

KAZINMIŞ KARAYOLU ÜSTYAPISININ KÖPÜK BİTÜMLE YERİNDE SOĞUK GERİ KAZANIMININ PERFORMANS DEĞERLENDİRMESİ

Savaş Nedim TUTAN¹ Ahmet SAĞLIK¹ Muhammet KOMUT¹ Şenol ALTIÖK²

ÖZET

Koruyucu bakımları düzenli bir şekilde yapılmış olsa dahi karayolu kaplamalarında zamanla oluşan yıpranma, bozulma ve yorulmalar bir süre sonra üstyapının ömrünün tamamlanmasına ve tabakaların yenilenmesi ihtiyacına neden olmaktadır. Artan yapım faaliyetleri neticesinde doğal kaynakların gün geçtikçe hızla tükendiği günümüzde, ömrünü tamamlayan üstyapı tabakalarını oluşturan malzemelerin aslında önemli bir potansiyel barındırdığı tüm dünyada kabul görmekte ve bu malzemelerin yol üstyapısında tekrar kullanımına olan yönelim giderek artmaktadır. Geri kazanım tekniklerinden biri olan köpük bitümle yerinde soğuk geri dönüşümle yeni üretilen tabakaların tasarımı, optimum karışım oranlarının tayini ve performans değerlendirilmesi için net bir yöntem olmamakla birlikte endirekt çekme mukavemeti (İÇM) ve esneklik modülü (MR) parametreleri yaygın olarak kullanılmaktadır.

Çalışma kapsamında laboratuvar da köpük bitümle soğuk geri kazanım yöntemi uygulanarak hazırlanan karışımlar üzerinde yürütülen deneylerle, ömrünü tamamlamış üstyapı tabakalarının köpük bitüm tekniğiyle soğuk geri kazanımda kullanımları araştırılmıştır. Bu amaçla farklı tabakalardan kazınmış üstyapı malzemeleri (KAK), farklı penetrasyon sınıflarındaki bitümlü bağlayıcılar ve farklı türdeki aktif filler malzemeler kullanılarak farklı gradasyonlarda soğuk karışımlar hazırlanmıştır. Sıkıştırılmış optimum bitüm oranlardaki karışımların esneklik modülü ve İÇM değerleri belirlenmiş ve performansları değerlendirilmiştir. MR değerlendirmesine göre soğuk geri kazanım tabakaları için izafi mukavemet katsayıları belirlenmiş ve şartname gradasyon aralığı önerilmiştir.

Yapılan çalışmalar sonucunda köpük bitümle hazırlanan soğuk geri kazanım tabakasının sıcak karışımdan ziyade plent miks temel ile bitümlü temel arasında, yapısal sağlamlığa sahip kaliteli bir temel tabakası gibi davranış sergilediği görülmüştür.

1. Yüksek Mühendis, KGM, AR-GE Dairesi Başkanlığı, Ankara

2. Mühendis, , KGM, AR-GE Dairesi Başkanlığı, Ankara

GİRİŞ

Karayolu üstyapılarının yenileme çalışmaları sırasında ortaya çıkan kazınmış malzemelerin ekonomik ve teknik olarak değerlendirilmesi ve sürdürülebilir yolların oluşturulması geri dönüşüm ile mümkün olabilmektedir (Isola vd., 2013). Üstyapılar için farklı uygulamaları olan geri dönüşüm yöntemlerinden biri olan köpük bitümle yerinde soğuk geri kazanım tekniği; kazınmış malzeme için depo alanı ihtiyacının olmaması ve karışımın ısıtılmasına gerek kalmaması gibi nedenlerle büyük oranda işçilik, kaynak ve enerji tasarrufu sağlamaktadır (ARRA, 2001). Geri dönüşüm için üstyapıda yapılan kazıma işlemi sadece bitümlü tabakaları (sathi veya karışım kaplama) kapsıyor ise kısmi derinlikte kazıma, bitümlü tabakalara ilaveten altındaki granüler tabakaları da (PMT, Granüler Temel, Alttemel) içeriyorsa tam derinlikte kazıma olarak adlandırılır (Thompson vd., 2009).

Yerinde soğuk geri dönüşüm işleminde; bitüm emülsiyonu, cut-back, köpük veya yüksek penetrasyonlu bitümlü bağlayıcılardan birisiyle, kazınan eski bitümlü kaplama ve altındaki granüler tabaka malzemeleri ilave ısıtmaya gerek olmaksızın yerinde soğuk olarak karıştırılmakta ve yeni bir tabaka olarak serilerek sıkıştırılabilmektedir (Kim vd., 2006). Sıcak bitümün su ile köpürtülmesi işlemi bitümün genleşmesi ve yüzey alanının artmasını sağlamak için kullanılan bir teknik olup, uzun süre köpürtülmüş formunu koruyabilen bağlayıcılar karışım için daha idealdirler (Muthen, 1998). Köpük bitüm genelde maksimum genleşme oranı (GO) ve yarılanma ömrü (YÖ) terimleriyle karakterize edilir. Genleşme oranı, köpürmüş bitümün maksimum hacminin, bitümlü bağlayıcının orijinal (köpürmemiş) hacmine oranıdır (Jenkins, 1999). Yarılanma süresi ise, köpürmüş bitümün maksimum hacmine ulaştığı an ile maksimum hacmin yarısına indiği zaman arasındaki saniye cinsinden süredir (He ve Wong, 2008). Köpük bitümle hazırlanmış soğuk karışımlar genellikle içerisinde kısmen bitümle kaplanmış büyük agregaların parçacıklar halinde dağılmış olduğu bir yapı olarak görülür. Bu nedenle köpük bitümlü soğuk karışımlarda malzeme gradasyonu çok önemli olup, köpük bitümün homojen olarak dağılabilmesi için karışımda yeterli miktarda ince agrega ve aktif filler malzeme bulunması gerekmektedir (Asphalt Academy, 2009).

Endirekt Çekme Mukavemeti (İÇM) ve İÇM Oranı

Endirekt çekme mukavemeti bitümlü karışımları sıcaklık ve yorulma etkileri nedeniyle oluşan çekme gerilmeleri, kırılma potansiyeli ve nem duyarlılığı bakımından karakterize eder (Seçginli, 2007). Köpük bitümlü soğuk karışımlar, BSK' ya oranla daha yüksek oranda hava boşluğunda ve geçirgenlikte olmaları nedeniyle yüksek nem duyarlılığına sahiptirler. Bu nedenle soğuk karışımın tasarımında, kötü koşullar altındaki (suda şartlandırılmış) İÇM ($İÇM_{yaş}$) değeri nem etkisinin neden olduğu zayıflığı belirlemekte kullanılır (Diab ve Enieab, 2018).

Köpük bitümle hazırlanmış aynı soğuk karışıma ait şartlandırılmış ve şartlandırılmamış Marshall numuneleri üzerinde yapılan deneylerde $İÇM_{kuru}$ en az 225kPa, $İÇM_{yaş}$ en az 100kPa ve $İÇM_{yaş}$ değerinin $İÇM_{kuru}$ değerine bölünmesiyle bulunan İÇM oranının da en az %50 olması gerekmektedir (Wirtgen, 2012). Karışımın

neme karşı iyi bir direnç gösterebilmesi için İÇM oranı minimum %80 olmalıdır (Diab ve Enieib, 2018).

Aktif Filler

Aktif filler: karışımın özelliklerini kimyasal olarak değiştiren çimento, sönmüş kireç veya uçucu kül tarzı hidrolik bağlayıcı malzemeleri tanımlamaktadır (Asphalt Academy, 2009). Köpük bitümle hazırlanan soğuk geri dönüşüm karışımı fazla miktarda kazınmış üstyapı malzemeleri ile yüksek oranda boşluk hacmi içerdiğinden, olası zayıflıklarını gidermek ve tabakanın mekanik özelliklerini iyileştirmek amaçlı bitüm agrega adezyonunu artırmak, doğal malzemelerin plastisitesini azaltmak, karışımın sıkılığını artırarak dayanımı artırmak için aktif filler kullanılır. Aktif filler köpük bitümün karışımın içerisinde homojen olarak dağılmasına da yardımcı olur. Ancak yüksek oranda aktif filler içeriği büzülme ve düşük trafik yükleri altında dahi çatlak oluşabilecek kadar kırılgan bir yapı oluşmasına neden olduğundan kullanım oranı dikkatli seçilmelidir. Bu oran genelde kuru karışım ağırlığının %1'i olarak seçilir (Wirtgen, 2012).

Aktif filler türünün ve kullanım oranının seçiminde kür edilmiş ve suda bekletilerek şartlandırılmış Marshall numunelerinin İÇM değeri oldukça etkindir. Soğuk geri dönüşüm karışımının nem içeriğinin azalması ve buna bağlı olarak dayanım kazanması kür olarak adlandırılır. Karışım kürünü alıncaya kadar mekanik özellikleri artmaya devam eder (Cardone vd., 2014). Bu sebeple hidrolik bağlayıcı içeren soğuk karışım tabakalarının hizmete açılmadan önce kür sürecini tamamlamış olmaları gerekir (Asphalt Academy, 2009). Laboratuvar ortamındaki 40°C sıcaklıkta 3 günlük bir koşullandırma, arazi şartlarında 3 ile 6 ay arasındaki bir küre tekabül etmektedir (Austroads, 2011).

Esneklik Modülü (MR) ve İzafe Mukavemet Katsayısı (Tabaka Katsayısı, a)

Köpük bitümlü soğuk karışımların değerlendirilmesinde kullanılan bir başka parametre olan esneklik modülü üstyapı tabakalarının uygulanan yükler altındaki kalıcı olmayan esnek deformasyon direncini tanımlamaktadır (Fu vd., 2009). Tekrarlı yükleme altında deviatör gerilmenin elastik birim deformasyona oranı olarak tanımlanan MR'ı belirlemek için yapılan deneysel çalışmalarda kullanılan hücre basıncı, kaplamadan geçen bir tekerlek yükünün yarattığı sürtünme kuvvetini temsil eder (Alam, 2010). Kaplamada tekerlek yükünün altındaki noktada gerilme maksimum iken, yük belirli bir mesafe uzaklaştıktan sonra aynı noktadaki gerilme sıfırdır. Bu nedenle deneysel çalışmalarda çekme darbesi genelde haversin (yarım sinüs dalgası) veya üçgen yükleme olarak modellenir. Yükleme tipi araç hızına ve kaplama yüzeyinin altındaki noktanın derinliğine bağlı olarak değişmekle birlikte, genellikle 0.1s yükleme süresi 0.9s de dinlenme süresi olarak uygulanmaktadır (AASHTO T307-99, 2012).

İzafe mukavemet ya da tabaka katsayısı (a) üstyapı sayısı (SN) ve kalınlık arasındaki ampirik ilişkiyi ifade eder ve üstyapı tabakasının yapısal olarak işlev görebilme yeteneğinin bir ölçüsüdür (Bahia vd., 2000). Karayolları Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberinde tabaka katsayıları; granüler tabakalar için $a = 0.0045 \times MR^{1/3}$ (MR:psi), BSK tabakaları için de $a = 0.249 \times \log MR - 0.977$ (MR:psi) bağıntılarıyla belirlenmektedir (Sağlık ve Güngör, 2008). Köpük bitümlü soğuk geri dönüşüm karışımının esneklik modülü ve tabaka katsayı değerleri için oldukça farklı görüşler bulunmaktadır. Örneğin

Austroads (2011) tarafından bu karışımlar için MR' ın 500 MPa ile 4000 MPa arasında olduğu bildirilmişken, Wirtgen (2012) tarafından tamamı kazınmış üstyapı malzemeleriyle üretilen köpük bitümlü soğuk karışımlarda 1000 MPa ile 2000 MPa arasında değerlerde olduğu belirtilirken tabaka katsayıları için 0.28 - 0.35 aralığı öngörülmektedir. Romanoschi vd. (2003) ise köpük bitüm ile hazırlanmış tam derinlikte geri dönüşüm karışımlarının tabaka katsayısı olarak 0.18 değerini önermiştir. Literatürde esneklik modülü ve tabaka katsayı değerlerinin bu kadar geniş bir aralıkta bulunmasının nedeni olarak geri dönüştürülmüş üstyapının kazıma derinliği, buna bağlı karışıma giren malzeme çeşitliliği, kullanılan bitüm sınıfı ve aktif filler cinsi ve oranı ile karışımların farklı kür süreleri söylenebilir.

Köpük bitümle soğuk karışım tabakaların mekanik özellikleri ve davranışları sahadaki uygulamadan ve kürden büyük ölçüde etkilenmektedir. Uygun tasarım ve uygulama yapıldığında, yapısal kapasiteleri granüler temel ile sıcak karışım asfalt arasında bir yerde bulunmaktadır. Bu nedenle köpük bitümle soğuk geri kazanım tabakalarının granüler temeller yerine kullanılmasının, üstyapı tabakalarının gerekli kalınlığı azaltılabileceği ve bu durumun geri kazanımın faydalarına ek olarak maliyet tasarrufu sağlayacağı da belirtilmiştir (Khosravifar vd., 2015).

Ülkemizde Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından yapılan Kızılcahamam-Gerede yolu deneme kesiminde 3.5 km'lik ömrünü tamamlamış BSK kaplamalı kesimde köpük bitümle yerinde soğuk geri kazanım uygulaması yapılmıştır. Çalışma sonucunda deneme kesiminin performansı yapımdan itibaren takip edilmiş ve ilk yapıldığında geri dönüşüm tabakasının esneklik modülü 627 MPa ve tabaka katsayısı 0.20 bulunmuş iken, iki yıl sonra esneklik modülü 2345 MPa ve tabaka katsayısı 0.31 olarak tespit edilmiştir. Bunun nedeninin farklı zamanlarda alınan defleksiyon etütlerinde çimentonun prizine bağlı olarak geri dönüşüm tabakasının mukavemetinin zamanla artışı olduğu belirtilmiştir (Sağlık vd., 2013).

Bu çalışma kapsamında tamamı kazınmış eski bir BSK kaplamanın tabakaları (Aşınma: 5cm, Binder: 7cm ve Bitümlü Temel: 10cm) ile farklı penetrasyon sınıflı bitüm ve farklı aktif filler malzemeler kullanılarak farklı gradasyonlarda, laboratuvarıda üretim serileri yapılmıştır. Üretimlerde ikame gerektiren gradasyonlarda ilaveler için kırmataş agregalar kullanılmıştır. Sıkıştırılmış karışımların İÇM değerlerine göre optimum bitüm yüzdeleri belirlenmiş ve bu optimum bitüm yüzdeleri için esneklik modülü deneyleri yapılmıştır.

MALZEMELER VE METOT

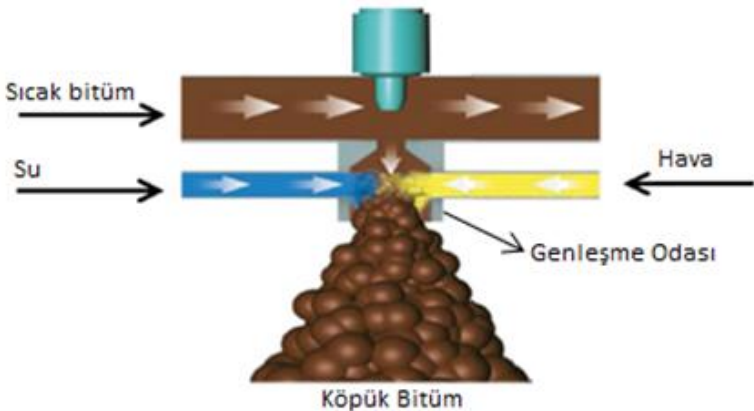
Geri dönüşüm uygulaması esnasında kazınacak farklı üstyapı tabakalarına ait karşılaşılabilecek gradasyonları temsilen çalışmada 9 farklı tip belirlenmiştir. Deneysel çalışmalar Tablo 1' de verilen gradasyon tipleri için yapılarak kıyaslanmıştır.

Tablo 1. Deneylerin gerçekleştirildiği karışım gradasyonları

Elek Çapı (mm)	Gradasyon Tipi								
	Tip-1	Tip-2	Tip-3	Tip-4	Tip-5	Tip-6	Tip-7	Tip-8	Tip-9
25	100	100	100	100	100	100	100	100	100
19	82	83	84	96	97	98	91	84	96
12.5	62	70	75	87	89	90	78	75	87
9.5	53	62	70	79	81	83	69	70	79
4.75	35	47	58	58	62	67	52	58	58
2.00	20	32	45	33	41	50	35	45	33
0.425	8	17	28	9	18	32	20	28	11
0.180	4	11	20	4	12	20	12	20	7
0.075	1.6	6	12	1.6	6	12	6	12	4

Kazıma derinliğine ve mevcut yolun kaplama cinsine bağlı olarak geri dönüşüm malzemelerindeki muhtemel dane boyutu değişikliklerini temsil etmek için hazırlanan Tablo 1.'de verilen Tip-4 gradasyonu bu çalışmada kullanılan KAK malzemenin laboratuvarında tespit edilmiş gerçek gradasyonudur. Diğer gradasyon tipleri kazınmış malzemeye yeni agrega ikamesi durumları için uyarlanmıştır. Tip-8 gradasyonu %90 ikame agrega + %10 KAK ile üretilmek üzere bitümlü sathi kaplamalı üstyapının kazınmasını temsil etmek için belirlenmiştir. Deneysel çalışmalarda; ikame amacıyla kireçtaşı taş ocağından temin edilmiş agregalar, aktif filler olarak; CEM I 42.5 R portland çimentosu, sönmüş kireç, bitüm olarak da B50/70, B70/100, B100/150 ve B160/220 penetrasyon sınıflı bağlayıcılar kullanılmıştır.

Çalışma sırasında ilk olarak Wirtgen (2012) tarafından önerilen prosedüre göre farklı sınıflardaki bitümler köpürtme işlemine tabi tutularak optimum bitüm sıcaklıkları, su miktarları ve GO (genleşen hacmin orijinal bitüm hacmine oranı) ile YÖ (genleşme hacminin maksimum noktasından yarı seviyesine ininceye kadar ki geçen süre) köpürme parametreleri belirlenmiştir (Şekil 1).



Şekil 1. Köpük bitüm üretim süreci (Wirtgen, 2012)

Bitümün köpürtülmesi ve sonrasında köpük bitümle soğuk karışım malzeme üretimleri için Wirtgen firmasının ürettiği özel laboratuvar plenti kullanılmıştır (Şekil 2). Her bir bitüm cinsine ait köpürme değerleri Tablo 2’ de verilmiştir.

Tablo 2. Bitüm sınıflarına göre optimum köpürme parametreleri

Bitüm Sınıfı	Köpürtme Isısı ($^{\circ}\text{C}$)	Optimum Su Miktarı (%)	Genleşme Oranı (GO)	Yarılma Ömrü (YÖ) (s)
B50/70	170	3.0	21.9	10.0
B70/100	170	2.0	20.0	10.3
B100/150	170	2.0	21.2	10.2
B160/220	160	2.0	20.7	9.3

Laboratuvar plentinde Tablo 1.’ de verilen Tip-4 gradasyonunda bitüm sınıflarının tamamı için 5 farklı oranda (%1.9, %2.2, %2.5, %2.8 ve %3.1) ve %1 portland çimentosu ile üretimler yapılmıştır. Yoldan gelebilecek farklı malzeme gradasyonlarına göre de farklı karışımlar hazırlanarak denenmiştir. Bunlara ilave olarak %1.3 ve %3.7 bitüm oranlarında da denemeler yapılmıştır. Aktif fillerin etkisinin belirlenebilmesi amacıyla % 2.5 bitüm oranında sadece %1 kireç, sadece %1 uçucu kül ve her ikisinin birden %1’ er oranlarında kullanıldığı kıyaslama üretimleri de yapılmıştır. Ayrıca gradasyon tiplerinin tamamında B70/100 bitümle portland çimentolu karışımlar hazırlanarak gradasyonun performansına olan etkisi de araştırılmıştır.



Şekil 2. Köpük bitümle soğuk karışım laboratuvar plenti (Wirtgen)

İÇM Deneyi

İÇM deneyi Wirtgen (2012) prosedürüne uygun olarak, hem optimum bitüm miktarlarının hem de aktif filler cinsinin belirlenmesi için kullanılmıştır. Hazırlanan her farklı karışım için standart Marshall tokmağında her iki yüzüne de 75’ er darbe uygulanmış 4’’ çapında Marshall briket numuneleri hazırlanmıştır (Şekil 3). Briketler 24 saat sonra kalıplarından çıkarılarak 40°C’deki etüvde 72 saat bekletilmiştir.



Şekil 3. Köpük bitümle üretilen Marshall briketleri

Bekleme süresi sonunda şartlandırmak amacıyla her bir karışıma ait numuneler iki gruba ayrılmıştır. Şartlandırılmayacak olanlar kuru halde hemen, şartlandırılmasına karar verilenler ise 25°C suda 24 saat bekletildikten sonra ASTM D 6931 standardına göre endirekt çekme deneyine tabi tutulmuştur.

Optimum bitüm yüzdeleri belirlenirken $\dot{I}CM_{kuru} > 225$ kPa ve $\dot{I}CM_{yaş} > 100$ kPa şartını sağlayan karışımlar dikkate alınmıştır. Aynı gradasyon için şartları sağlayan birden fazla bitüm değerleri olması durumunda maliyet açısından düşük olan bitüm yüzdesi optimum oran olarak seçilmiştir. Ancak aynı karışım için şartların sağlandığı bitüm yüzdeleri arasındaki fark küçük, $\dot{I}CM$ ’ ler arasındaki fark ise oldukça büyük ise yüksek $\dot{I}CM$ veren bitüm yüzdesi optimum değer olarak seçilmiştir. Genele bakıldığında serilerin tamamında optimum bitüm değerleri %1.9 - %2.2 gibi düşük oranlarda çıkmıştır. Bu nedenle uygulamada %1.8 - %2.5 arası bitüm oranlarında karışım hazırlanıp $\dot{I}CM$ kontrolü yapmanın yeterli olacağı düşünülmektedir.

Esneklik Modülü Deneyi

Köpük bitümle hazırlanan soğuk karışımların esneklik modülü deneyinde AASHTO T307 - 99 deney standardından faydalanılmıştır. Buna göre deney numuneleri 152 mm çap ve nihai 315 mm yükseklikte, optimum su içeriğinde, titreşimli tokmak yardımıyla sıkıştırılarak hazırlanmış ve deney prosedürüne göre test edilmiştir. Sıkıştırılmış numuneler 24 saat 60°C’deki su banyosunda bekletilmiş sonrasında 2 saat laboratuvar ortamında soğumaya bırakılmıştır. Test 0.1 s yükleme ve 0.9 s dinlenmeli haversin yükleme şartlarında üç eksenli bir yük hücresinde gerçekleştirilmiştir.

Testte; yazılım tarafından ilk olarak 1000 yükleme yapılır. Bunun 995’ i ön yükleme olarak yapılır ve takip eden son 5 yüklemenin ortalama değerlerinden esneklik modülü bulunur. Testin devamında ilave 1500 yükleme daha yapılır (her 100 yüklemede; 95 ön yükleme + son 5 hesap yüklemesi) ve deney sonlandırılır.

DENEY ÇIKTILARI

Köpük bitümle hazırlanan soğuk karışım üretim serilerinin optimum bitüm yüzdeleri için $\dot{I}CM$ ve esneklik modülünün sayısal değerleri ve hesaplanan tabaka katsayıları özet olarak Tablo 3.’de verilmiştir. Aktif filler olarak kireç ve uçucu kül kullanılan üretimlerde $\dot{I}CM$ değerleri sınır değerleri sağlamadığından bu karışımlara esneklik modülü testi yapılmamıştır. Esneklik modülü deney düzeneği Şekil 4’ de gösterilmiştir.



Şekil 4. Esneklik modülü deney düzeneği

Tablo 3. Soğuk karışım üretimlerinin deney sonuçlarına ait özet tablosu

Numune Kodu	Ort. İÇM _{kuru} (kPa)	Ort. İÇM _{yaş} (kPa)	İÇM _{oranı} (%)	MR (MPa)	MR (psi)	Tabaka Katsayısı (a _{Granüler} - a _{BSK})
2.5T4B70Ç1	244.26	243.52	99.7	518.22	75158,8	0.19 – 0.24
2.2T4B50Ç1	270.20	256.38	94.9	536.93	77872,4	0.19 – 0.24
1.9T4B100Ç1	264.82	214.04	80.8	396.01	57447,4	0.17 – 0.21
1.9T4B160Ç1	251.05	232.64	92.7	332.71	72680,2	0.16 – 0.19
2.5T2B70Ç1	301.59	312.03	103.5	358.98	52063,8	0.17 – 0.20
2.2T5B70Ç1	264.55	224.88	85.0	191.49	27772,3	0.14 – 0.14
1.9T6B70Ç1	272.97	257.42	94.3	239.10	34677,3	0.15 – 0.15
1.9T9B70Ç1	253.46	223.50	88.2	433.80	62915,2	0.18 – 0.22
1.9T8B70Ç1	345.66	282.16	81.6	202.38	29350,1	0.14 – 0.14
2.5T4B70K1U1	197.34	258.51	131.1			
2.5T4B70K1	135.28	189.62	140.2			
2.5T4B70U1	119.90	113.00	94.3			

Numune kodu kısaltmaları:

	T4: Gradasyon Tipi (T1:Tip-1, T2:Tip-2...)	
2.5: Bitüm Miktarı (2.5:%2.5)	2.5T4B70Ç1	B70: Bitüm Sınıfı (B50:B50/70, B70:B70/100...)
	Ç: Aktif Filler Cinsi (Ç: çimento, K: sönmüş kireç, U: uçucu kül), 1: Aktif Filler Oranı (1:%1)	

Soğuk karışım üretimlerinde İÇM oranı ve İÇM_{yaş} değerleri Wirtgen tarafından belirtilen minimum değerleri sağladığı için, İÇM_{kuru} değerleri dikkate alınarak değerlendirme yapılmıştır.

Bazı üretimlerde İÇM_{yaş} değeri İÇM_{kuru} değerinden yüksek çıkmış bu nedenle İÇM oranı %100'ü geçmiştir. Bu durum için, numunelerin etüv sonrası 24 saat su içerisinde beklemesinin aktif filler olarak kullanılan hidrolik bağlayıcının hidratasyon sebebiyle İÇM değerini arttırmış olacağı düşünülmektedir.

Çimentolu seriler İÇM açısından en iyi sonuçları vermiş olup, farklı türdeki aktif fillerli karışımlar İÇM açısından gerekli kriterleri sağlayamamıştır. Bu nedenle çimento haricindeki aktif filler kombinasyonlarının birlikte kullanılmasının olumlu olabileceği düşünülmektedir.

Karışımlar gradasyon açısından değerlendirildiğinde No.4 elek üstünde kalan malzeme kabalaştıkça ve No.4 elek altı malzeme incelidikçe İÇM değerlerinin arttığı söylenebilir. Esneklik modülü için durum tersidir.

Bitümlü sıcak karışımlarında İÇM_{kuru} değerinin minimum 500kPa olması beklenir (Wirtgen, 2012). Çalışmada hiçbir üretime ait İÇM_{kuru} değerinin bu seviyeye ulaşamaması soğuk karışım malzemenin bitümlü sıcak karışım özelliklerini tam olarak yansıtamadığının göstergesidir.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Çalışmada sıklıkla kullanılan değerlendirme kriterleri olan İÇM ve MR parametrelerini etkileyen gradasyon, bitüm yüzdesi ve aktif filler tipi gibi değişkenler deneysel olarak incelenmiştir. Elde edilen bulgulara göre aşağıdaki sonuçlar çıkarılmış ve köpük bitümle yerinde soğuk geri kazanım tekniği ile teşkil edilen tabakalara ilişkin önerilerde bulunulmuştur.

Yapılan çalışmalar sonucunda kazanmış üstyapı tabakalarına ait malzemeler ve köpük bitümle hazırlanan soğuk geri kazanım tabakasının bitümlü sıcak karışımdan ziyade daha çok plent miks temel (PMT) ile bitümlü temel (BT) arasında, yapısal sağlamlığa sahip kaliteli bir temel tabakası gibi davranış sergilediği görülmüştür. Wirtgen (2012) tarafından İÇM_{kuru} değerinin 500kPa'yı aşmasının BSK davranışı göstergesi olduğu belirtilmiştir. Çalışmada hiçbir üretime ait İÇM_{kuru} değerinin bu seviyeye ulaşamaması

malzemenin sıcak karışım özelliklerini yansıtamadığının göstergesidir. Ayrıca deneyler sonucunda bulunan tabaka katsayısı değerlerinin PMT için kullanılan tabaka katsayısı değerine yakın çıkması da malzemenin tam olarak bitümlü bir tabaka davranışı sergileyemediğinin başka bir göstergesidir. Bu nedenle bu yöntemle teşkil edilen tabakaların Köpük Bitümle Stabilize Temel Tabakası (KBST) olarak adlandırılmasının uygun olacağı düşünülmektedir.

Yoldan kazınacak geri dönüş malzemesinin büyük bir oranda bitümlü sıcak karışım malzemesi olduğu durumlarda fiziksel sonuçlar, çalışmada da görüldüğü gibi PMT' ye göre oldukça iyi çıkacaktır. Ancak hem kazıma derinliğinin fazla olduğu hem de sathi kaplamalı yolların geri kazanımı düşünüldüğü durumlarda PMT' ye daha yakın sonuçların elde edileceği görülmektedir. Uygulamada her iki durumda da aynı mekanik ve fiziksel özellikler aranacağından üretim yönteminden bağımsız olarak KBST için tabaka katsayısının 0.20 alınması önerilmektedir.

Üretimlerde kullanılmak üzere bitümelerin ideal köpürme karakteristikleri belirlenmiştir. Hangi bitümün hangi sıcaklık ve su yüzdesinde daha iyi köpüreceği yani; malzemenin homojen karışması, sıkıştırılması ve dayanım özelliklerinin geliştirilmesini sağlayacak uygun genleşme oranı ve yarılanma süresi değerleri tespit edilmiştir. Bitümün köpürtülmesinde literatüre paralel olarak bitüm penetrasyon değeri, sıcaklık ve su yüzdesi artışının genleşme oranını artırdığı ve yarılanma süresini azalttığı görülmüştür. Çalışmada, tüm bitüm sınıfları düşünüldüğünde minimum yarılanma süresi 9s ve minimum genleşme oranı olarak 20 kat değeri önerilmektedir.

Bitüm sınıfı ve gradasyona göre değişecek optimum bitüm yüzdesi için net bir öneride bulunmak çok uygun olmamakla birlikte genel olarak çalışmada optimum bitüm değerleri düşük seviyelerde çıktığı için uygulamada %1.8 ile %2.5 arasındaki bitüm yüzdeleri için İÇM kontrolü yapmak yeterli olacaktır.

Aktif filler tipi olarak çimento, uçucu kül ve kirece göre oldukça iyi sonuçlar vermiştir. KBST tabakasında aktif filler olarak % 1 oranında çimentonun kullanılması uygundur.

Çalışmanın sonuçlarına dayanarak KBST' de İÇM_{kuru} için 225kPa, İÇM_{yaş} için 150kPa ve İÇM oranı için de %80 sınır değerleri önerilmektedir.

Çalışma BSK tabakasından kazınmış malzemeler üzerinde yapılan sınırlı sayıdaki deneylerle yürütülmüştür. BSK tabakasının kazınması sırasında PMT tabakasına inilmemiş olup, kazınmış bitüm kaplı malzemenin maksimum dane çapı bu nedenle 25 mm ile sınırlı kalmıştır. BSK kaplamalı yollarda granüler tabakalarda dahil yapılacak kazımlar ile sathi kaplamalı üstyapılarda alttemel tabakaları da dahil yapılacak kazımlarda 25 mm dane çapı üzerindeki malzemelerin ortaya çıkabileceği aşıkardır. Bu nedenle KBST tabakaları için granüler temel ve alttemel tabakalarından çıkacak malzeme çaplarını da karşılayabilecek ve minimum agrega ikamesi ihtiyacı doğuracak şekilde Tablo 4' de verilen gradasyon şartname aralığının belirlenmesi uygun olacaktır.

Tablo 4. KBST gradasyon aralığı

Elek Çapı mm (inç, No.)	% Geçen
37,5 (1 1/2")	100
25 (1")	100 - 90
19 (3/4")	97 - 83
12,5 (1/2")	89 - 70
9,5 (3/8")	81 - 62
4,75 (No.4)	60 - 47
2,00 (No.10)	37 - 27
0,425 (No.40)	17 - 7
0,180 (No.80)	11 - 2
0,075 (No.200)	6 - 0

Elde edilen sonuçlar ışığında KBST' nin BSK' lı projelerde bitümlü temel ihtiyacı olmaksızın üzerine sadece binder ve aşınma tabakası gelecek şekilde kullanımının Karayolları Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi' ne göre R=%70 güvenilirlikteki, T_{8.2} eşdeğer toplam dingil yükü 10 milyondan küçük olan yollarda kullanılmasının, bunun dışındaki diğer yollarda ise hem düzeltme hem de temel tabakası görevini üstlenecek şekilde bitümlü temel tabakası altında kullanılmasının uygun olacağı önerilmektedir. Sathi kaplama projeli tüm yollarda geri dönüşüm ile teşkil edilecek KBST tabakası üzerine doğrudan sathi kaplama yapılması da yeterli olacaktır.

Bu çalışma "Köpük Bitüm ile Yerinde Soğuk ve Tam Derinlikte Geri Kazanılmış Bitümlü Kaplamaların Karayolunda Kullanılabilirliğinin ve Performansının Araştırılması ve Mevzuat Önerisinin Oluşturulması" adlı (KGM-ARGE 2017-1) projesi kapsamında gerçekleştirilmiştir.

KAYNAKLAR

1. AASHTO, 1993. Guide For Design Of Pavement Structures. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington DC.
2. AASHTO T 307-99, 2012. Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington DC.
3. Alam, T.B., Abdelrahman, M., Schram, S.A., 2010. Laboratory Characterization of Recycled Asphalt Pavement As a Base Layer. International Journal of Pavement Engineering, 11(2), 123e131.
4. ARRA, 2001. Asphalt Recycling and Reclaiming Association Basic Manual. 269s, USA.
5. Asphalt Academy, 2009. Technical Guideline: Bitumen Stabilised Materials, TG2 Second edition, ISBN 978-0-7988-5582-2

6. ASTM D6931, 2017 Standard Test Method for Indirect Tensile (IDT) Strength of Asphalt Mixtures, ASTM International. West Conshohocken, PA.
7. Austroads, 2011. Review of Foamed Bitumen Stabilisation Mix Design Methods, Rapor No: AP-T178/11, 37s.
8. Bahia, H.U., Bosscher, P.J., Christensen, J., Hu, Y., 2000. Layer Coefficients for New and Reprocessed Asphaltic Mixes. Rapor No: WI/SPR-04-00
9. Cardone F., Grilli A., Bocci, M., Graziani, A., 2014. Curing and Temperature Sensitivity of Cement–Bitumen Treated Materials, International Journal of Pavement Engineering, 16(10), 868-880
10. Diab, A., Enieb, M., 2018. Investigating Influence of Mineral Filler at Asphalt Mixture and Mastic Scales. International Journal of Pavement Research and Technology, 11, 213–224
11. Dong, F., Yu, X., Liang, X., Ding, G., Wei, J., 2017. Influence of Foaming Water and Aging Process on the Properties of Foamed Asphalt. Construction and Building Materials, 153, 866–874.
12. Fu, P., Jones, D., Harvey, J.T., Bukhari, S.A., 2009. Laboratory Test Methods for Foamed Asphalt Mix Resilient Modulus. Road Materials and Pavement Design, 10:1, 188-212.
13. Fu, P., Jones, D., Harvey, J.T., Halles, F., 2010. An Investigation of the Curing Mechanism of Foamed Asphalt Mixes Based on Micromechanics Principles. Journal of Materials in Civil Engineering, 22(1):29-38
14. Graziani, A., Godenzoni, C., Cardone, F., Bocci, M., 2016. Effect of Curing on the Physical and Mechanical Properties of Cold-Recycled Bituminous Mixtures. Materials & Design, 95, 358–369.
15. Graziani, A., Iafelice, C., Raschia, S., Perraton, D., Carter, A., 2018. A Procedure for Characterizing the Curing Process of Cold Recycled Bitumen Emulsion Mixtures. Construction and Building Materials, 173, 754–762.
16. Güngör, A.G., Sağlık, A., 2009. Mekanistik Ampirik Üstyapı Tasarımında Esneklik Modülünün Şartnamelere Uyarlanması. Erişim https://www.kgm.gov.tr/SiteCollectionDocuments/KGMdocuments/Baskanliklar/BaskanliklarTeknikArastirma/Yeni%20Klas%C3%B6r/Yay%C4%B1mlar/KGM-Esneklik%20Mod%C3%BCl%C3%BC-asfalt_semp_09.pdf
17. He, G.P., Wong, W.G., 2008. Effects of Moisture on Strength and Permanent Deformation of Foamed Asphalt Mix Incorporating RAP Materials. Construction and Building Materials, 22, 30–40
18. Isola, M., Betti, G., Marradi, A., Tebaldi, G., 2013. Evaluation of Cement Treated Mixtures with High Percentage of Reclaimed Asphalt Pavement. Construction and Building Materials, 48, 238–247.
19. Jenkins, K. J., 1999. Mix Design Considerations for Cold and Half-Warm Bituminous Mixes with Emphasis on Foamed Bitumen, University of Stellenbosch, Doktora Tezi, 368s, Stellenbosch, South Africa.
20. Jones, D., Fu, P., Harvey, J.T., Halles, F., 2008. Full Depth Pavement Reclamation with Foamed Asphalt. Rapor no: UCPRC-RR-2008-07, 271s.
21. Kim, Y., Lee, H.D., Asce, M., 2006. Development of Mix Design Procedure for Cold In-Place Recycling with Foamed Asphalt. Journal of Materials in Civil Engineering, 18(1), 116

22. Khosravifar, S., Schwartz, C.W., Goulias, D.G., 2015. Mechanistic Structural Properties of Foamed Asphalt Stabilised Base Materials. *International Journal of Pavement Engineering*, 16:1, 27-38.
23. Romanoschi, S.A., Hossain, M., Heitzman, M., Gisi, A.J., 2003. Foamed Asphalt Stabilized Reclaimed Asphalt Pavement: A Promising Technology for Mid-Western Roads Mid-Continent Transportation Research Symposium, August, Ames, Iowa.
24. Sağlık, A., Güngör, A.G., 2008. Karayolları Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi. 148s, Ankara.
25. Sağlık, A., Demir, B., Güngör, A.G., 2013. Kazınmış Asfalt Kaplamaların Yerinde Soğuk Geri Dönüşüm Olarak Kullanımı KGM Uygulamaları. 6.Ulusal Asfalt Sempozyumu, 27-28 Kasım, Ankara
26. Salta, İ., 2010. Bitümlü Karışımların Geri Dönüşüm Yöntemlerinin İncelenmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 131s, İstanbul.
27. Schwartz, C.W., Khosravifar, S., 2013. Design and Evaluation of Foamed Asphalt Base Materials. Rapor no: SP909B4E, 86s.
28. Seçginli, M., 2007. Karayolu esnek Üstyapılarında Sönmüş Kireç Katkısının Düşük Sıcaklık Çatlama Direncine Etkisi. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 122s, İstanbul.
29. Thompson, M.R., Garcia, L., Carpenter, S.H., 2009. Cold in Place Recycling and Full Depth Recycling with Asphalt Products (CIR&FDRWAP). Rapor no: FHWA-ICT-09-036, 28s.
30. Wirtgen, 2012. Cold Recycling – Wirtgen Cold Recycling Technology, Wirtgen Cold Recycling Manual, 368s, Germany.
31. Yılmaz, M., Kök B.V., Kuloğlu, N., 2011. Karayolu Esnek Üstyapı Malzemelerinin Geri Dönüşümünde Köpük Asfalt Yönteminin Kullanılması. 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), 16-18 May, Elazığ, Turkey.