kullanılarak Marshall numuneleri hazırlanmış ve plastik deformasyon deneyine tabi tutularak birim deformasyonları elde edilmiş ve sonuçları değerlendirilmiştir. Deneyi sonuçlarına göre Afşin Elbistan UK'nın BSK'larda taş tozu ve Portland Çimentosu yerine filler olarak kullanılabilirliği sonucuna varılmıştır.

Terzi, (2000), mermer toz atıklarının BSK'larda kullanılan kırmataş tozu yerine filler olarak kullanılmasının etkisini araştırmıştır. Bu çalışmada aynı granülometri eğrisine sahip mermer tozu ve taş tozu fillerli numunelerde %3.5, 4.0, 4.5, 5.0, 5.5 ve 6.0 oranlarda asfalt bağlayıcı kullanılarak BSK numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerin optimum bitüm yüzdesi Marshall Stabilite Deneyi ve Akma Deneyi yapılarak elde edilmiştir. Elde edilen optimum bitüm yüzdesini kullanılarak marshall numuneleri hazırlanmış ve plastik deformasyon deneye tabi tutularak birim deformasyonları elde edilmiş ve sonuçları değerlendirilmiştir. Deney sonuçlarına göre mermer tozu atıklarının BSK'larda taş tozu yerine, özellikle mermer tozu bulunduğu bölgelerde, filler olarak kullanılabilirliği sonucuna varılmıştır.

Yılmaz (2002), Elektrik-ark fırını cüruf ve baca tozlarının esnek yol kaplamalarında kırmataş tozu yerine doğal filler malzemeler yerine kullanılmasının etkisini araştırmıştır. Bu çalışmada %3.5, 4.0, 4.5, 5.0, 5.5, 6.0 ve 6.5

oranlarda bitümlü bağlayıcı ve %7.0 endüstriyel atık filler kullanılarak BSK numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerin optimum bitüm yüzdesi Marshall Stabilite Deneyi ve Akma Deneyi yapılarak elde edilmiştir. Elde edilen optimum bitüm yüzdesini kullanılarak %0, 2.5, 5.0, 7.0, ve %10 oranlarda kırmataş tozu, ferrokrom cürufu ve baca tozu fillerini içeren BSK numuneler hazırlanmış ve üzerine akma ve stabilite deneyleri uygulanarak elden edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Deney sonuçlarına göre cüruf ve baca tozlarının yol üst yapısında filler olarak kullanılmasının uygun olmadığı ancak, çok az oranlarda geçirimsizliği ve yoğunluğu artırmak için katkı malzemesi olarak kullanılabilceği bir sakıncası olmadığını sonucuna varılmıştır.

Deniz vd. (2005), eski ve kullanılmış otomobil lastiklerinin BSK'larda kullanılan kırmataş tozu yerine filler malzemesi olarak kullanılmasının etkisini araştırmışlardır. Bu çalışmada atık lastik parçalarının, % 1, 2, % 5 ve 7 oranlarında filler malzemesi olarak kullanılarak BSK numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerin optimum bitüm içeriği, Marshall Deneyi yapılarak bulunmuştur. Lastik atığı içeren sıcak karışımlarla hazırlanan numuneler üzerine Marshall Stabilite, statik sünme ve dolaylı çekme deneyleri yapılarak elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Deneysel çalışmaların sonuçları incelendiğinde otomobil lastik atıklarının belirli miktarda BSK'larda filler malzemesi olarak kullanılmasının, özellikle soğuk iklimi olan bölgelerde kalıcı deformasyonlara karşı yüksek performans göstereceği sonucuna varılmıştır.

Ceylan (2006), Carboniferous-Triassic kayaç tozunu BSK'larda filler malzemesi olarak kullanılmasının etkisini araştırmıştır. Sonuçları karşılaştırmak amacıyla şahit numune olarak ise kırma taş tozu filler olarak kullanılmıştır. Bu çalışmada %3.5, 4.0, 4.5, ve 5.0 oranlarında bitümlü bağlayıcı ve %4.0, 6.0, 8.0 endüstriyel atık filler kullanılarak BSK numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerin optimum bitüm yüzdesi Marshall Stabilite deneyleri ile belirlenmiştir. BSK'larda optimum bitüm oranını kullanılarak hazırlanan numunelerin üzerine Marshall Stabilite-Akma ve dolaylı çekme deneyleri uygulanarak, bu malzemelerin BSK'larda filler malzemesi olarak kullanılabilirliği değerlendirilmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde, Carboniferous-Triassic kayaç tozu BSK'larda kırmataş tozu yerinde filler malzemesi olarak kullanılabilirliği tespit edilmiştir. Hatta biraz daha yüksek değerler elde edildiği söylenebilir. Sonuç olarak Carboniferous-Triassic kayaç tozunun filler malzemesi olarak BSK'larda belirli oranlarda kullanılabilir olduğu sonucuna varılmıştır.

Eren (2008), asfaltitin BSK'larda kullanılan kırmataş tozu yerine filler malzemesi olarak kullanılabilirliğini araştırmıştır. Bu çalışmada taş tozu ve endüstriyel attığı olan asfaltit filler olarak kullanılarak BSK numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerin optimum bitüm miktarı, Marshall Deneyi yapılarak bulunmuştur. Asfaltit ve kırmataş tozu içeren sıcak karışımlarla hazırlanan numuneler üzerine Marshall Stabilite, su hasar Deneyi ve dolaylı çekme deneyleri yapılarak elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Deney sonuçlarına bakıldığında, BSK'larda kırmataş tozu yerine kullanılan asfaltitin, asfalt betonu kaplamalarda, aşınma tabakasında mineral filler olarak belli bir miktarda kullanılmasının daha iyi sonuçlar verebileceği sonucuna varılmıştır.

Ahmedzade vd. (2008), siyah karbonun BSK'larda kullanılan kırmataş tozu yerine filler malzemesi olarak kullanılmasının etkisini araştırmışlardır. Bu çalışmada kırmataş tozu ve siyah karbonun filler malzemesi olarak kullanılarak BSK numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerin optimum bitüm miktarını Marshall Deneyi yapılarak elde edilmiştir. Aynı agrega gradasyonuna sahip siyah karbon ve kırmataş tozu fillerini içeren sıcak karışımlara hazırlanan numuneler üzerine Marshall Stabilitesi, indirekt çekme rijitlik modülü, sünme sertliği ve indirekt çekme direnci testleri yapılarak elde edilen sonuçları değerlendirilmiştir. Deney Sonuçlarını incelendiğinde, siyah karbonun BSK'larda kırmataş tozu yerinde filler malzemesi olarak kullanılabilirliği tespit edilmiştir.

Üstünkol ve Turabi (2009), mermer tozu, fosfoalçı cam tozu ve UK gibi endüstriyel atıkların asfalt sıcak karışımlarda filler malzemesi yerine kullanılmasının etkisini araştırmışlardır. Bu çalışmada %3.5, 4.0, 4.5, 5.0, 5.5, 6.0 ve 6.5 oranlarda bitümlü bağlayıcı ve %7.0 endüstriyel atık filler kullanılarak BSK numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerin optimum bitüm miktarını Marshall Stabilite Deneyi standartlarına uygun bir şekilde %4.9 olarak elde edilmiştir. Elde edilen bitüm içeriğini ve filler oranlarını değiştirerek Marshall Stabilite Deneyi uygulanmış ve elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Deney sonuçlarına bakıldığında, BSK'larda kırmataş tozu yerine kullanılan endüstriyel atık filler malzemelerin farklı kür şartlarında ve yüksek sıcaklıklarda asfalt betonu kaplamalarda, aşınma tabakasında kullanılabilceği sonucuna varılmıştır.

Elmacı (2011), Çimstone Fabrikası'ndan elde edilen kuvars esaslı granit arıtma çamurunun BSK'larda filler malzemesi olarak kullanılmasının etkisini araştırmıştır. %4.0, 4.5, 5.0, 5.5, 6.0 ve 6.5 oranlarda bitümlü bağlayıcı ve %0, 2, 4, 6 ve 8 oranlarda ise filler malzemesi kullanılarak numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerin optimum bitüm oranı belirlendikten sonra numuneler üzerine Marshall Stabilite, akma ve dolaylı çekme deneyleri uygulanarak bu malzemelerin BSK'larda filler malzemesi olarak kullanılabilirliği değerlendirilmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde granit arıtma çamurunun yol kaplamalarında aşınma tabakasında, kırmataş tozu yerine filler malzemesi olarak kullanılabilceği tespit edilmiştir.

Öksüz (2011), hurda cam, volkanik cüruf ve cam şişe atıkları BSK'larda geleneksel olarak kullanılan kırmataş tozu yerinde filler malzemesi olarak kullanılmasının etkisini araştırmıştır. Bu çalışmada granülometri eğrisini sabit tutularak %7 filler oranı ve %4, 4.5, 5.0, 5.5, 6.0 ve 6.5 bitüm oranlarını kullanılarak BSK numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerin optimum bitüm yüzdesi Marshall Stabilite deneyleri ile elde edilmiştir. Elde edilen optimum bitüm yüzdesini kullanılarak volkanik cüruf, hurda cam ve cam şişe atıklarının %5.0, 6.0, 7.0, 8.0 ve 9.0 oranıyla üretilen BSK numuneler Marshall stabilite deneylere tabii tutularak bulunan sonuçlar şahit numuneler (kırmataş tozu) ile karşılaştırılmıştır. Deney sonuçlarını incelendiğinde BSK'larda kullanılan kırmataş tozu yerine filler malzemesi olarak volkanik cüruf, cam şişe ve hurda cam tozunun kullanılabilceği sonucuna varılmıştır.

Selman (2015), Bor Atıklarının BSK'larda mineral filler malzemesi olarak kullanılmasının etkisini araştırmıştır. Bu çalışmada bor atığı ağırlıkça % 4, % 5, % 6, % 7 ve % 8 oranlarında ve sonuçları kıyaslamak için ağırlıkça %6.0 kireç taşı filler olarak kullanılarak, BSK numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler üzerine Marshall Stabilite ve Akma Deneyleri, Dolaylı Çekme-Rijitlik Modülü Deneyi Mekanik Marshall Batırma Deneyleri uygulanarak bor atığı fillerin BSK'larda kullanılabilirliği değerlendirilmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde bor atıklarının yol kaplamalarında aşınma tabakasında kireç taşı tozu yerine filler malzemesi olarak %5,7 oranında kullanılabilceğinin sonucuna varılmıştır.

Mistry ve Roy (2016), UK'nın Asfalt sıcak karışımlarında ortak dolgu maddesi yerine kullanılmasının etkisini araştırmışlardır. Bu çalışmada kontrol amacıyla %2 hidrasyonlu kireç (HL) ve alternatif olarak %2 ile %8 arasında değişen UK yüzdesi ve %3.5, 4.0, 4.5, 5.0, 5.5, 6.0 ve 6.5 oranlarda bitüm içeriği kullanılarak numuneler hazırlanmıştır. Marshall Karışım Tasarımı ile tüm karışımlar için Optimum bitüm miktarı belirlenmiştir. Deney sonuçlarına bakıldığında %4 UK ya sahip karışım için, daha düşük optimum bitüm miktar ile daha yüksek stabilite değeri gösterilmiştir. Bu nedenle bu çalışma, standart şartnameyi karşılayarak asfalt beton karışımlarında HL yerine alternatif dolgu maddesi olarak UK % 4 oranında kullanılabilir sonucuna varılmıştır.

(Bohara ve Tamrakar, 2018), UK'nın asfalt betonunda olası kullanımının yanı sıra farklı UK içeriğinin Marshall özellikleri ve optimum bitüm miktarının üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Bu çalışmada değişken bitüm içerikli dört UK içeriği %3, %5, %7, %9 kullanılarak ve %5 çimento içerikli karışımı ve %6 bağlayıcı içerikli agregaya göre dolgu maddesi olarak %5 taş tozu içeren karışımı ile karşılaştırılmıştır. Karışım tasarımında dolgu içeriğinin dikkate alınması çok önemlidir çünkü farklı dolgu içeriklerinde asfalt beton karışımları farklı davranır. Deney sonuçlarını değerlendirildiğinde %3 UK içeren karışım haracında, akış değeri, Marshall Stabilitesi ve Marshall oranı açısından tüm UK içeren karışımlar kontrol karışımlarından (çimento ve taş tozu) daha iyi performans gösterdiği tespit edilmiştir. %6.3 optimum bitüm miktarı ile %7 UK içeriğinde, asfalt beton karışımı daha iyi davranır ve dolgu olarak çimento ile karıştırmaya kıyasla ekonomik olarak da uygundur. Bu nedenle çalışma, ekonomik olarak uygun karışımı yani %7 UK içeriğini önermektedir.

(Hossain vd. (2018), Genel olarak taş tozunun kullanıldığı bitümlü kaplama karışımlarında mineral dolgu olarak UK'nın çeşitli koşullar altında kullanma olasılığını incelenmişlerdir. Bu çalışmada Marshall Karışım Tasarım Yöntemi ile numunelerin optimum bitüm miktarları belirlenmiştir. Asfalt karışımlarında UK'nın mineral dolgu yerine %25, 50, 75 ve 100 oranlarda ikame olarak kullanılarak, asfalt karışımları hazırlanmıştır. Belirlenen optimum bitüm miktarı ve UK içeriği sabitlenerek, sıkıştırılmış karışımların 5, 10, 15 ve 20 gün süreyle suya batırılmış ve etkisini gözlenmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde toplam dolgu ağırlığına göre %25 UK ve %75 taş tozunun orta trafik koşulu için karışım tasarım kriterlerini karşıladığı bulunmuştur. Bu nedenle optimum olarak toplam dolgu ağırlığına göre %25 UK kullanılabilir. Ayrıca bu karışım orta trafik koşullarında taşkın düzlükleri için uygun olduğu görülmüştür.

Mirkoviç vd. (2019), UK'nın asfaltta kullanıma olasılığı hakkında daha genel bir sonuç elde etmek için, önemli ölçüde farklı kimyasal bileşime sahip üç tip UK'nın asfalt karışımlarının özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Bu çalışmada asfalt karışımlarında UK'nın mineral dolgu yerine %25, 50, 75 ve 100 oranlarda ikame olarak kullanılarak, asfalt numuneleri hazırlanmıştır. Sonuçları değerlendirmek için kullanılan kontrol numuneleri ise, %100 mineral dolgu kullanılarak hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerin Marshall Stabilite Yöntemiyle hacimsel bileşimini, stabilitesini, akmasını, su hassasiyetini ve kalıcı deformasyona karşı direnci elde edilmiştir. Yapılan bu çalışmanın sonucunda, UK'nın asfalt karışımlarda daha geniş bir şekilde uygulanması sonucuna varılmıştır.

3. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

3.1. Materyal (Material)

Bu çalışmada materyal olarak, mineral agregalar, mineral filler ve bitüm kullanılmıştır.

3.1.1. Mineral agregalar (Mineral Aggregate)

Bu çalışmada, Isparta Belediyesi Asfalt Şantiyesinden elde edilen kırmataş, mineral agrega olarak kullanılmıştır. Kullanılan iri ve ince agreganın özgül ağırlıklarını belirlemek için yapılmış olan deneyler ve sonuçları Tablo 1'de gösterilmektedir.

Tablo 1. İri ve ince agrega özellikleri (Coarse and fine aggregate specifications)

Özellik	Değer	Standart
İri agrega hacim özgül ağırlığı	2.661	ASTM C 127-88
İri agrega zahiri özgül ağırlığı	2.692	ASTM C 127-88
İri agrega su emme oranı (%)	%0,682	ASTM C 127-88
İnce agrega hacim özgül ağırlığı	2.558	ASTM C 128-88
İnce agrega zahiri özgül ağırlığı	2.642	ASTM C 128-88
İnce agrega su emme oranı (%)	%2.05	ASTM C 128-88

3.1.2. Mineral Filler (Mineral Fillers)

Mineral filler doğal olarak bulunan veya üretilen ve agregalara eklenen ince daneli mineral parçacıklar olup ve asfalt karışımlarının performansında önemli bir rol oynamaktadır. Bu çalışmada kırmataş tozu ve uçucu kül mineral filler olarak kullanılmıştır.

3.1.3. Kırmataş tozu (Crushed Stone Powder)

Bu çalışmada, deney sonuçlarını karşılaştırmak için, şahit olarak kullanılan kırmataş tozu malzemesi Isparta Belediyesi Asfalt Şantiyesinden temin edilen mineral agregalarının 200 nolu elekten elenmesi sonucundan elde edilmiştir. Çalışmada kullanılan kırmataş tozunu Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Çalışmada filler olarak kullanılan kırmataş tozu (Crushed stone powder used as filler in the study)

3.1.4. Uçucu Kül (Fly Ash)

Bu çalışmada, kullanılan uçucu kül Kütahya'nın Tavşanlı İlçesi'nde bulunan Tunçbilek Termik Santrali'nden temin edilmiş olup Süleyman Demirel Üniversitesi Ulaştırma Anabilim Dalı Laboratuvarı'nda 200 nolu elekten elenerek mineral filler malzemesi içerisinde sıra ile %25, %50, %75 ve %100 oranlarında kullanılmıştır. Çalışmada filler olarak kullanılan UK Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Çalışmada filler olarak kullanılan Uçucu Kül (Fly Ash used as filler in the study)

3.1.5. Bitüm (Bitumen)

Çalışmada bağlayıcı olarak kullanılan bitüm Isparta İli Belediye Fen İşleri Müdürlüğünden temin edilmiştir. Bitümün penetrasyon derecesi 50-70' olarak bulunmuştur.

3.2. Yöntem (Method)

3.2.1. Superpave Karışım Tasarım Yöntemi (Superpave Mix Design Method)

Esnek kaplamaların performansı, asfalt betonunun kalitesinden büyük ölçüde etkilenmektedir. Dünya'daki karayolları genellikle, tipik olarak en az 20 yıl sürecek şekilde tasarlanarak inşa edilmektedir ancak beklenen süreçten daha önce asfalt kaplamalarda çatlak, tekerlek izi ve delikler görünmeye başlamakla beraber kısa kaplama ömrü ile kötü performans göstermesi anlamına gelmektedir. Ticari araçlar açısından yüksek trafik yoğunluğu, kamyonların ciddi şekilde aşırı yüklenmesi ve kaplamanın günlük ve mevsimsel sıcaklıklarındaki önemli farklılıklar, asfalt kaplamalarda bu sorunların erken gelişmesinden sorumlu olarak görülmektedir. Dünyada genel olarak asfalt beton kaplamaların tasarımında Triaxial, Marshall, Hubbard Field, Hveem ve Superpave karışım tasarım yöntemleri gibi çeşitli asfalt karışım tasarım yöntemleri uygulanmaktadır. Dünyada çok yaygın olarak kullanılan Marshall Tasarım Yöntemi asfalt kaplamalarında gelişen erken bozulmalara katkıda bulunan nedenlerden biridir. Türkiye'de çok yağın olarak kullanılan Marshall Tasarım Yönteminin temel sorunu, asfalt karışımlarının gerçek saha koşullarını simüle etmeden deneysel laboratuvar prosedürlerine dayalı olarak tasarlanmasıdır ve bu de belirli bir karışımın sahada nasıl bir performans göstereceğini doğru bir şekilde tahmin etmeyi zorlaştırmaktadır (Zumrawi ve Sheikh Edrees, 2016). Superpave Karışım Tasarım Yöntemi ise bu ihtiyacı karşılamak ve oluşan bu sorunları ortadan kaldırmak için geliştirilmiş bir tasarım yöntemidir. Uygun asfalt karışımını tasarlamak için bu yöntem, asfalt karışımının laboratuvar ve saha performansı arasında doğrudan bir ilişki kurulmasına izin veren performansla ilgili kriterlere dayanmaktadır. Bu yöntem Amerika Birleşik Devletleri'nde (ABD) faaliyet gösteren Strategic Highway Research Program (SHRP) tarafından geliştirilmiştir. SHRP, 1987 yılında ABD'deki yolların performansını ve durabilitesini artırmak ve yol kullanıcıları için daha güvenli hale getirmek için 150 milyon dolar karşılığında tam beş yıl içinde kurulmuştur. Harcanan bu 150 milyon dolarından 50 milyon dolarını laboratuvarda yapılan deneyler ve şartname çalışmaları için harcanmıştır. Geri kalan 100 milyondan bir deneme yolu yapılarak kaplama tabakasının davranışını incelenmiştir. Bu araştırma programının neticesinde Superpave Karışım Tasarım yöntemi geliştirilmiştir (SHRP, 1994). Karayollarında kullanılan Superpave Karışım Tasarımı yöntemi ile Marshall tasarım yöntemini karşılaştırdığında Superpave tasarım yönteminin çalışma alanının performansı Marshall Tasarım Yöntemi'nden daha uygun ve gerçeğe çok yakın olduğunu görülmektedir. Marshall Yöntemi'nde sıkıştırma işlemi bir darbeli tokmak ile deney numunesinin her iki tarafına belli bir sayıda vurmalı bir şekilde uygulanmakta olup, mevcut olan deney numunesinin yük altındaki plastik akması ve stabilitesi ise Marshall deney aletinin yardımıyla yapılarak belirlenmektedir. Ancak bu sıkıştırma işlemi Superpave Tasarım Yöntemi'nde ise yoğurmalı sıkıştırıcı vasıtasıyla yapılmaktadır. Asfalt sıcak karışımının belirli devir sayısı, yoğurma açısı ve basınç gibi şartlar altında yoğurma işlemine tabi tutularak numuneyi saha şartlarına en yakın bir şekilde sıkıştırmaktadır. Marshall tasarım yönteminde yapılan sıkıştırma işlemi darbeli tokmak ile yapılırken, arazide ise çelikten oluşan silindirler yardımıyla yapılan sıkıştırma işlemi tam olarak temsil edilmemektedir. Sıkıştırma işlemi darbeli tokmak vasıtasıyla yapılarak agrega danelerin kırılmasına, optimum bitüm oranı ve boşluk oranının doğru bir şekilde saptanmamasına neden olabilmektedir. Dolayısıyla bu şekilde tasarlanan asfalt kaplamalarında zamanla çatlaklar ve farklı bozulmalar ortaya çıkmaktadır. Superpave tasarım yönteminde yorulma çatlakları, düşük sıcaklık çatlakları ve sabit deformasyonlara karşı kaplama direncini bulmak için kayma deneyi ve dolaylı çekme deneyi gibi performans deneylerinden detaylı veriler elde edildikten sonra kaplama performansı değerlendirilmektedir. Böylece Superpave Tasarım Yöntemi, sıkıştırılmış karışımın performans deneyleri ile performansını değerlendirilmesi ve belli iklim ve yükleme şartları altında sıkışmayı

doğrudan temsil etmesinden dolayı Marshall tasarım yönteminden daha mükemmel üstün olarak değerlendirilmektedir (Altaş, 2002).

3.2.1.1. Gradasyon (Gradation)

Superpave Karışım Tasarım Yöntemine göre agrega gradasyonunu belirlemek için, nominal maksimum tane boyutu 12.5 mm olan agrega gradasyonu tercih edilmiştir. Superpave yoğurmalı sıkıştırıcı yardım ile hazırlanmış olan karışımlar üç farklı sıkıştırma parametreye ($N_{başlangıç}$, $N_{tasarım}$, $N_{maksimum}$) göre tasarlanmaktadır. Kara yolların trafik seviyelerine göre sıkıştırma parametreleri Tablo 2 'de gösterilmektedir.

Tablo 2. Trafik seviyesine göre sıkıştırma parametreleri (Compression parameters by traffic level)

Tasarım (ESALs) (Miyon)	Sıkıştırma Parametreleri		
	$N_{baş}$	$N_{tasarım}$	N_{maks}
< 0.3	6	50	75
0.3 - 30	7	75	115
3 - 30	8	100	160
≥ 30	9	125	205

Isparta ilindeki asfalt kaplamaların hizmet vereceği 20 yıllık trafik tasarım değeri, $3 \cdot 10^7$ ESALs' den daha büyük olduğunu tespit edilmiştir. Dolayısıyla çalışmada hazırlanmış olan asfalt sıcak karışımların $N_{tasarım}$ değeri 125 olarak alınmıştır. Çalışmada toplam üç tip agrega gradasyonu kullanılmıştır. Kullanılan bu agrega gradasyonların eğrileri Tablo 3'te gösterilen Karayolları Genel Müdürlüğü'nün Teknik Şartnamesi'nde (2013) belirtilen aşınma Tabakası sınırlarına uygun bir şekilde seçilmiştir.

Tablo 3. Aşınma tabakasında kullanılan agrega gradasyon sınır değerleri
(Aggregate gradation limits used in the wear layer)

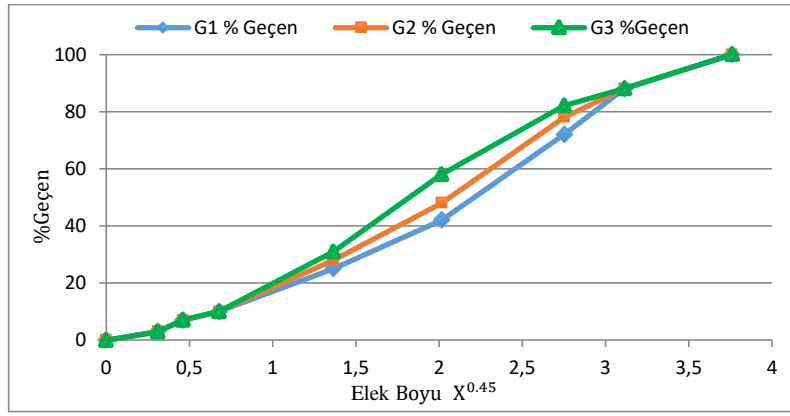
Elek Boyu mm (inç, No)	TİP -1 Geçen %	TİP -2 Geçen %	TİP -3 Çok İnce Aşınma
19 (3/4")	100	-	-
12.5 (1/2")	88 - 100	100	100
9.5 (3/8")	72 - 90	80 - 100	90 - 100
6.0 (1/4")	-	-	25 - 33
4.75 (No.4)	42 - 52	55 - 72	23 - 31
2.00 (No.10)	25 - 35	36 - 53	20 - 27
0.425 (No.40)	10 - 20	16 - 28	12 - 18
0.180 (No.80)	7 - 14	8 - 16	-
0.075 (No.200)	3 - 8	4 - 8	7 -11

Çalışmada kullanılan üç tip agrega gradasyonun yüzde geçen ve karışım miktarları Tablo 4'te verilmektedir.

Tablo 4. Çalışmada kullanılan gradasyonlar (gradations used in the study)

Elek No	1.Gradasyon		2.Gradasyon		3.Gradasyon	
	% Geçen	Karışım miktarı (gr)	% Geçen	Karışım miktarı (gr)	% Geçen	Karışım miktarı (gr)
19	100	0	100	0	100	0
12.5	88	144	88	144	88	144
9.5	72	192	78	120	82	72
4.75	42	360	48	360	58	288
2	25	204	28	240	31	324
0.425	10	180	10	216	10	252
0.18	7	36	7	36	7	36
0.075	3	48	3	48	3	48
Filler	0	36	0	36	0	36

Kullanılan agrega gradasyonlar Tablo 3'te gösterilen sınır değerleri çerçevesinde deneyler yapılarak bulunmuştur. Tablo 4'te elde edilen üç tip agrega gradasyonunun yüzde geçen değerlerini ve agrega miktarlarını kullanarak Excel program ile gradasyonların eğrileri çizilmiş ve Şekil 3'te gösterilmektedir.



Şekil 3. Agrega gradasyonları (Aggregate gradation curves)

3.2.1.2. Superpave tasarım yöntemi ile numunelerin hazırlanması (Preparation of samples with the Superpave design method)

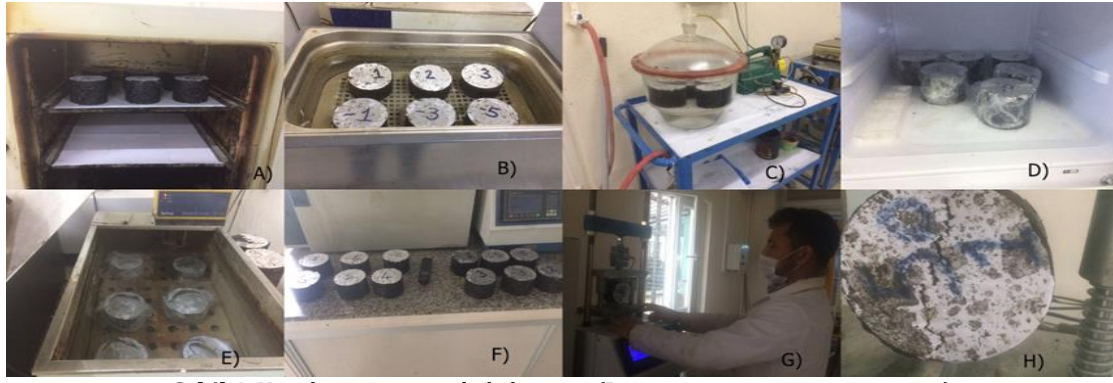
Superpave Tasarım Yönteminde deney numuneleri hazırlamak için öncelikle, belirtilen agrega gradasyonu kullanılarak 1200 gr'lık agrega karışımları hazırlanır. Hazırlanan agrega karışımları 110 °C' gelene kadar etüve bekletilir. Mineral filler yerinde, sıra ile %25, %50, %75 ve %100 olarak UK kullanılmıştır. Deneye başlamadan önce Superpave cihazı kalıbını 1.5 ile 2 saat arasında etüve konularak sıcaklığının 150-160 °C'ye gelmesi beklenir. Deneyde bağlayıcı olarak kullanılan bitüme de etüve koyarak akışkan hale gelmesi beklenir. Daha sonra belirtilen bitüm oranlara göre agrega karışıma sıcak bitüm eklenerek ısı eşliğinde karıştırılır. Karıştırma işlemi bitümün agrega ile tamamen kaplamasına kadar ve agregalarda herhangi beyaz nokta görülmeğe kadar devam edilir. Daha sonra karıştırılan sıcak karışımını Superpave kalıbının içine yerleştirilerek ve Superpave yoğurmalı sıkıştırıcı ile sıkıştırma işlemi yapılmaktadır. Numunelerin hazırlanmasındaki aşamaları Şekil 4'te gösterilmektedir.



Şekil 3. Superpave Yoğurmalı Sıkıştırıcı ile numunelerin hazırlanması (Preparation of samples with Superpave kneading compactor)

3.2.1.3. Nem hassasiyeti (Moisture Susceptibility)

Superpave Karışım Tasarımındaki son adım, tasarım karışımının nem hassasiyetini değerlendirmektir. BSK'ların nem hassasiyeti, asfalt karışımın su ile temas halindeki hasara karşı direnci olarak tanımlanır, nem asfalt karışımında nüfuz edilerek agrega ile asfalt bağlayıcı arasındaki adezyonun zayıflatabilir. Asfalt karışımlarda nem hassasiyetini değerlendirmek için AASHTO T283 standartlarından yararlanılmaktadır. Testi gerçekleştirmek üzere, hazırlanmış numuneleri 72 saat boyunca 40 °C' lik etüve bekletilir. 72 saat sonra çıkarılan numunelerin kuru ağırlığı ve üç ayrı noktadan yükseklik ve çapı ölçülür. Daha sonra numuneler üç şartlandırılmamış (kuru) ve üç şartlandırılmış (Islak) olmak üzere iki eşit gruba ayrılır. Üç adet numune 25 °C lik etüve soğumaya bırakılır. Diğer üç adet numune de şartlandırmak amacıyla 24 saat boyunca 25 °C lik su banyosunda bekletilir. 24 saat sonunda su banyosundan çıkarılan numunelerin doygunluk oranı %55 ile %80 arasına gelinceye kadar vakum işlemine tabi tutulur. Daha sonra numuneleri streç film ile sarılıp -18 °C lik kabinde 16 saat boyunca bekletilir. 16 saat sonra numuneler 60 °C lik su banyosuna yerleştirilir ve 24 saat bekletilir. 24 saat sonra 60 °C lik su banyosundan çıkarılan numuneler 2 saat boyunca 25 °C lik su banyosuna yerleştirilir. İki saat sonra su banyosundan çıkarılan şartlandırılmış numuneler ile etüveden çıkarılan kuru numunelerin üzerine İndirekt Çekme Dayanım (ITS) testi gerçekleştirilir. Tüm test aşamalarının adımları Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 4. Nem hassasiyetinin belirlenmesi (Determining moisture sensitivity)

Yukarıdaki şekilde;

- A) Numunelerin 72 saat 40 °C etüvde bekletilmesi,
- B) Şartlandırılmış numunelerin 24 saat 25 °C sıcaklıkta su banyosuna bırakılması,
- C) Numunelerin %55-80 doygunluk derecesine ulaşmak için vakum işlemi gerçekleştirilmesi,
- D) Numunenin 16 saat boyunca dondurucuya bekletilmesi,
- E) Dondurucudan çıkarılan numunelerin 60 °C su banyosunda 24 saat boyunca bekletilmesi,
- F) Kuru ve şartlandırılmış Numunelerin 25 dereceye gelmesi,
- G) Numunenin dayanımını bulmak için numuneyi İndirekt Çekme cihazına yerleştirilmesi,
- H) Ve son olarak numunenin kırılması.

ITS'nin değerini elde etmek için aşağıdaki denklem kullanılmaktadır.

$$ITS = \frac{2P_{max}}{\pi * T * D} \quad (1)$$

Yukarıdaki denklemde;

- ITS: İndirekt çekme dayanımı (KPa),
P: Kırılma anında uygulanmış maksimum yük (KN),
T: Numunenin kalınlığı (m)
D: Numunenin çapı (m).

Numuneleri neme karşı hassasiyetini belirlemek için şartlandırılmış numunelerin çekme dayanımlarının ortalamasının, şartlandırılmamış numunelerin dayanımlarının ortalamasına oranı belirlenir. Belirlenen bu oran, çekme dayanım oranı ya kısacası TSR olarak adlandırılır ve aşağıdaki denklem ile hesaplanmaktadır.

$$TSR = \frac{ITS_{Islak}}{ITS_{Kuru}} \times 100 \quad (2)$$

Burada;

- TSR: İndirekt çekme dayanım oranı (%),
 ITS_{Islak} : şartlandırılmış numunelerin indirekt çekme dayanımı (KPa),
 ITS_{Kuru} : şartlandırılmamış numunelerin indirekt çekme dayanımı (KPa).

4. Araştırma bulguları ve Tartışma (Research Findings and Discussion)

Çalışmada öncelikle Superpave Tasarım Yöntemine göre üç tip agrega gradasyonu belirlenmiştir. Belirlenen bu gradasyonları kullanarak %25, %50, %75, %100 oranlarda agrega karışımında UK ilave edilerek Superpave Tasarım Yöntemine bağlı kalınarak optimum bitüm oranı belirlenmiştir. Optimum bitüm oranlarına bağlı olarak da her oran için karışım hazırlanılarak Superpave yağurmalı sıkıştırıcı ile sıkıştırma işlemi yapılmıştır. Hazırlanan numunelerin neme karşı hassasiyetini belirlenmek için AASHTO T-283'e göre numunelerin üzerinde indirekt çekme dayanım (ITS) testi uygulanmış ve sonuçları değerlendirilmiştir. Çalışmada yapılan tüm deneyleri ve elde edilen tüm sonuçları bu bölümde verilmiştir.

4.1. Optimum Bitüm Miktarının Belirlenmesi (Determining the Optimum Binder Content)

Superpave Karışım Tasarım Yönteminde optimum bitüm miktarlarını belirlemek için farklı bitüm içeriği ile hazırlanan karışımların yağurmalı sıkıştırıcı ile sıkıştırıldıktan sonra elde edilen numunelere ait pratik özgül

ağırlık, VFA, VMA ve %4 hava boşluğun grafiklerin çizilmesi gerekmektedir. Çalışmada optimum bitüm miktarlarını belirlemek için Tablo 5'te gösterilen VMA sınır değerleri ve Tablo 6'da gösterilen VFA sınır değerleri ve ayrıca %4 hava boşluğunu kriterini dikkate alınmıştır.

Tablo 5. Nominal maksimum agrega boyutuna göre VMA değerleri (VMA values based on nominal maximum aggregate size)

Nominal Maksimum Agregaya Boyutu	Minimum VMA (%)
9.5 mm	15
12.5 mm	14
19 mm	13
25 mm	12
37.5 mm	11

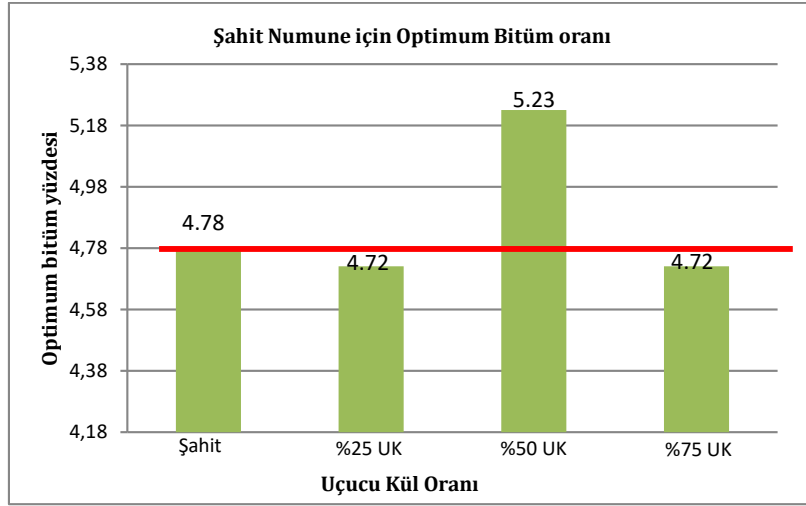
Tablo 5'te gösterdiği gibi çalışmada nominal maksimum agrega boyutu 12.5 mm olarak tercih edilmesinden dolayı minimum VMA değeri %14 olarak kullanılmıştır.

Tablo 6. Trafik seviyesine göre VFA sınır değerleri (VFA limit values according to traffic level)

Tasarım ESALs (Milyon)	Tasarım VFA (%)
< 0.3	70 - 80
0.3 - 3	65 - 78
3 - 10	65 - 75
10 - 30	65 - 75
≥ 30	65 - 75

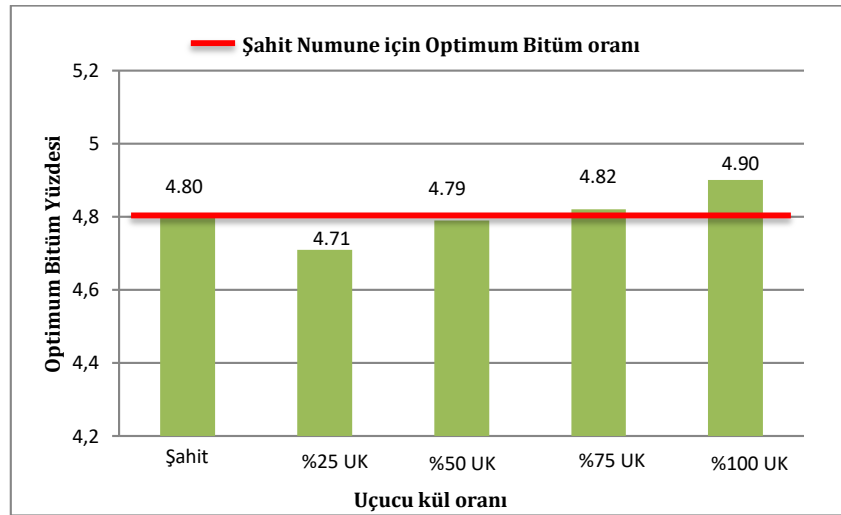
Tablo 6'da gösterdiği gibi Isparta ilindeki asfalt kaplamaların hizmet vereceği 20 yıllık trafik tasarım değeri, $3 \cdot 10^7$ ESALs' den daha büyük olduğu için VFA sınır değerleri 65 ile 75 arasında seçilmiştir.

Bitümlü karışımların optimum bitüm miktarının belirlenmesi için toplam üç agrega gradasyonu kullanılmıştır. Kullanılan bu gradasyonlarda filler malzemesi yerine sırasıyla %25, 50, 75, 100 oranında UK kullanılmıştır. Her oran için dört adet agrega karışım gradasyonu hazırlanarak %4 hava boşluğuna göre %4, 4,5, 5, 5,5, 6 ve 6.5 oranlarda bitüm ilave edilmiştir. 1200 gr'lık agrega karışım gradasyonu hazırlanarak sıcak bitüm ile karıştırılır. Bitümün agregaları tamamen kaplayabilmesi için sıcaklık sabit bir ortamda bir ısıtıcı üzerinde elle karıştırma işlemi yapılmıştır. Bu işleme başlamadan önce Superpave cihazının sıkıştırma kalıbı ve hazırlanmış olan 1200 gr'lık agrega karışım gradasyonu 110 °C ve bitüm ise 135 °C de etüvde ısıtılmıştır. Karıştırma işlemi bittikten sonra asfalt karışımını yoğurmalı sıkıştırıcı kalıbına dikkatli bir şekilde yerleştirerek Tablo 7'de gösterilen 125 tasarım yoğurma sayısına göre sıkıştırılmıştır. Sıkıştırma işleminden çıkan sonuçlara göre hava boşluğu, özgül ağırlık, VMA ve VFA değerleri bulunmuş ve grafikleri çizilmiştir. İlk önce hava boşluğu grafiğinde gösterilen %4 hava boşluğuna karşılık gelen bitüm yüzdesi belirlenmiştir. Daha sonra belirlenmiş olan bu bitüm oranı VMA grafiğinde minimum %14 değerini ve VFA grafiğinde %65-75 sınır değerlerin içerisinde olup olmadığı kontrol edilmiştir. Kontrol edilen tüm şartlar sağlandıktan sonra %4 hava boşluğuna karşılık gelen bitüm yüzdesi değeri optimum bitüm yüzdesi olarak kabul edilmiştir. Superpave Tasarım Yönteminde optimum bitüm miktarının belirlemek için her UK oranından 4'er adet olmak üzere toplam 60 adet numune hazırlanmıştır. Çalışmada kullanılan üç tip gradasyondan her biri için optimum bitüm miktarları bulunmuştur. Her gradasyon için birer şahit numune ve %25, %50, %75 ve %100 oranlarında UK kullanılmak üzere toplam 15 optimum bitüm oranının değeri elde edilmiştir. Elde edilen tüm optimum bitüm yüzdesi değerlerine ait grafikler ve açıklamaları sırasıyla Şekil 6, 7 ve 8'de verilmiştir.



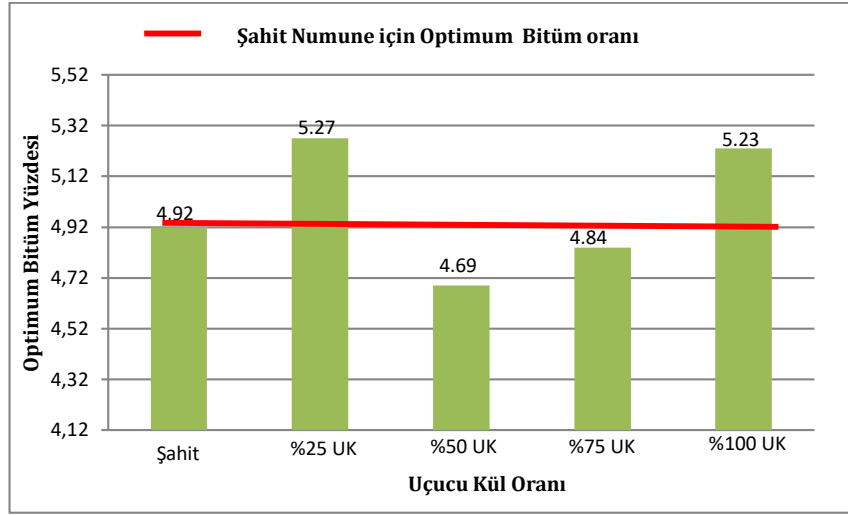
Şekil 6. UK oranına göre 1. gradasyon optimum bitüm oranları (1st gradation optimum bitumen ratios according to UK ratio)

Şekil 6' da görüldüğü gibi birinci gradasyonun şahit numunesinin optimum bitüm miktarı %4.78 olarak bulunmuştur. %25 UK ve %75 UK için optimum bitüm miktarları şahit numuneden daha düşük yani %4.72 olarak bulunmuştur. Optimum bitüm değerinin azalması maliyetin azalması demektir. %50 UK için optimum bitüm miktarı ise şahit numuneden daha fazla, %5.23 olarak, bulunmuştur. Bu da optimum bitüm miktarının arttığına göstergesidir. Optimum bitüm miktarının artması ile doğal olarak maliyet açısından da bir miktar artış meydana gelecektir. Kısacası birinci gradasyonda %25 ve %50 oranlarda UK kullanımı ile optimum bitüm miktarında bir azalma sağlanmıştır.



Şekil 7. UK oranına göre 2. gradasyon optimum bitüm oranları (2st gradation optimum bitumen ratios according to UK ratio)

Şekil 7'de görüldüğü gibi ikinci gradasyonun şahit numunesinin optimum bitüm miktarı %4.80 olarak elde edilmiştir. %25 ve %50 oranlarında UK kullanımı ile optimum bitüm miktarları şahit numunenin optimum bitüm miktarından daha az bir değer verdiği görülmektedir. Optimum bitümün azalması maliyetin azalması demektir ki bu de istenen bir durumdur. %75 ve %100 UK kullanımı ile optimum bitüm miktarının şahit numuneden daha fazla bir optimum bitüm değeri verdiği görülmektedir. Bitüm miktarının artması maliyetin artması demektir. Kısacası şekil 4.20'de görüldüğü gibi UK'nın artması ile optimum bitüm miktarında da bir miktar artış görülmektedir.



Şekil 8. UK oranına göre 3. gradasyon optimum bitüm oranları
(3st gradation optimum bitumen ratios according to UK ratio)

Şekil 8'de görüldüğü gibi üçüncü gradasyonun şahit numunesinin optimum bitüm miktarı %4.92 olarak gösterilmektedir. %50 ve %75 oranlarda UK kullanımı ile optimum bitüm miktarları şahit numunenin optimum bitüm miktarından daha az bir değer verdiği görülmektedir. Optimum bitüm miktarının azalması, maliyetin azalması demektir ki bu de istenen bir durumdur. %25 ve %100 UK kullanımı ile optimum bitüm miktarının şahit numuneden daha fazla bir optimum bitüm değeri verilmesini görülmektedir. Bitüm miktarının artması maliyetin artması demektir. Sonuç olarak üçüncü gradasyonda %50 UK kullanımı ile en düşük optimum bitümü elde ederken %25 UK kullanılarak en yüksek optimum elde edilmiştir.

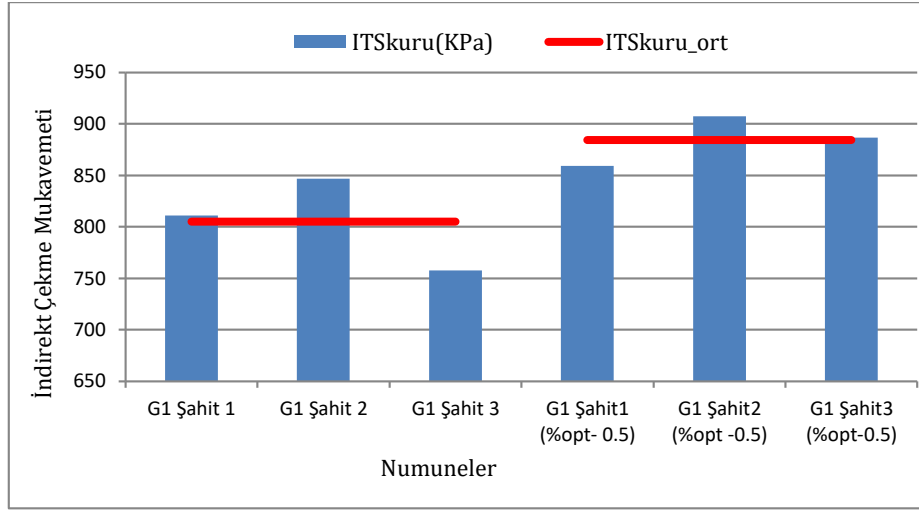
4.2. İndirekt Çekme Dayanımı (ITS) deney sonuçları (Indirect Tensile Strength (ITS) test results)

Superpave Karışım Tasarım Yönteminde son olarak optimum bitüm oranına göre hazırlanan numunelerin üzerine AASHTO T-283'e göre ITS testi gerçekleştirilmiştir. Çalışmada tüm gradasyonlar için elde edilen 14 adet optimum bitüm miktarından dayanım için sadece 8 numune kullanılmıştır. Kullanılan bu 8 adet numuneden üç numunedeki optimum yüzdesi %0.5 azaltılarak kullanılmıştır. Çünkü optimum bitüm oranının azalması durumunda maliyette bir miktar düşüş meydana gelmektedir. ITS deneyi gerçekleştirilmeden önce elde edilen optimum bitüm oranına göre hazırlanan sıcak karışımlar Superpave yağmurlu sıkıştırıcı ile sıkıştırılmıştır. UK içeren karışımlarla hazırlanan numuneler ve şahit numuneler de dahil olmak üzere, şartlandırılmış ve şartlandırılmamış numunelerin her birinden üçer adet numune olacak şekilde toplam 48 adet numune hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler 40°C'lik etüvde 72 saat süre ile bekletilmiştir. Sürenin sonunda etüvden çıkarılan numunelerin üç farklı noktasından yükseklikleri kumpas yardımı ile ölçülmüş ve kuru ağırlıkları da tartılıp kaydedilmiştir. Şartlandırılacak olan numunelerin her birinden üç adet olmak üzere toplam 24 adet numune 25°C'lik su banyosuna yerleştirilmiştir. Geriye kalan 24 adet numuneyi de şartlandıracak numuneler ile aynı zamanda test edilmek üzere 25°C'lik etüvde bekletilmiştir. 24 saatin sonunda su banyosunda bekletilen numunelerin, %55-80 doymuluk oranına ulaşması için vakum işlemine tabii tutulmuştur. Sonra numunelerin sudaki ağırlıkları ve yüzey kuru suya doymuş ağırlıkları ölçülmüş ve kaydedilmiştir. Vakum işleminden sonra her bir numunenin yüzeyi hava almayacak şekilde su geçirmez streç yardımıyla kapatılmış ve numuneler 16 saatliğine -18°C sıcaklıktaki dondurucuya yerleştirilmiştir. 16 saatin sonunda dondurucudan alınan numuneleri 60°C'deki su banyosunda 24 saat süreyle bekletilmiştir. 60°C'deki su banyosunda çıkarılan numuneleri 2 saat süre ile 25°C'lik su banyosuna yerleştirilmiştir. Bu sürenin sonunda şartlandırılmış ve şartlandırılmamış numunelerin tümünün 25°C'ye gelmeleri beklenmiştir. 25°C'ye gelen tüm numuneler ITS testine tabii tutulmuş ve şartlandırılmamış ITS_{kuru} şartlandırılmış ITS_{Islak} değerleri bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar Tablo 7'de gösterilmiştir.

Tablo 7. İndirekt çekme deney sonuçları (Indirect tensile strength test results)

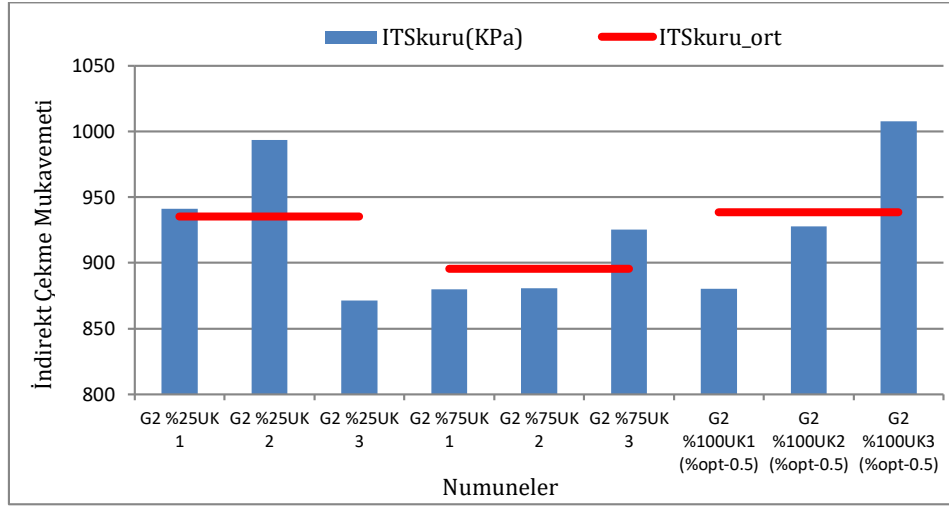
Numune Adı	İndirekt Kuru (kN)	Kuru İndirekt Çekme Muk. ITS _{kuru}	İndirekt Islak (kN)	Islak İndirekt Çekme Muk. ITS _{Islak}
G1 Şahit	9.37	846.52	8.72	791.54
G1 Şahit-0.5	9.64	884.34	9.39	860.69
G2 %25 UK	10.27	935.33	8.57	780.46
G2 %75 UK	9.64	879.65	9.29	840.48
G2 %100 UK- 0.5	10.21	927.67	12.88	1170.27
G3 %25 UK	8.18	729.43	7.97	711.84
G3 %50 UK-0.5	10.71	984.19	10.57	969.53
G3 %100 UK	9.16	821.68	8.74	791.92

Deneyleerde dayanım için hazırlanan toplam 48 numunenin yarısı şartlandırılmış şekilde, diğer yarısı ise şartlandırılmamış şekilde yani ITS_{kuru} deney sonuçları aşağıda grafikler halinde verilmiştir.



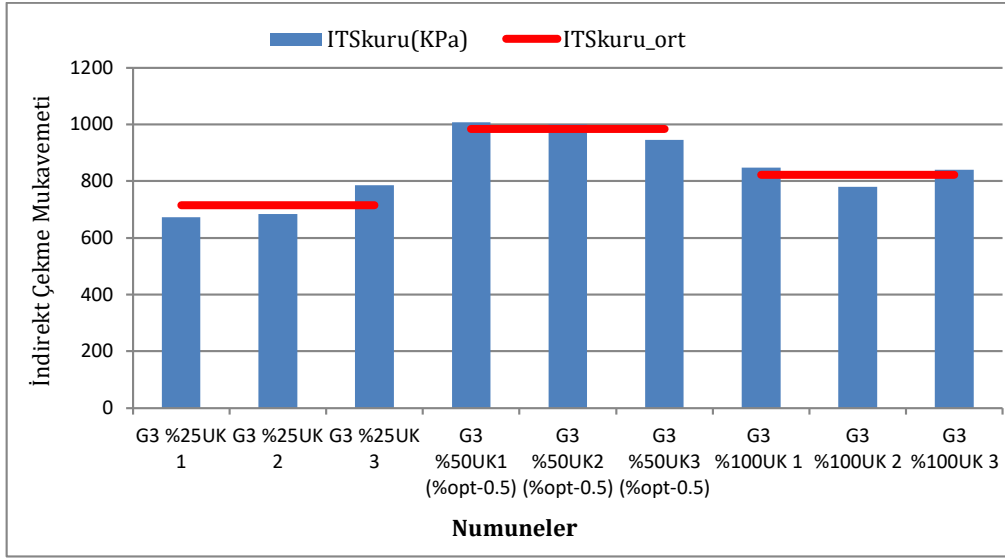
Şekil 9. Birinci gradasyon karışımlarına ait benzer numuneler için ITS_{kuru} değerleri (ITS_{dry} values for similar samples of first gradation mixes)

Şekil 9'da 1.gradasyon için yapılan ITS_{kuru} deney sonuçların grafik hali görülmektedir. Bu gradasyonda UK kullanılmamak üzere sadece filler olarak kırmataş tozu kullanılmıştır. Şekilde görüldüğü gibi ilk üç numunede optimum bitüm oranını kullanarak dayanımların ortalaması 805.05KPa olarak bulunmuş ve diğer üç numunede (G1 Şahit opt-0.5) optimum bitüm yüzdesinden %0.5 azaltılarak dayanımların ortalaması 884.34KPa olarak elde edilmiştir. Elde edilen bu dayanımlara göre bu gradasyon için optimum bitüm yüzdesinin %0.5 azaltılmış durumunda numunelerin şartlandırılmamış halindeki dayanımında bir miktar artış gözlenmektedir. Sonuç olarak bu gradasyonda bitüm miktarının azaltılması durumunda dayanımında bir miktar artış görülürken, maliyetinde de bir miktar düşüş olacağı tespit edilmiştir.



Şekil 10. İkinci gradasyon karışımlarına ait benzer numuneler için ITS_{kuru} değerleri (ITS_{dry} values for similar samples of second gradation mixtures)

Şekil 10'da 2.gradasyonun için yapılan ITS_{kuru} deney sonuçların grafik hali görülmektedir. Bu gradasyonda şekilde görüldüğü gibi %25, %75 ve %100 oranlarda UK kullanılarak her oran için UK'nın etkisi incelenmiştir. %25 oranında UK kullanılmamış her üç numunenin şartlandırılmamış halindeki dayanım ortalamasının değeri 935,33KPa olarak elde edilmiştir. %75 oranında UK kullanımında her üç numunenin şartlandırılmamış halindeki dayanım ortalamasının değeri 895.33KPa olarak elde edilmiştir. %100 UK kullanımında ise her üç numunenin şartlandırılmamış halindeki dayanım ortalamasının değeri 938.66KPa olarak elde edilmiştir. Sonuçları incelendiğinde %100 UK kullanıldığı durumda ve elde edilen optimum bitüm yüzdesi da %0.5 azaltılarak bu gradasyon için en yüksek dayanım ortalamasını veren numune olarak görülmektedir. Bu gradasyon için %75 oranında UK kullanılması durumunda ise diğer kullanılmış oranlara göre en düşük dayanım ortalamasını verdiği görülmektedir. Sonuç olarak bu gradasyon için numunelerin şartlandırılmamış halinde, optimum bitüm miktarının azaltılarak ve UK oranını da artırarak verimli sonuçlar elde edileceği tespit edilmiştir.



Şekil 11. Üçüncü gradasyon karışımlarına ait benzer numuneler için ITS_{kuru} değerleri (ITS_{dry} values for similar samples of third gradation mixtures)

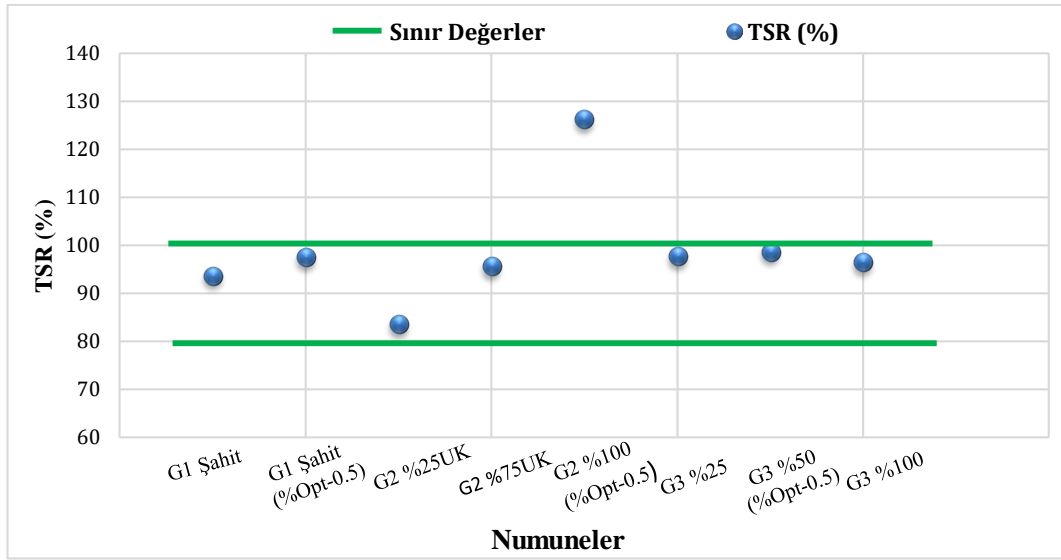
Şekil 11’de 3. gradasyon için yapılan ITS_{kuru} deney sonuçlarının grafik hali görülmektedir. Bu gradasyonda şekilde görüldüğü gibi %25, %50 ve %100 oranlarda UK kullanılarak her oran için UK’nın etkisini incelenmiştir. %25 oranında UK kullanımında her üç numunenin şartlandırılmamış halindeki dayanım ortalamasının değeri 714,48KPa olarak elde edilmiştir. %50 oranında UK kullanımında her üç numunenin şartlandırılmamış halindeki dayanım ortalamasının değeri 984.19KPa olarak elde edilmiştir. %100 UK kullanımında ise her üç numunenin şartlandırılmamış halindeki dayanım ortalamasının değeri 821.68KPa olarak elde edilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde %50 UK kullanıldığı durumda ve elde edilen optimum bitüm miktarını da %0.5 oranında azaltılarak bu gradasyon için en yüksek dayanımı veren numune olarak görülmektedir. Bu gradasyon için %100 oranında UK kullanılması durumunda %25 UK kullanıldığı numunelerden daha düşük bir dayanım ortalaması vermiştir ve bu da UK’nın oranının artışından kaynaklanmaktadır. Sonuç olarak bu gradasyon için numunelerin şartlandırılmamış halinde, optimum bitüm miktarının azaltılarak ve UK oranını da artırarak verimli sonuçlar elde edileceği tespit edilmiştir.

Tüm numunelerin neme karşı hassasiyetini değerlendirmek için şartlandırılmış numunelerin ITS_{ıslak} değerlerini şartlandırılmamış numunelerin ITS_{kuru} değerlerine bölünerek TSR oranlar elde edilmiş ve sonuçları Tablo 8’de gösterilmiştir.

Tablo 8. Karışımların TSR oranları (TSR ratios of mixtures)

Numune Adı	TSR (%)
G1Şahit	93.50
G1şahit (%opt-0.5)	97.33
G2 %25 UK	83.44
G2 %75 UK	95.55
G2 %100 UK (%opt-0.5)	126.15
G3 %25 UK	97.59
G3 50% UK (%opt-0.5)	98.51
G3 %100 UK	96.38

Tablo 8’de görüldüğü gibi tüm numunelerin TSR oranları şartnamedeki minimum %80 minimum sınır değerini sağlamaktadır. TSR oranların %80 değerinden ne kadar fazla olursa o kadar da neme karşı direnç te doğal olarak artmış olmaktadır. Tablo 8’e bakıldığında genel olarak bir numune (G2 %25 UK) hariç diğer tüm numunelerin TSR oranları %100’e çok yakın olduğu görülmektedir. Dolayısıyla UK’nın agrega karışımında filler olarak kullanılmasının numunelerin neme karşı performansını arttırdığı gözlenmiştir. Tüm numunelerin neme karşı hassasiyetini değerlendirmek için Tablo 8’in TSR sonuçlarına göre bir dağılım grafiği çizilmiş ve aşağıdaki Şekil 12’de gösterilmiştir.



Şekil 12. Karışımların TSR oranları (TSR ratios of mixtures)

Şekil 12’de görüldüğü gibi 1. gradasyonun şahit numunesinin optimum bitüm miktarının %0.5 birim azaltılmış durumunda neme karşı performansı daha da artmıştır. Buna göre bu gradasyon için bitümün azalması durumunda numunelerin neme karşı performansı daha da artmaktadır. İkinci gradasyondaki %25 ve %75 UK kullanım durumunda yaklaşık aynı optimum bitüm miktarlarına sahip ama %75 UK’nın kullanılması durumunda TSR oranı daha fazla olduğu görülmektedir. %25 UK’nın kullanılması durumunda ise diğer numunelere göre en düşük TSR oranını vermiş görülmektedir. İkinci gradasyonun %100 UK kullanılması durumunda optimum bitüm miktarı %25 ve %75 oranlardan daha düşük olduğuna rağmen ama UK oranı fazla olduğu için tüm numunelere göre en büyük TSR oranını vermiştir. Buna göre bu gradasyonun TSR oranlarına bakıldığında UK’nın arttığı durumda TSR oranları artmıştır. Yani UK’nın numunelerin neme karşı performansını arttırmıştır. 3. gradasyondaki üç numunenin TSR oranlarına bakıldığında çok yakın değerler verdiği görülmektedir. Ancak %50 UK kullanımında bitüm miktarı diğer %25 ve %100 UK kullanımından daha az olduğuna rağmen neme karşı performansı daha fazla olduğu görülmektedir. Genel olarak tüm numunelerin TSR oranların sonuçlarına bakıldığında UK’nın artmasıyla numunelerin neme karşı performansı artmıştır.

5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Çalışmada, bitümlü sıcak karışımlarda filler olarak geleneksel kullanımı olan kırmataş tozu yerine %25, %50, %75 ve %100 UK kullanılmıştır. İlk etapta çalışma için üç tip agrega gradasyonu belirlenmiştir. Belirlenen bu agrega gradasyonları kullanılarak her gradasyon için optimum bitüm oranları elde edilmiştir. Elde edilen optimum bitüm oranlarına göre Superpave hacimsel karışım tasarım yöntemine göre numuneler üretilmiştir. Üretilen numuneler üzerine ITS testleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca üretilen numunelerin nem hassasiyeti de incelenmiştir. Yapılan deney sonucunda bitümlü karışımlarda taştuzu yerine UK’nın kullanılmasında optimum bitüm miktarını düşürerek maliyet açısından önemli katkılar sağlamaktadır. Ayrıca elde edilen sonuçlara göre UK kullanımı ile çalışmada, herhangi bir katkı maddesi kullanılmayan sıcak karışım asfaltlara göre daha yüksek TSR oranları elde edilmiştir. TSR oranların artması ile numunelerin neme karşı direnci artmış demektir. BSK’lı kaplamaların neme ve şiddetli yağışlara çok uzun zaman maruz kalması istenmemektedir. Ancak ülkemizde bilhassa Karadeniz bölgesinde şiddetli ve uzun süreli yağışların BSK’lı kaplamalarında bozulmalara neden olduğu bilinmektedir. Yapılan çalışma sonuçlarına göre UK ile hazırlanan BSK’ların neme karşı performansların artırdığı gözlenmiştir. Dolayısıyla UK ile hazırlanan BSK’ların şiddetli ve uzun süreli yağış alanlarda kullanılabilmesi daha verimli sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Atık yöntemi ve atıkların çevreye ve insan sağlığına verilen zararların, günümüzdeki en ciddi sorunlardan biri olarak karşımıza çıkmaktadır. Atık olarak görülen UK’nın Türkiye’de bulunan termik santrallerden yılda 16 milyon ton ortaya çıkmaktadır. Bu çalışmada UK’nın BSK’larda agrega karışımı içerisinde filler olarak kullanılabilmesi görülmüştür. Sonuç olarak UK’nın yol üstü yapısının, aşınma tabakasında kullanılması, çevresel kirlilikleri önlemekle birlikte ekonomik açıdan da büyük katkılar sağlayabilmektedir.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- Ahmedzade, P., Alataş, T., Geçkil, T. 2008. Asfalt betonunda siyah karbonun filler olarak kullanımı. *Teknik Dergi*, 19(4), 4493–4507.
- Ali, N., Chan, J. S., Simms, S., Bushman, R., Bergan, A. T. 1996. Mechanistic Evaluation Of Fly Ash Asphalt Concrete Mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 8(1), 19–25.
- Altaş, Ö. Yi. 2002. Bitümlü malzemeler ve karışım şartnamelerinin karşılaştırılması. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek lisans tezi, 137s, İstanbul.
- Bohara, N., Tamrakar, G. B. S. 2018. Study of the Influence of Fly Ash and Its Content in Marshall Properties of Asphalt Concrete. *Journal of Sustainable Construction Materials and Technologies*, 3(3), 261–270.
- Ceylan, S. 2006. Bitümlü Sıcak Karışımlarda Filler Olarak Carboniferous-Triassic Kayaç Tozlarının Kullanılması Ve Etkisi. Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 79s, Konya.
- Deniz, M. T., Sönmez, İ., Yıldırım, S. A., Eren, B. K. 2005. Kullanılmış otomobil lastiklerinin bitümlü sıcak karışım performansına etkisi. 6. Ulaştırma Kongresi, İstanbul, 349–364.
- Elmacı, A. 2011. Asfalt Betonunda Granit Arıtma Çamurunun Filler Malzemesi olarak kullanılabilirliğinin araştırılması. In *Phys. Rev. E*. Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 75s, Afyon.
- Eren, Ü. 2008. Asfaltit asfalt betonunda mineral filler olarak kullanılması. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 74s, Trabzon.
- Güngör, M. M. 1996. Afşin Elbistan uçucu külünün esnek yol kaplamalarında filler olarak kullanımı üzerine bir araştırma. Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 65s, Elazığ.
- Hossain, A., Khan, T., Ahmed, J. 2018. Influence of Fly Ash as Mineral Filler in Bituminous Mix Design. *Trends in Civil Engineering and Its Architecture*, 3(2), 1–6.
- Mirkoviç, K., Tosiç, N., Mladenoviç, G. 2019. Effect of Different Types of Fly Ash on Properties of Asphalt Mixtures. *Advances in Civil Engineering*, 2019, 12.
- Mistry, R., Roy, T. K. 2016. Effect of using fly ash as alternative filler in hot mix asphalt. *Perspectives in Science*, 8, 307–309.
- Öksüz, B. 2011. Asfalt Betonuna Kaplamalarda Volkanik Cüruf ve Cam Atıklarının Filler Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 77s, İsparta.
- Öntürk, K., Vural, İ. 2014. Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılabilirliğinin Arştırılması. *Akademik Platform*, 1275–1284.
- Pourtahmasb, M. S., Karim, M. R. 2014. Performance evaluation of stone mastic asphalt and hot mix asphalt mixtures containing recycled concrete aggregate. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2014.
- Selman, G. Ş. 2015. Bor atıklarının asfalt kaplamalarda mineral filler olarak kullanılabilirliği Koca Tepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 84s, Afyon.
- Terzi, S. 2000. Mermer Toz Atıkların Asfalt Betonunda Filler Malzemesi Olarak Kullanılmasının Araştırılması. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 62s, İsparta.
- Üstümkol, F. N., Turabi, A. 2009. Endüstriyel Atıkların Karayolu Üstyapısında Değerlendirilmesi. *BAÜ FBE Dergisi*, 11(1), 15–27.
- Xue, Y., Hou, H., Zhu, S., Zha, J. 2009. Utilization of municipal solid waste incineration ash in stone mastic asphalt mixture: Pavement performance and environmental impact. *Construction and Building Materials*, 23(2), 989–996.
- Yılmaz, A. 2002. Antalya Ferrokrom İşletmesi'nin elektrik-ark fırını cüruflarının ve baca tozu atıklarının asfalt betonunda kullanılabilirliğinin araştırılması. Akdeniz Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 76s, Antalya.
- Zumrawi, M. M. E., Sheikh Edrees, S. A. 2016. Comparison of Marshall and Superpave Asphalt Design Methods for Sudan Pavement Mixes. *International Journal of Scientific and Technical Advancements*, 2(1), 29–35.