

**T.C.  
SÜLEYMAN DEMİREL ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KÖPÜK BİTÜM İLE YERİNDE VE SOĞUK GERİ KAZANILMIŞ  
BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARIN KARAYOLUNDA  
KULLANILABİLİRLİĞİ VE PERFORMANSININ ARAŞTIRILMASI**

**Kemal Muhammet ERTEN**

**Danışman  
Prof. Dr. Serdal TERZİ**

**DOKTORA TEZİ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
ISPARTA - 2020**



© 2020 [Kemal Muhammet ERTEN]

## TEZ ONAYI

Kemal Muhammet ERTEN tarafından hazırlanan "Köpük Bitüm ile Yerinde ve Soğuk Geri Kazanılmış Bitümlü Sıcak Karışımların Karayolunda Kullanılabilirliği ve Performansının Araştırılması" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri üyeleri önünde Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda DOKTORA TEZİ olarak başarı ile savunulmuştur.

Danışman **Prof. Dr. Serdal TERZİ**  
Süleyman Demirel Üniversitesi

Jüri Üyesi **Prof. Dr. Mehmet SALTAN**  
Süleyman Demirel Üniversitesi

Jüri Üyesi **Prof. Dr. Hüseyin AKBULUT**  
Afyon Kocatepe Üniversitesi

Jüri Üyesi **Dr. Öğr. Üy. Altan YILMAZ**  
Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi

Jüri Üyesi **Dr. Öğr. Üy. Şebnem KARAHANÇER**  
Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

Enstitü Müdürü **Doç. Dr. Şule Sultan UĞUR**

## **TAAHHÜTNAME**

Bu tezin akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.

**Kemal Muhammet ERTEN**



## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER.....	i
ÖZET .....	iii
ABSTRACT .....	v
TEŞEKKÜR.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Problem Tanımı.....	1
1.2. Amaç .....	2
1.3. Metodoloji.....	2
1.4. Kapsam .....	3
2. KAYNAK ÖZETLERİ.....	5
2.1. Üstyapılarda Meydana Gelen Gerilmeler.....	5
2.2. Geri Dönüşüm ve Sağladığı Kazanımlar .....	7
2.2.1. Köpük bitümle stabilizasyonun avantajları .....	11
2.3. Köpük Bitümle Stabilize Malzeme Bileşenleri.....	12
2.3.1. Köpük bitüm.....	12
2.3.1.1. Genleşme oranı ve yarılanma süresi .....	13
2.3.1.2. Köpük indeksi.....	16
2.3.2. RAP (geri kazanılmış asfalt kaplama) .....	16
2.3.2.1. RAP malzemede filler yüzdesi .....	18
2.3.3. Aktif filler.....	19
2.4. Köpük Bitümle Stabilize Edilmiş Malzeme Yapısı ve HMA (Sıcak Karışım Asfalt) ile Farklılıkları.....	22
2.5. Köpük Bitümle Stabilize Edilmiş Malzeme Ekipmanları, İnşaatı ve Kontrolü .....	25
2.5.1. Uygulamada dikkat edilecek hususlar .....	26
2.6. Kür .....	28
2.7. Dolaylı (İndirekt) Çekme Mukavemeti (İÇM-ITS) Ve Korunmuş İÇM Oranı (TSR) .....	30
2.8. Esneklik Modülü.....	32
2.8.1. Gerilmeye bağlı esneklik modülü tahmini.....	36
2.9. Tabaka (İzafi Mukavemet) Katsayısı (a).....	37
2.10. Sürdürülebilirlik.....	39
2.11. Tez Çalışmasıyla İlgili Dünyada ve Ülkemizde Yapılmış Bazı Çalışmalar .....	40
2.12. Ekonomik ve Çevresel Kazançlar.....	46
3. MATERYAL VE YÖNTEM .....	48
3.1. Numune Temini ve Depolanması .....	48
3.2. Agrega Deneyleri .....	54
3.2.1. Elek analizi.....	54
3.2.2. Los Angeles aşınma deneyi.....	56
3.2.3. Hava tesirlerine karşı dayanım deneyi (donma deneyi) .....	58
3.2.4. Organik madde tayini deneyi.....	60
3.2.5. Metilen mavisi deneyi.....	61

3.2.6. Kaba agregalar için özgül ağırlık ve su emme (absorpsiyon) deneyi .....	63
3.2.7. İnce agregalar için özgül ağırlık ve su emme deneyi.....	63
3.2.8. Plastisite indeksi deneyi.....	65
3.2.9. Modifiye Proktor deneyi.....	66
3.2.10. CBR deneyi .....	67
3.3. RAP İçerisindeki Bitümün Aktif Olup Olmadığının Saptanması.....	68
3.4. Bitüm Deneyleri .....	69
3.4.1. Penetrasyon deneyi.....	69
3.4.2. Yumuşama noktası deneyi.....	70
3.4.3. Parlama noktası deneyi .....	71
3.4.4. Bitüm özgül ağırlık deneyi.....	72
3.5. Bitüm Köpürtme .....	73
3.6. Köpük Bitümle Stabilize Malzeme Üretimi.....	77
3.7. Köpük Bitümle Stabilize Malzemeye Uygulanan Deneyler .....	82
3.7.1. İÇM (dolaylı çekme mukavemeti).....	82
3.7.2. Esneklik modülü .....	85
3.7.3. Odemark (eşdeğer kalınlıklar) yöntemine göre yapılan kabuller ve bulunan gerilmeler .....	88
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	92
4.1. Agregalar Deneylerine İlişkin Bulgular .....	92
4.2. Bitüm Deneylerine İlişkin Bulgular .....	94
4.3. Bitüm Deneylerine İlişkin Bulgular .....	95
4.4. Bitüm Köpürtülmesine İlişkin Bulgular .....	96
4.5. Optimum Bitüm ve Aktif Filler Seçimi.....	103
4.6. Esneklik Modülü Bulguları.....	116
4.7. KBST ve Yeniden Yapım Yöntemleri İçin Ekonomik Analiz.....	125
4.7.1. Yeniden yapım maliyet hesabı .....	126
4.7.2. Köpük bitümle yerinde soğuk geri kazanım maliyet hesabı .....	128
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	134
KAYNAKLAR .....	140
EKLER.....	152
Ek A. Üretimlere Ait Sonuçlar.....	153
Ek B. Üretimlere Ait Esneklik Modülü Sonuçları .....	162
ÖZGEÇMİŞ.....	169

## ÖZET

Doktora Tezi

### KÖPÜK BİTÜM İLE YERİNDE VE SOĞUK GERİ KAZANILMIŞ BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARIN KARAYOLUNDA KULLANILABİLİRLİĞİ VE PERFORMANSININ ARAŞTIRILMASI

Kemal Muhammet ERTEN

Süleyman Demirel Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Serdal TERZİ

Çeşitli nedenlerle ömrünü tamamlamış üstyapılar atık değil, yıpranmışlık durumuna göre belli oranlarda kullanıma değer malzemelerdir. Üstyapılarda farklı geri dönüşüm teknikleri uygulanabilmektedir. Ülkemizde henüz köpük bitümle geri kazanıma yönelik bir şartname olmaması nedeniyle oldukça avantajlı olan bu yöntem uygulanamamaktadır. Son yıllarda yol ağımızdaki büyümenin özellikle önümüzdeki yıllarda üstyapılarda ciddi miktarlarda yenilenme ihtiyacı doğuracağı açıktır. Bu nedenle, malzemenin tamamının kullanılabilme ihtimaliyle köpük bitümle yerinde geri kazanım yöntemi diğer geri kazanım yöntemlerine göre oldukça avantajlıdır. Özellikle malzemenin kazandıktan sonra taşınması ve depo sahalarına bırakılmasının önüne geçilmesiyle ekonomik ve çevresel olarak büyük kazanç sağlanmaktadır. Bu yönüyle tüm dünyanın gündeminde olan sürdürülebilir ulaştırma hedefiyle de örtüşen bir yöntemdir.

Çalışmada; mevcut bir üstyapıdan malzeme alınmış ve köpük bitümle soğuk geri kazanım yöntemi uygulanarak eski üstyapıların bu yöntemle kullanımının uygunluğu deneysel olarak araştırılmıştır.

Öncelikle 50/70, 70/100, 100/150, 160/220 bitüm sınıfları köpürtülerek elde edilen, genleşme oranı ve yarılanma süresi parametreleri için her bitümün optimum su ve optimum köpürme ısısı gibi ideal köpürme şartları belirlenmiştir. Daha sonra bu ideal şartlara göre; çimento, kireç ve uçucu kül olmak üzere 3 farklı aktif filler tipi ve temsili yol şartları için farklı gradasyonlar denenerek tüm bitüm sınıfları için üretimler yapılmış ve bu üretimlerden dolaylı çekme mukavemeti (İÇM) değerlerine göre optimum bitüm miktarları belirlenmiştir.

Sonraki aşamada, optimum bitüm ve uygun filler tipi için üretimler tekrarlanmış ve üretimlerin esneklik modülü değerleri belirlenmiştir. Esneklik modülü değerlerine göre de her üretimin izafi mukavemet katsayısı hesaplanmıştır. Böylece Köpük bitümle stabilize malzemenin üstyapıda hangi görevi üstleneceği

belirlenmeye çalışılmıştır. Ayrıca deneysel sonuçlara göre köpük bitümle stabilize malzemeler için şartname sınırları da önerilmiştir.

Elde edilen sonuçlar, köpük bitümle stabilize malzemenin PMT (Plent mikst temel) ve bitümlü temel arasında bir yapısal sağlamlığa sahip olduğunu göstermiştir. Bu nedenle köpük bitümle stabilize temel olarak isimlendirilmesi uygun görünmektedir.

Deneysel sonuçlar ışığında, köpük bitümle stabilize temel uygulamasının teknik, çevresel ve ekonomik olarak oldukça avantajlı ve uygulanabilir bir geri kazanım yöntemi olduğu sonucuna varılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Köpük bitüm, dolaylı çekme mukavemeti, esneklik modülü, geri kazanım.

**2020, 169 sayfa**





## **ABSTRACT**

**Ph.D. Thesis**

### **INVESTIGATION OF THE USAGE AND PERFORMANCE OF HOT MIXTURES WHICH COLD IN-PLACE RECYCLING WITH FOAM BITUMEN**

**Kemal Muhammet ERTEN**

**Süleyman Demirel University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Civil Engineering**

**Supervisor: Prof. Dr. Serdal TERZİ**

For various reasons expired pavements are not waste but materials in the old pavements that are worthy of use in certain proportions depending on the wear condition. Different recycling techniques can be applied in pavements. This method, which is very advantageous, cannot be applied since there is no specification for foam bitumen recovery in our country yet. It is clear that the growth in our road network in recent years will cause serious renewal in pavements especially in the coming years. Therefore, the in situ recovery method with foam bitumen is highly advantageous over other recovery methods in case all of the material can be used. Especially provides great economic and environmental benefits for the material to be transported and stored in the storage area after the excavation.

In this respect, it is a method that coincides with the sustainable transportation target which is on the agenda of the whole world.

In this study; materials were taken from an existing pavement and the suitability of using old pavements with this method was investigated experimentally by applying cold recycling method with foam bitumen.

Firstly, the ideal foaming conditions such as optimum water and optimum foaming temperature of each bitumen were determined for the expansion ratio and half time parameters obtained by foaming 50/70, 70/100, 100/150, 160/220 bitumen classes. Then according to these ideal conditions; 3 different active filler types as cement, lime and fly ash, and different aggregate gradations for representative road conditions were tested. Productions were made for all bitumen classes and optimum bitumen quantities were determined according to indirect tensile strength (ITS) values.

In the next stage, productions were repeated for optimum bitumen and suitable filler type and resilient modulus values of the productions were found. The relative strength coefficient of each production was calculated according to the resilient modulus values. Thus, it has been tried to determine which task of foam bitumen stabilized material will assume in pavement. Also, according to

experimental results, specification limits for foam bitumen stabilized materials have been proposed.

The results showed that the foam bitumen stabilized material had a structural strength between PMT (Plant mix base) and bituminous base. Therefore, it seems appropriate to name that foam bitumen stabilized base.

In the light of the experimental results, it has been concluded that the application of foam bitumen stabilized base is a technically, environmentally and economically very advantageous and applicable recycling method.

**Keywords:** Foam bitumen, indirect tensile strength, resilient modulus, recycling

**2020, 169 pages**



## TEŞEKKÜR

Doktora çalışmam boyunca engin bilgi birikimi ve tecrübesiyle bana yol gösteren ve hep güleryüzlü ve anlayışlı tavrıyla beni motive eden saygıdeğer tez danışmanım Prof. Dr. Serdal TERZİ'ye, üzerimde çok emeği olan değerli hocam Prof. Dr. Mehmet SALTAN'a, tez izleme komisyonu üyesi hocam Prof. Dr. Hüseyin AKBULUT'a değerli katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Manevi desteklerini benden esirgemeyen Dazkırı Meslek Yüksekokulu çalışma arkadaşlarıma ve tez çalışmamda her türlü kolaylığı sağlayan değerli Yüksekokul müdürlerime teşekkürü bir borç bilirim.

Bugüne kadar her konuda desteklerini ve yardımlarını benden esirgemeyen, bugünlere ulaşmamı sağlayan annem Ayşe ERTEN ve babam Ömer Lütfi ERTEN'e, zorlu tez çalışmasında mutluluk ve enerji kaynağım olan çocuklarım Mustafa ERTEN ve Ömer Burak ERTEN'e ve bu çalışmanın tamamlanmasında her açıdan en büyük destekçim olan güleryüzlü hayat arkadaşım eşim Gül ERTEN'e teşekkür ederim.

Bu çalışma, 4939-D1-17 numaralı Süleyman Demirel Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri tarafından ve KGM-ARGE/2017-1 numaralı proje ile Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından desteklenmiştir. Deneysel çalışmalar Karayolları 4. Bölge Müdürlüğü ve Karayolları Genel Müdürlüğü Ar-Ge Daire Başkanlığında gerçekleştirilmiştir.

Kemal Muhammet ERTEN  
ISPARTA, 2020

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Temsili teker yüklemesi ve KBST tabakasındaki örnek bir numune üzerinde oluşan gerilmeler .....	6
Şekil 2.2. Köpük bitüm üretim prosesi şematik gösterimi .....	12
Şekil 2.3. Orijinal bitümün maksimum hacme ulaşma ve yarı hacme inme süreci .....	13
Şekil 2.4. Genleşme oranı - yarılanma süresi arasındaki ilişki.....	13
Şekil 2.5. Köpük bitümle stabilize malzemelerin mikroyapısı.....	23
Şekil 2.6. Köpük asfalt makinesinin çalışma prensibi .....	25
Şekil 2.7. KBSM'nin küre dayalı hacimsel değişimi .....	29
Şekil 2.8. KBSM kür süreci.....	30
Şekil 2.9. Üstyapıda tekrarlı yükleme altında meydana gelen birim deformasyonlar .....	33
Şekil 2.10. Her bir yük tekrarı için oluşan birim deformasyonlar .....	33
Şekil 2.11. Üç eksenli deney hücresi.....	35
Şekil 2.12. Esneklik modülü deneyi sırasında oluşan gerilme durumu.....	35
Şekil 2.13. Yarım sinüs dalgası şeklinde tekrarlı yükleme ve dinlenme periyodu.....	36
Şekil 2.14. Esneklik modülü-toplam gerilme ilişkisi.....	37
Şekil 3.1. Kızılcahamam-Gerede köpük bitüm deneme yolundan alınan karot numuneleri .....	49
Şekil 3.2. Deney numunesi için kazınan yol kesimi .....	51
Şekil 3.3. Elek arabalarında depolanan kazınmış BSK (RAP) numuneleri .....	53
Şekil 3.4. Asfalt analizatörü ve analizatörden çıkan ayrılmış agrega ve filler ....	53
Şekil 3.5. Bitümden ayrıştırılmış kazınmış BSK.....	54
Şekil 3.6. Asfalt analizatörü ile ayrıştırılmış eski bitüm .....	54
Şekil 3.7. Destilasyon cihazı ve RAP'den elde edilen bitüm .....	54
Şekil 3.8. Deneylede kullanılan çaplarına göre sıralanmış elek seti .....	56
Şekil 3.9. Deneylede kullanılan otomatik elek makinesi .....	56
Şekil 3.10. Elek analizi için çeyrekleme (dörtleme) yöntemi ve bölgeçle numune alınması .....	57
Şekil 3.11. Malzemenin elenmesi.....	57
Şekil 3.12. Los Angeles aşındırma cihazı .....	58
Şekil 3.13. Deneyde kullanılan 45-49 mm çapında ve toplam 4690-4890 g ağırlığındaki bilyeler .....	58
Şekil 3.14. Deney öncesi tambur içindeki malzeme ve bilyeler .....	59
Şekil 3.15. Bitümden ayrıştırılmış agregaların hava tesirlerine dayanıklılık testi için yıkanması .....	60
Şekil 3.16. Tel sepetteki agregaların magnezyum sülfat çözeltisine koyulması.....	60
Şekil 3.17. Sodyum Hidroksit çözeltisinde bekletilmiş RAP numunesi .....	61
Şekil 3.18. Sodyum Hidroksit çözeltisinde bekletilmiş bitümü ayrıştırılmış RAP numunesi.....	62
Şekil 3.19. Metilen mavisi çözeltisi ilavesi ve karıştırma işlemi.....	63
Şekil 3.20. Metilen mavisi deney sonu.....	63
Şekil 3.21. Kuru yüzey suya doymun hale getirilen agregalar .....	64
Şekil 3.22. Piknometre içerisinde kuru numune .....	65

Şekil 3.23. No.4 elek altı santrifüjden çıkmış malzeme.....	65
Şekil 3.24. Plastik limit deneyi için hazırlanan numune.....	66
Şekil 3.25. Numunenin modifiye proktor ile sıkıştırılması .....	67
Şekil 3.26. Sıkışmış tabaka üzerine malzeme eklenerek yeni tabakanın sıkıştırılması için kalıbın cihaza yerleştirilmesi.....	67
Şekil 3.27. Suda bekletilen CBR numuneleri .....	68
Şekil 3.28. Kırılan CBR numunesi .....	68
Şekil 3.29. RAP içerisindeki bitümün aktifliğinin kontrolü için briket hazırlanması.....	69
Şekil 3.30. Hazırlanan briketin üstten görünüşü.....	69
Şekil 3.31. Su banyosunda bekleyen penetrasyon deney numuneleri.....	70
Şekil 3.32. Bitüm penetrasyon deneyi .....	70
Şekil 3.33. Bitümün yüzüklere yerleştirilmesi .....	71
Şekil 3.34. Yüzüklerin cihaza yerleştirilmesi .....	71
Şekil 3.35. Bilyelerin tabana değmesi ve deneyin sonlanması anı .....	72
Şekil 3.36. Parlama noktası deneyi.....	72
Şekil 3.37. Piknometreye bitüm koyulması .....	73
Şekil 3.38. Soğuyan bitümün üzerine saf su koyulması .....	74
Şekil 3.39. Deney numunelerinin su banyosunda bekletilmesi.....	74
Şekil 3.40. Laboratuvar KBSM plenti .....	74
Şekil 3.41. Yükseklik ölçümü için 500 g bitüm tartılması.....	75
Şekil 3.42. Bitüm ölçüm kovaları .....	76
Şekil 3.43. Bitüm orijinal yükseklik ölçümü .....	76
Şekil 3.44. Laboratuvar KBSM plenti bitüm haznesi.....	77
Şekil 3.45. Köpürmüş bitümün söndükten sonraki hali ve kova dışına sıçramış köpürmüş haldeki bitüm.....	77
Şekil 3.46. Karıştırma haznesi bıçaklarına yapışan ve karışıma katılmamış olan bitüm .....	78
Şekil 3.47. Üretim için malzemelerin karıştırma haznesine koyulması .....	82
Şekil 3.48. Malzemelerin kuru karışım ve su-bitüm ilavesi sonrası karışmış halleri.....	82
Şekil 3.49. Briket hazırlanışı.....	83
Şekil 3.50. Briket boyut ölçümü .....	84
Şekil 3.51. Üretilen köpük bitüm briketleri .....	84
Şekil 3.52. Numunelerin 25°C suda şartlandırılması.....	84
Şekil 3.53. İÇM deneyi.....	85
Şekil 3.54. Marshall stabilite deneyi.....	85
Şekil 3.55. Titreşimli tokmakla numune sıkıştırılması .....	86
Şekil 3.56. Numunelerin etüvde bekletilmesi.....	87
Şekil 3.57. Islak numunelerin etüv sonrası su içerisinde şartlandırılması .....	87
Şekil 3.58. KBSM numunesine Esneklik Modülü deneyi yapılması.....	88
Şekil 3.59. Temsili teker yüklemesi, tabaka kalınlık ve esneklik modülleri .....	90
Şekil 4.1. Kazınmış malzeme içerisinde iri agrega gibi görünen ancak elle kırılabilen ve içerisinde sadece ince agregalar barındıran bitüm topağı.....	94
Şekil 4.2. 50/70 bitümün farklı sıcaklık ve su değerlerindeki genleşme oranı ve yarılanma süresi grafiği .....	98
Şekil 4.3. 70/100 bitümün farklı sıcaklık ve su değerlerindeki genleşme oranı ve yarılanma süresi grafiği .....	99

Şekil 4.4. 100/150 bitümün farklı sıcaklık ve su değerlerindeki genleşme oranı ve yarılanma süresi grafiği .....	100
Şekil 4.5. 160/220 bitümün farklı sıcaklık ve su değerlerindeki genleşme oranı ve yarılanma süresi grafiği .....	101
Şekil 4.6. Köpürme için gereken optimum su miktarının belirlenmesi.....	102
Şekil 4.7. BSK tabakaları için tabaka katsayısı seçim abağı.....	109
Şekil 4.8. Solda Şekil a'da görülen %3,1 bitümle üretilmiş KBSM ve sağda Şekil b'de %2,2 bitümle üretilmiş KBSM .....	111
Şekil 4.9. İN gradasyonu çimentolu üretim için optimum bitüm yüzdesi seçim grafiği.....	112
Şekil 4.10. KİS serisi için bitüm yüzdesi - Dp değişimi.....	112
Şekil 4.11. Aktif filler tipinin İÇM değerlerine etkisi.....	114
Şekil 4.12. Kür sonrası 7 gün suda bekletilen briketlerin İÇM değerlerinin aynı üretilmeye ait İÇM <sub>yaş</sub> değerleriyle kıyaslanması .....	116
Şekil 4.13. B2,5KN70Ç1-K numunesi için esneklik modülü toplam gerilme bağıntısı .....	120
Şekil 4.14. Çizelge 4.17'de verilen üretimler için MR ve İÇM değerlerinin kıyaslanması.....	120
Şekil 4.15. Çizelge 4.17'de verilen üretimler için tabaka katsayılarının kıyaslanması.....	121
Şekil 4.16. Islak ve kuru üretimler için esneklik modülü değerlerinin kıyaslanması.....	122
Şekil 4.17. Önerilen gradasyonun İK gradasyonu, KTŞ PMT ve bitümlü temel gradasyonları ile kıyaslanması .....	124
Şekil 5.1. Köpük bitümle stabilize malzeme .....	137
Şekil 5.2. Köpük bitümle yerinde geri dönüşüm için önerilen üstyapı kesiti.....	139

## ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1. Bitümlü ve çimentolu stabilizasyon katkılarının kıyaslanması.....	10
Çizelge 2.2. Literatürde önerilen en küçük genleşme oranı ve yarılanma süreleri .....	15
Çizelge 2.3. Geri kazanılmış bitümün aktiflik değerlendirilmesi .....	18
Çizelge 2.4. Dizayna bağlı olarak KBST numunelerinin muhtemel özellikleri.....	27
Çizelge 2.5. BSM için önerilen yapısal tabaka katsayıları .....	39
Çizelge 2.6. Köpük asfaltla soğuk geri kazanım karışımlarının önerilen yapısı..	45
Çizelge 2.7. Kilometre başına enerji tüketimi (GJ).....	47
Çizelge 3.1. Deneilerin gerçekleştirileceği RAP-Agrega karışımlarına ait gradasyon tipleri.....	49
Çizelge 3.2. Wirtgen (2012) tarafından önerilen KBSM için ideal gradasyon aralığı .....	49
Çizelge 3.3. Agregada maksimum boyutuna göre deney numunesi miktarı .....	54
Çizelge 3.4. Malzemenin üretim öncesi sahip olduğu su muhtevası nedeniyle yapılan, gerçek su muhtevası için düzeltme hesabı.....	78
Çizelge 3.5. Temsili bir üretim için karışım suyu hesabı.....	79
Çizelge 3.6. B2,2İK50Ç1 kodlu üretim için karışım miktarları .....	81
Çizelge 4.1. Karot elek analizi sonuçlarının KBSM deneme yolu öncesi yolun gradasyonu ile kıyaslanması.....	92
Çizelge 4.2. Kazınmış BSK'nın bitümlü ve bitümsüz elek analizi sonuçları .....	93
Çizelge 4.3. Kazınmış BSK agregası bitümlü ve bitümsüz fiziksel deney sonuçları .....	94
Çizelge 4.4. Bitümlere uygulanan deney sonuçları.....	95
Çizelge 4.5. BSK trimmer bitüm aktifliği için 70°C'de hazırlanan 3 brikeye ait İÇMyaş değerleri.....	95
Çizelge 4.6. BSK trimmer bitüm aktifliği için 70°C'de hazırlanan 3 brikeye ait İÇM <sub>kuru</sub> (kalıptan çıkar çıkmaz) değerleri .....	95
Çizelge 4.7. 50/70 sınıfı bitüm genleşme oranı ve yarılanma süresi sonuçları...	96
Çizelge 4.8. 70/100 sınıfı bitüm genleşme oranı ve yarılanma süresi sonuçları .....	97
Çizelge 4.9. 100/150 sınıfı bitüm genleşme oranı ve yarılanma süresi sonuçları .....	98
Çizelge 4.10. 160/220 sınıfı bitüm genleşme oranı ve yarılanma süresi sonuçları.....	99
Çizelge 4.11. Örnek İÇM formu.....	103
Çizelge 4.12. Üretimler ait formlardaki verilere göre oluşturulan tüm üretimlere ait özet çizelge .....	105
Çizelge 4.13. Aktif filler tipinin İÇM değerlerine etkisi .....	113
Çizelge 4.14. Farklı koşullarda bekletilmiş aynı üretim numuneleri için İÇM değerleri .....	114
Çizelge 4.15. B2,5İK70 üretimlerine ait filler tipi optimum su yüzdesi değişimi .....	115
Çizelge 4.16. B2,5KN70Ç1-K numunesi için esneklik modülü çizelgesi (her 100 döngünün son 5 değeri) .....	115
Çizelge 4.17. Kuru numune deney sonuçlarına göre üretimlere ait çizelge .....	118
Çizelge 4.18. Deneysel sonuçlara göre çalışmada önerilen sınır değerler .....	120

Çizelge 4.19. Kuru ve ıslak tüm numunelere ait esneklik modülü değerleri.....	120
Çizelge 4.20. Deneysel sonuçlara göre KBST için önerilen gradasyon .....	122
Çizelge A.1. Tüm üretimler için İÇM briketlerine ait deneysel veriler.....	153
Çizelge B.1. B2,5İK70Ç1-K numunesi için esneklik modülü çizelgesi (her 100 döngünün son 5 değeri).....	162
Çizelge B.2. B2,2İK50Ç1-K numunesi için esneklik modülü çizelgesi (her 100 döngünün son 5 değeri).....	162
Çizelge B.3. B1,9İ70Ç1-K numunesi için esneklik modülü çizelgesi (her 100 döngünün son 5 değeri).....	163
Çizelge B.4. B1,9İK160Ç1-K numunesi için esneklik modülü çizelgesi (her 100 döngünün son 5 değeri).....	164
Çizelge B.5. B1,9KİS70Ç1-K numunesi için esneklik modülü çizelgesi (her 100 döngünün son 5 değeri).....	165
Çizelge B.6. B2,2İN70Ç1-K numunesi için esneklik modülü çizelgesi (her 100 döngünün son 5 değeri).....	165
Çizelge B.7. B1,9W70Ç1-K numunesi için esneklik modülü çizelgesi (her 100 döngünün son 5 değeri).....	166
Çizelge B.8. B1,9İK100Ç1-K numunesi için esneklik modülü çizelgesi (her 100 döngünün son 5 değeri).....	167
Çizelge B.9. B2,5İK70K1UK1-K numunesi için esneklik modülü çizelgesi (her 100 döngünün son 5 değeri).....	167



## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

a	Tabaka (izafi mukavemet) katsayısı
a	Teker yarıçapı
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ARGE	Araştırma Geliştirme
ARRA	Asfalt geri dönüşüm ve rehabilitasyon birliği
ASMUD	Türkiye Asfalt Müteahhitleri Derneği
ASTM	American Society for Testing and Materials
BSM	Bitümlü stabilize malzeme
BTB	Bitümlü stabilize edilmiş temel
CBTM	Çimento ve bitümlü iyileştirilmiş malzeme
CBR	Kaliforniya taşıma oranı
CH <sub>4</sub>	Metan
CIR	Yerinde soğuk geri kazanım
cm	Santimetre
cm <sup>2</sup>	Santimetre kare
cm <sup>3</sup>	Santimetre küp
CO	Karbonmonoksit
CO <sub>2</sub>	Karbon dioksit
CRM	Soğuk geri kazanılmış malzeme
Ç	Çimento
d	Numunenin çapı
D	Ölçüm kovanı çapı
dk	Dakika
Dp	Hacim özgül ağırlık
E <sub>AC</sub>	Psi cinsinden asfalt betonu elastisite modülü
E <sub>BS</sub>	Psi cinsinden bitümlü ve granüler temel tabakaları elastisite modülü
ER <sub>Max</sub>	Maksimum Genleşme Oranı
ESAL	Eşdeğer standart dingil yükü
ESB	Bitüm emülsiyonu ile stabilize edilmiş temel
ESDY	Eşdeğer standart dingil yükü
E <sub>SB</sub>	Alt temel tabakası elastisite modülü
E <sub>1</sub>	Üstyapıda birinci katmanın elastik modülü
f	Tabakalı elastik teoriye daha iyi yaklaşım sağlayan düzeltme faktörü
FA	Köpük asfalt
FACRM	Köpük asfalt soğuk geri dönüşüm karışımları
FASB	Köpük asfaltla stabilize temel
FASM	Köpük asfaltla stabilize malzeme
FBB	Köpük bitümlü temel
FDR	Tam derinlikten geri kazanım
FDR-FA	Köpük bitümlü tam derinlikten geri kazanım
FFAC	Kırılmış yüzeyin asfaltla sarılı alanı
FHWA	Federal Highway Administration
FI	Köpük indeksi
FTIR	Fourier transforms infrared spectroscopy

FWD	Düşen ağırlık deflektometre
g	Gram
GAB	Granüler agrega temel
Gb	Bitüm özgül ağırlığı
GHG	Sera gazı
GJ	Gigajoule
h	Numunenin ortalama yüksekliği
h <sub>e</sub>	Eşdeğer kalınlık
HC	Hidrokarbonlar
h <sub>1</sub>	Üstyapıda birinci katmanın kalınlığı
HMA	Sıcak karışım asfalt
HL	Yarılanma süresi (yarı ömür)
İÇM (ITS)	Dolaylı (indirek) çekme mukavemeti
İÇM <sub>kuru</sub>	Kuru dolaylı çekme mukavemeti
İÇM <sub>yaş</sub>	Yaş (ıslak) dolaylı çekme mukavemeti
K	Kireç
K <sub>1</sub>	Bulk strese karşılık gelen esneklik modülü
K <sub>2</sub>	Eğilim çizgisi eğimi
KBSM	Köpük bitümle stabilize malzeme
KBST	Köpük bitümle stabilize temel
Kg	Kilogram
KGM	Karayolları Genel Müdürlüğü
Km	Kilometre
kN	Kilonewton
kPa	Kilopaskal
ksi	A kip per square inch
KTŞ	Karayolu teknik şartnamesi
Ic	Boussinesq gerilme katsayısı
lt	Litre
mm	Milimetre
Mb	Bitüm miktarı
MC	Orta hızda kür olan sıvı petrol asfaltı
Mç	Çimento miktarı
MESA	standart dingil milyon eşdeğeri
MgSO <sub>4</sub>	Magnezyum sülfat
Mj	Megajoule
MM	Metilen mavisi değeri
MPa	Megapaskal
M <sub>R</sub>	Esneklik modülü
M <sub>su</sub>	Toplam su miktarı
m <sup>2</sup>	Metrekare
m <sup>3</sup>	Metreküp
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Sodyum sülfat
NO <sub>x</sub>	Nitrik oksit
N <sub>2</sub> O	Nitröz oksit
P	Uygulanan maksimum yük
PI	Plastisite indeksi
PMT	Plent-miks temel
Psi	Pounds per square inch

r	Yarıçap
RA	Geri kazanılmış asfalt
RAP	Geri kazanılmış asfalt kaplama
RC	Hızlı kür olan sıvı petrol asfaltı
s	Saniye
Sa	Saat
SC	Yavaş kür olan sıvı petrol asfaltı
SDÜ	Süleyman Demirel Üniversitesi
SN	Üstyapı sayısı
SO <sub>2</sub>	Kükürt dioksit
t	Ton
TL	Türk lirası
TMA	Taş mastik asfalt
TS	Türk standartları
TSR	Korunmuş İÇM (gerilme) oranı
TxRM	Üç eksenli esneklik modülü
UK	Uçucu Kül
V	Hacim
VM	Karışıma ilave edilen metilen boya çözeltisi
Z <sub>e</sub>	KBST cinsinden üstyapı kalınlığı
ZSV	Sıfır kesme viskozitesi
°C	Santigrat derece
ε <sub>r</sub>	Esnek birim şekil değiştirme
σ <sub>0</sub>	Lastik basıncı
σ <sub>d</sub>	Deviator gerilme
σ <sub>r</sub> , σ <sub>t</sub>	Z <sub>e</sub> derinliğinde oluşan yatay (çevresel) gerilmeler
σ <sub>z</sub>	Z <sub>e</sub> derinliğinde oluşan düşey gerilme
σ <sub>1</sub>	Düşey gerilme
σ <sub>2</sub>	Asal gerilme
σ <sub>3</sub>	Yatay (çevresel) gerilme
μ	Poisson oranı
P <sub>0</sub>	Teker yükü
θ	Bulk (Toplam-Hacimsel-Toplu) gerilme (stress)
%	Yüzde

# 1. GİRİŞ

## 1.1. Problem Tanımı

İnşaat sektörü; yüksek miktarlarda enerji ve hammadde tüketimi ve olumsuz çevresel etkileri nedeniyle doğa tahribatına neden olan en önemli sektörlerden birisidir. En yaygın inşaat faaliyetlerinden olan yol yapımı da; agrega, bitüm gibi malzemelerin elde edilmesi ve yolun inşası olarak iki farklı aşamada çevresel etkileri olan bir faaliyettir.

Çevresel etkilere ilave olarak yol yapım çalışmaları için Sangiorgi vd. (2017)'de belirtildiği gibi; doğal agrega kaynaklarının sınırlı olması, malzeme fiyatlarında sürekli artış ve kazınmış üstyapı atıklarının bertarafı ile ilgili maliyetler gibi problemlerle karşılaşmaktadır.

Karayolu üstyapısında; ısı, nem, yük vb. nedenlerle meydana gelen bozulmalar nedeniyle bitümlü sıcak karışımlar iyi ihtimalle proje ömürleri olan 20 yıllık sürede kullanım ömürlerini tamamlamaktadır ve yeniden yapım ihtiyacı doğmaktadır.

Artan nüfus, globalleşen dünya ve bunlara bağlı olarak artan yol talebi, sınırlı kaynaklar, maliyet ve çevresel etkiler (hem üretim hem de depo alanları açısından) nedenleriyle yeniden yapım yerine üstyapı geri dönüşüm yöntemleri ile ilgili çalışmalar tüm dünyada hız kazanmıştır.

Geri dönüşümün (recycling) amacı, ilk amacına hizmet ederek kullanım ömrünü tamamlamış olan yol üstyapısında kullanılmış kaplama malzemesinin bazı işlemlerden sonra yeniden değerlendirilmesidir (Salta, 2010). Ömrünü tamamlamış bir üstyapıdaki bitümün ve agreganın hala kullanımını destekleyecek değerde özellikler barındırması, bu malzemelerin ilk temin masraflarının (özellikle bitümde dışa bağımlılık açısından) oldukça yüksek olması ve üretimleri esnasında olumsuz çevresel etkiler yaratmaları ülkemizde asfalt geri dönüşümünün kaçınılmaz olduğunu göstermektedir.

## **1.2. Amaç**

Üstyapılarda; plentte geri kazanım-yerinde geri kazanım, sıcak geri kazanım-soğuk geri kazanım, tam derinlikten geri kazanım-kısmi derinlikten geri kazanım gibi ana başlıklarda farklı yöntemler uygulanabilmekle birlikte, tez çalışmasında Köpük Bitümle Yerinde Soğuk Geri Kazanım yönteminin seçilmesinin nedenleri; malzemenin tamamının kullanılabilme ihtimali, soğuk işlem olması nedeniyle sağladığı avantajları ve ülkemizde henüz bir şartnamesinin olmaması olarak sıralanabilir.

Yapılan çalışma ile; yoldan kazınabilecek farklı gradasyonlara sahip malzemeler, üretimde kullanılacak farklı aktif filler malzemeleri, farklı bitüm yüzdeleri ve farklı kür koşulları için köpük bitümle stabilize malzemenin nasıl performans göstereceği değerlendirilmeye çalışılmıştır.

Köpük bitümle stabilize malzeme üretiminde hem bitüm hem de hidrolik bağlayıcı kullanılmasına ve literatür çalışmalarına bağlı olarak, granüler temele göre daha yüksek stabiliteye sahip bir temel tabakası ortaya çıkacağı öngörülmüştür. Bu tabakanın üstyapıda nasıl konumlanacağı belirlenmeye çalışılmıştır.

## **1.3. Metodoloji**

Köpük bitümle stabilize malzemeyi değerlendirmek için literatürde net bir prosedür olmamakla birlikte malzeme yapısı nedeniyle nem hassasiyetinin değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu nedenle köpük bitümle stabilizasyon yapılabilmesi için tasarım yöntemi olarak Wirtgen (2012) tarafından önerilen yöntemden yararlanılmıştır. Optimum bitüm yüzdesi, aktif filler tipi ve nem hassasiyeti değerlendirme kriterleri olarak yine Wirtgen (2012) tarafından önerilen ve literatürde sık kullanılan dolaylı çekme mukavemeti (İÇM) ve buna bağlı olarak korunmuş gerilme oranı (TSR) değerleri kullanılmıştır.

Deneysel olarak yürütülen çalışmalarda  $İÇM_{kuru}$  ve  $İÇM_{yaş}$  değerlerinin belirlenmesinin yanı sıra malzemenin dinamik (trafik) yükler altında elastik deformasyon direncini belirlemek için AASHTO T 307-99 (2012) prosedürüne uygun olarak dinamik üç eksenli cihazı ile farklı gerilme değerleri için esneklik modülleri elde edilmiştir. Odemark yöntemi yardımıyla üstyapı eşdeğer tek bir kalınlığa dönüştürülmüş ve Boussinesq denklemleriyle köpük bitümle stabilize temel tabakasında oluşacak gerilmeler hesaplanmıştır. Bu gerilme değeri, deneysel olarak elde edilmiş olan esneklik modülü değerlerine göre çıkarılan  $k-\theta$  modelinde kullanılarak, çalışmadaki farklı üretimlere ilişkin esneklik modülü değerleri hesaplanmıştır. Üretimlerin esneklik modülü değerlerine göre izafi mukavemet katsayıları belirlenmiştir.

#### **1.4. Kapsam**

Tez çalışmasında kullanımda olan bir üstyapıdan malzeme temin edilmiş olup malzemenin köpük bitümle stabilize edilmesi ile hazırlanan numuneler; Dolaylı Çekme Mukavemeti, Esneklik Modülü ve buna bağlı olarak İzafi Mukavemet Katsayısı (Tabaka Katsayısı), açısından değerlendirilmiştir.

Gerekli performans deneyleri için öncelikle farklı penetrasyon dereceli bitümlerin Genişleme Oranı ve Yarılanma Süresi gibi karakteristik köpürme özellikleri vasıtası ile üretim için optimum bitüm sıcaklığı ve köpürme suyu değerleri belirlenmiştir. Gerçek hayatta trafik altındaki farklı yollardan gelebilecek farklı malzeme gradasyonları için üretimlerde farklı gradasyon tipleri simule edilmeye çalışılmıştır. Farklı bitüm yüzdeleri (%1,9-2,2-2,5-2,8 ve 3,1), farklı aktif filler tipleri (çimento, kireç ve uçucu kül) ve farklı bitüm sınıfları (50/70-70/100-100/150-160/220) için; ideal filler tipi ve optimum bitüm yüzdesi kontrolü,  $İÇM$  ve TSR parametreleri ile yapılmıştır. Aktif filler oranı literatür bilgisine dayalı olarak %1 seçilmiştir. Daha düşük yüzdelerin etkin olmayacağı daha yüksek yüzdelerin ise çatlamalara neden olacağı düşünülmüştür.

Sonraki aşamada serilerin optimum değerleri için tekrar numuneler hazırlanıp, dinamik yüklemeler ile esneklik modülü değerleri belirlenmiştir. Deneysel sonuçlara göre, köpük bitümle stabilize temel için ideal bir gradasyon aralığı ve tabaka katsayısı değeri önerilmiştir. Önerilen tabaka katsayı değeri için ekonomik analiz yapılarak köpük bitümle yerinde ve soğuk geri kazanım yönteminin yeniden yapıma göre ekonomik avantajı ortaya koyulmuştur..

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda ortaya çıkan geri kazanılmış ürün sıcak karışımdan ziyade kaliteli bir temel katmanı gibi davranmıştır. Bu nedenle köpük bitümle stabilize temel olarak isimlendirilmiştir. Tez çalışmasında literatür bilgisi dışında; köpük asfalt, köpürtülmüş asfalt, terimleri yerine köpük bitümle stabilize malzeme (KBSM) ve köpük bitümle stabilize temel (KBST) terimleri kullanılmıştır.

Tez çalışması ile birlikte koordine olarak 4939-D1-17 numaralı SDÜ (Süleyman Demirel Üniversitesi) bilimsel araştırma projesi ve KGM-ARGE/2017-1 KGM (Karayolları Genel Müdürlüğü) projesi yürütülmüştür. Tüm deneysel çalışmalar, Karayolları 4. Bölge Müdürlüğü ve Karayolları Genel Müdürlüğünde yürütülmüş olup elde edilen veriler ve analiz sonuçları Karayolları tarafından hazırlanması düşünülen Köpük Bitümle Stabilize Temel Şartnamesi için Karayolları ile de paylaşılmıştır.

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

### 2.1. Üstyapılarda Meydana Gelen Gerilmeler

Yüklemeye maruz bir elemana etki eden gerilmeler, birbirine dik doğrultuda bulunan üç düzleme etki eden normal gerilmelerin bir bileşeni olarak ifade edilebilir. Bu gerilmeler asal gerilmeler olarak adlandırılırlar. Kaplama üzerinde hareket eden taşıtlar, üstyapıda farklı büyüklüklerde düşey, yatay ve kesme gerilmeleri oluştururlar. Böylece asal gerilme düzlemi sürekli değişir. Tekerleğin tam altındaki bir noktada kesme gerilmesi sıfırdır ve elemana, yalnızca yatay ve düşey gerilmelerin etkisi vardır (Uz, 2012).

Maksimum gerilmenin tekerlek merkezi altında olduğu kabul edilir (Walubita ve Van de Ven, 2000). Malzeme yüzeye ne kadar yakınsa, tekerlek yükünün neden olduğu gerilme daha büyük olacaktır (Roadex, 2019).

Boussinesq tarafından önerilen yöntem kullanılarak, nokta yüküne maruz kalan bir tabakada meydana gelen gerilmeler, birim şekil değiştirmeler ve defleksiyonlar kolayca belirlenebilmektedir. Tepkiler hesaplanırken yöntem; kaplamanın homojen, izotropik katmanlardan oluştuğunu ve yarı sonsuz elastik uzayda bulunduğunu varsaymaktadır. Teoride dikkate alınan nokta yükü, bir tekerleğin gerçek yükleme durumunu yansıtmaz, bu nedenle bu konsantrasyon nokta yükü dairesel yüklü bir alana entegre edilir (Öcal, 2014).

Boussinesq'in denklemleri yalnızca tek izotropik ve homojen katman için geçerli olduğundan, teorinin kendisi pratik katmanlı yapılarda simülasyon yapmak için yetersizdir. Dolayısıyla, farklı malzemelerden oluşan çok katmanlı kaplama yapıları için geçerli olan bir yöntem ihtiyacı doğmuştur (Öcal, 2014). Odemark, farklı kalınlıklarda katmanlar ve elastik modüller içeren çok katmanlı yapıları, tüm katmanların aynı modüllere ancak farklı kalınlıklara sahip olduğu eşdeğer bir yapıya dönüşmesini sağlayan eşdeğer kalınlıkta bir yöntem geliştirdi. Bu şekilde sistem, çok katmanlı üstyapıya uygulanan yükleme altında gerilmeleri hesaplamak için Boussinesq'in denklemlerinin uygulanması için uygun hale



gelir (Saltan, 1999; Öcal, 2014). Her katmanın eşdeğer kalınlığı denklem (2.1) ile hesaplanır:

$$h_e = fh_1 \left[ \frac{E_1}{E_2} \left( \frac{1-\mu_2^2}{1-\mu_1^2} \right) \right]^{\frac{1}{3}} \quad (2.1)$$

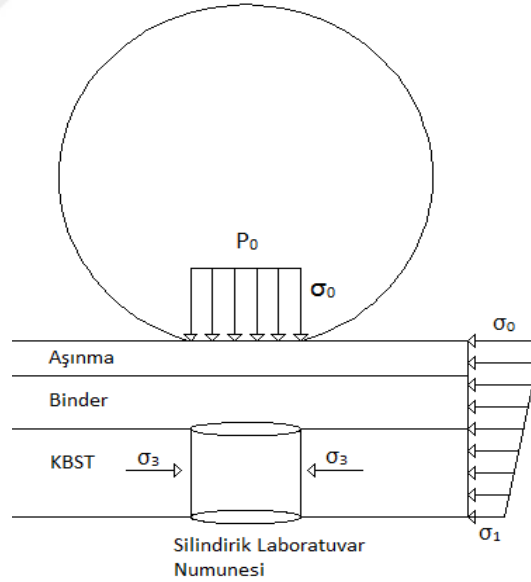
Burada;

$h_e$ : eşdeğer kalınlık

$h_1$ , birinci katmanın kalınlığıdır ve  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $\mu_1$ ,  $\mu_2$  sırasıyla ilk ve ikinci katmanlar için elastik modül ve Poisson oranına karşılık gelir.

$f$ , tabakalı elastik teoriye daha iyi yaklaşım sağlayan düzeltme faktörüdür (El-Badawy ve Kamel, 2011; Öcal, 2014)

Şekil 2.1'de görüldüğü üzere arazi şartlarında teker yüklemesi nedeniyle üstyapıda oluşan gerilmelerin deneysel temsili dinamik üç eksenli cihazlar ile yapılmaktadır.



Şekil 2.1. Temsili teker yüklemesi ve KBST tabakasındaki örnek bir numune üzerinde oluşan gerilmeler

Burada;

$P_0$  = Teker yükü

$\sigma_0$  ve  $\sigma_1$  = Düşey gerilme

$\sigma_3$  = Çevresel gerilmedir.

Tekerlek yükü, üstyapıda belli bir noktadan dikkate değer düzeyde uzakken o noktadaki gerilme sıfırdır. Yük noktanın üstünde olduğun zaman o noktadaki gerilme maksimumdur. Bu nedenle, gerilme darbesi haversin (yarım sinüs dalgası) veya üçgen yükleme kabul edilir. Yükleme süresi, aracın hızına ve kaplama yüzeyinin altındaki noktanın derinliğine bağlıdır ve taşıt hızının çok fazla değiştiği ve malzemenin derinliğinin tasarım aşamasında bilinmeyebileceği göz önüne alındığında, deneysel çalışmalarda 0,1s süresi ve dinlenme süresi 0,9s olan bir haversin yükün kullanılması önerilmektedir (Huang, 2003).

Üstyapıda, trafik yüklerinin yanı sıra iklim, malzeme kalitesinin yetersizliği, tasarım hataları, yapım hataları vb. nedenlerle üstyapılarda tekerlek izi, kabarma, çatlak, parçalanma vb. kusurlar oluşmaktadır. Tüm bu nedenlerle üstyapı fiziksel durumu zamanla kötüleşmektedir ancak zamanında müdahale ile tamamen bir üstyapı yenilemesi yerine bakım-onarım, takviye, geri dönüşüm gibi çeşitli yöntemlerle üstyapı ömrü uzatılabilmektedir.

## **2.2. Geri Dönüşüm ve Sağladığı Kazanımlar**

Bilindiği gibi yol rehabilitasyon projeleri eski üstyapının mevcut durumuna, rehabilitasyon yöntemi maliyetine ve yoldan bundan sonraki beklentiye göre değişik şekillerde yapılabilmektedir. Rehabilitasyon yöntemine karar vermede önemli olan mevcut üstyapıdaki problemin yüzeysel mi yoksa tüm yapıyla ilişkili olup olmadığını teşhis edebilmektir.

Yılmaz vd. (2011)'ne göre üstyapıda bozulma meydana geldiğinde; bozulmuş üstyapı üzerine ilave tabaka yapılması, üstyapı tabakalarında geri dönüşüm yapılarak ince bir ilave kaplama tabakası yapılması ve bozulmuş tabakaların kaldırılarak yeni malzemelerle tekrar yapılması olarak üç farklı yöntemle üstyapının iyileştirilmesi mümkündür.

Bu yöntemlerden herhangi birisi kullanılabilir ancak sadece teknik açıdan düşünmek yeterli olmayacaktır. Günümüz dünyasında sürdürülebilir ulaştırma için karar vericilerin en doğru adımları atması gerekmektedir. Bu nedenle geri dönüşüm seçeneğinin çevresel kazanımları onu tercihler içerisinde ön plana çıkarabilmektedir. Xiao vd. (2018); daha az hammadde ve fosil yakıt tüketimi, daha düşük karbon ayakizi ve üstyapı performansının artırılması avantajları nedeniyle son 20 yılı aşkın süredir batılı ülkelerde yol rehabilitasyonu amacıyla asfalt geri dönüşüm teknolojisi geliştirildiğini vurgulamaktadır. Çalışmada ilave olarak, modern endüstrinin hızla gelişmesiyle birlikte, özellikle petrol olmak üzere geleneksel enerji kaynaklarının büyük tüketimi, ciddi enerji krizine ve çevre sorunlarına yol açtığı belirtilmiştir.

Asfalt sektöründe hammadde olarak agrega ve bitüm, enerji olarak ise elektrik, petrol, doğalgaz ve kömür kullanılabilir (Ceylan, 2009; Temren, 2004). Hammadde ve enerji üretim süreçlerinde değişik çevresel etkiler oluşabilmektedir. Çalışmada bu etkiler agrega üretimi için; hava ve su kirliliği, gürültü ve atıklar olarak, bitüm üretimi için; hava ve su kirliliği ve atıklar, asfalt üretimi için; hava kirliliği, gürültü ve atıklar olarak sıralanmıştır (Ceylan, 2009). Asfalt endüstrisinin girdisini oluşturan agrega ve bitüm üretiminde bazı toz ve gaz emisyonlarının olduğu bilinmektedir. Bunların dışında asfalt üretiminin yapıldığı asfalt plantlerinde de CO<sub>2</sub> (karbon dioksit), SO<sub>2</sub> (sülfür dioksit), CO (karbon monoksit), NO<sub>x</sub> (nitrik oksit), HC (Hidrokarbonlar), CH<sub>4</sub> (Metan), N<sub>2</sub>O (Nitröz oksit) gibi bazı toz, gaz emisyonlar ve partikül maddeler oluşabilmektedir (Ceylan, 2009; Temren, 2004).

Bu denli çevresel etkisi olan bir ürün için geri dönüşümden en fazla faydayı elde edebilmek oldukça önemlidir. McDaniel ve Anderson (2001) ve ASMUD (2018)'de belirtildiği gibi asfalt, defalarca yeniden kullanılmasına ve geri kazanım işlemlerine rağmen yine asfalt olarak değerini koruyabilmektedir.

Asfaltın geri kazanılması; soğuk ve sıcak, yerinde ve plantte olarak ana başlıklara ayrılabilir.

Asfalt geri dönüşüm ve rehabilitasyon birliği; Soğuk Düzeltme (Cold Planing), Sıcak Geri Dönüşüm (Hot Recycling), Sıcak Yerde Geri Dönüşüm (Hot In-Place Recycling), Soğuk Geri Dönüşüm (Cold Recycling), Tam Derinlikten Geri Dönüşüm (Full Depth Reclamation) olmak üzere farklı geri dönüşüm teknikleri tanımlamıştır (ARRA, 2001; Salta, 2010). Soğuk geri dönüşüm de yerinde ve plentte olarak iki farklı şekilde uygulanabilmektedir.

Plentte geri dönüşüm uygulaması; geri kazanılmış malzemenin yeni karışıma katılma şekline göre sıcak ve soğuk besleme olarak iki kısma ayrılır. Plentte bulunan ilave kurutucu ile geri kazanılmış asfalt kaplamanın ısıtılarak yeni karışıma katılması sıcak besleme olarak adlandırılmaktadır. Soğuk beslemede ilave kurutucu yoktur ve RAP malzemesi ısıtılmış yeni agregaya mikserde eklenerek belirli bir süre karıştırıldıktan sonra bitüm ilavesi ile sıcak karışım hazırlanmaktadır. Ancak bu yöntemle yapılan uygulamalarda geri kazanım malzemesinin kullanım oranı %30'lar civarında kalmaktadır (Sönmez, 2017).

Thenoux vd. (2007); Pettinari ve Simone (2015), özellikle düşük trafik hacimli yolların rehabilitasyonu sırasında yerinde geri dönüşüm uygulanması halinde daha az enerji gerekeceğini vurgulamıştır. Benzer şekilde, Tabakovic vd., (2016), yerinde soğuk geri dönüşümün asfalt plentlerinin uygulama yerinden uzak olduğu kırsal yolların rehabilitasyonunda yararlı olduğunu belirtmiştir. Jacobson (2002)'da; soğuk ve ılık geri dönüşümün düşük trafik hacimli yollarda, sıcak geri dönüşümün yüksek trafik hacimli yollarda uygulandığı belirtilmiştir.

Yerinde sıcak geri dönüşüm işleminde, bitüm oksidasyonundan kaçınmak için üstteki birkaç santimetre 100-140°C aralığında finişere dahil ya da ayrı bir ısıtıcı ile ısıtılır. Hemen ardından yumuşamış malzeme çelik kesici aletlerle kazılır. Kazılmış malzeme ile yol yüzeyi istenilen profil için sıkıştırılarak yeniden şekillendirilebilir, üzeri aşınma tabakasıyla kaplanabilir ya da yeni malzeme ve bitüm gençleştiricilerle yeniden karıştırılarak serilebilir (De Bock ve Gonçalves, 2005).

Soğuk yerinde geri kazanım yönteminde birbirini belirli aralıklarla takip eden tankerler, kazıma makinesi, parçalama ve eleme birimleri, karıştırıcı, serici ve sıkıştırıcıdan oluşan katar kullanılmaktadır (Yılmaz vd., 2011).

Bu yöntemde elde edilecek ürünün kalitesinin artırılması adına, kazıma-karıştırma esnasında RAP malzeme içerisine çeşitli katı ve/veya sıvı katkı maddeleri ilave edilebilmektedir. Bu katkılar sayesinde, geri kazanım işleminde kullanılan RAP oranının artırılması ve buna bağlı olarak geri kazanımın özellikle çevresel açıdan faydasının artırılması sağlanabilmektedir.

Bitüm emülsiyonu, köpük bitüm, yüksek penetrasyonlu bitümler, cut-back (katbek) bitümler, çimentoyla emülsiyon kombinasyonları, uçucu kül ve kireç bu katkılar arasında sayılabilir ancak en yaygın kullanılanları bitüm emülsiyonu ve köpük bitümdür (Wang vd., 2018).

Jenkins vd. (2000), bitüm emülsiyonunun karışıma ilave nem katacağı bu nedenle yol trafiğe açılmadan önce oldukça uzun kür süresi gerektireceğini, Xiao vd. (2018), köpük bitümün bitüm emülsiyonuna göre daha ucuz olduğu ve daha kısa kür süresi gerektireceğini belirtmişlerdir.

Çizelge 2.1.'de Xiao vd. (2018) tarafından bitümlü katkı maddeleriyle sık kullanılan bir başka katkı maddesi olan çimentolu katkı maddelerinin kıyaslanması görülmektedir.

Çizelge 2.1. Bitümlü ve çimentolu stabilizasyon katkılarının kıyaslanması (Xiao vd., 2018)

Stabilizasyon katkı tipi	Avantajları	Dezavantajları
Bitümlü	Esneklik. Geliştirilmiş kesme özelliklerine sahip visko elastik bir malzeme oluşturabilir	Göreceli olarak deneysel
	Uygulama kolaylığı	Oturma problemleri
	Hızlı dayanım gelişimi. Sıkıştırmadan sonra hızlı bir şekilde trafiğe açılabilir özellikle köpükle stabilize malzemeler	

Çizelge 2.1. Bitümlü ve çimentolu stabilizasyon katkılarının kıyaslanması (Xiao vd., 2018) (Devam)

Stabilizasyon katkı tipi	Avantajları	Dezavantajları
Çimentolu	Ulaşılabilirlik, maliyet kazanımı ve uygulama kolaylığı	Büzülme çatlağı problemi
	Standart test yöntemleri ve şartnameleri mevcuttur	Erken trafikten koruma (özellikle ağır ve yavaş hareket eden araçlardan) ve düzenli kür gerektirir
	Çoğu malzemede durabilite ve serbest basınç dayanımında hızlı gelişim	

### 2.2.1. Köpük bitümle stabilizasyonun avantajları

- Köpük bitüm uygulaması, granüler malzemelerin kesme dayanımını artırır ve nem hassasiyetini azaltır. Köpük bitümlü karışımların mukavemet özellikleri çimentolu malzemelerinkine benzer, fakat köpük bitümlü karışım esnek ve yorulmaya karşı dayanıklıdır.
- Köpük bitüm, diğer soğuk karışım işlemlerinden daha geniş bir aralıkta agrega türleri (200 nolu elekten geçen yüksek miktarda malzeme) ile kullanılabilir.
- Asfalt bağlayıcı ve nakliye maliyetleri azalır, çünkü köpük bitümlü karışımlar diğer soğuk karışım türlerine göre daha az bağlayıcı ve su gerektirir.
- Köpük bitümlü karışım hemen yerleştirilebilir ve bu sayede inşaat süresinde önemli ölçüde tasarruf sağlar.
- Kurutucular uçucuların salınmasına neden olmadığından uçucuların karışımdan buharlaşmasından kaynaklanan çevresel yan etkilerden kaçınılır.
- Köpük asfalt, bağlayıcı süzülme riski olmadan stoklanabilir. Düzgün depolandığında, köpük bitümlü karışım bir süre için kullanılabilir durumda kalabilir.

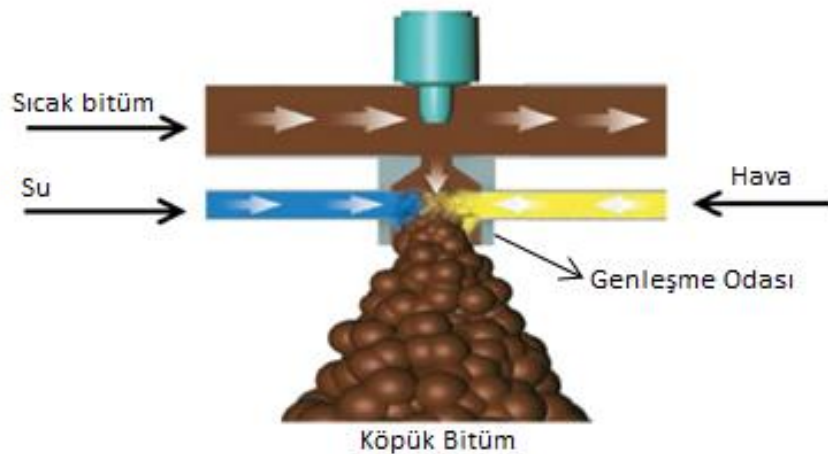
- Köpük bitüm farklı malzemelerin stabilizasyonu için kullanılabilir. Bu teknik hem marjinal hem de geri kazanılmış malzemeleri iyileştirerek üstyapıda temel ve alttemel katmanları olarak uygulanabilir (Mallick ve Hendrix, 2004).

### 2.3. Köpük Bitümle Stabilize Malzeme Bileşenleri

#### 2.3.1. Köpük bitüm

Iowa State Üniversitesi'nden Csanyi, buhar kullanarak bitüm köpürtme teknolojisini ilk kez tanıtmıştır (Kar vd., 2018). Üretim süreci 1976'da sıcak bitümün içine buhar yerine soğuk su enjeksiyonu olarak değiştirildi (Muthen, 1998; Hashemian vd., 2014). 1990'ların ortalarında Wirtgen (2012) tarafından, köpük bitüm üretmek için basınçlı bir hazneye sıcak bitüm, hava ve suyun sokulduğu bir enjeksiyon sistemi geliştirilmiştir (Şekil 2.2) (Kar vd., 2018).

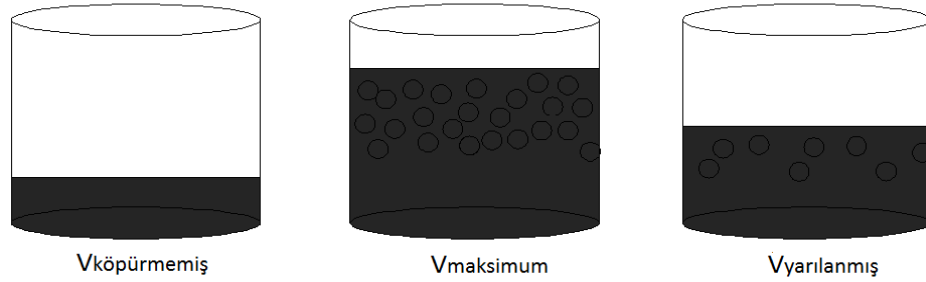
Genleşme odasında bitüm, su ve havanın birleşmesiyle oluşan bitüm köpüğünden en fazla fayda sağlanarak en ideal karışımlar üretilmeye çalışılmaktadır. Schwartz ve Khosravifar (2013)'da belirtildiği gibi, en fazla genişleyen ve mümkün olduğunca uzun süre köpük formda kalabilen bağlayıcılar köpürme amaçlı en iyi bağlayıcılar olarak kabul edilmektedir. Bu nedenle köpük bitüm,  $ER_{Max}$  (Maksimum Genleşme Oranı) ve HL (Yarılanma Süresi (Yarı Ömür)) terimleri ile karakterize edilir (He ve Wong, 2008).



Şekil 2.2. Köpük bitüm üretim prosesi şematik gösterimi (Wirtgen, 2012)

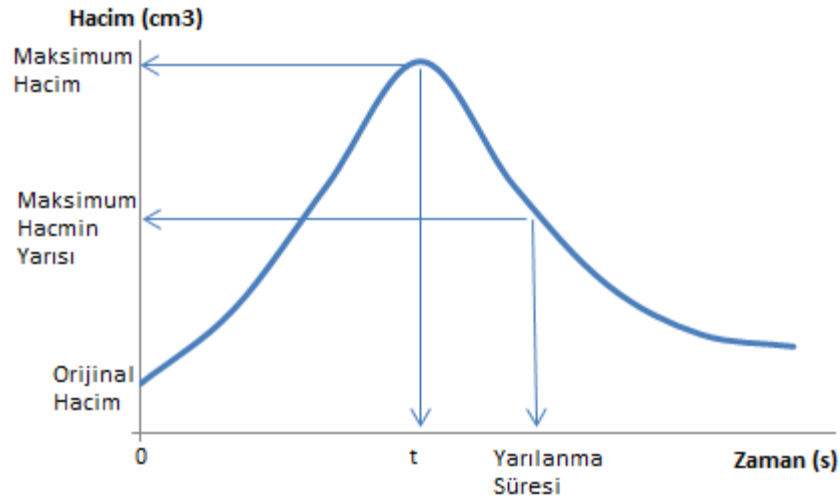
### 2.3.1.1. Genleşme oranı ve yarılanma süresi

Genleşme oranı, asfalt köpüğün maksimum hacminin, asfalt bağlayıcının orijinal (köpürmemiş) hacmine oranıdır (Jenkins, 1999). Yarılanma süresi ise, köpüğün maksimum hacmine ulaştığı an ile maksimum hacmin yarısına indiği zaman arasındaki saniye cinsinden zamandır (Şekil 2.3) (He ve Wong, 2008).



Şekil 2.3. Orijinal bitümün maksimum hacme ulaşma ve yarı hacme inme süreci

Şekil 2.4'de görüldüğü üzere zamanla bitüm köpürmekte ve hacmi bir maksimum noktaya ulaşmakta daha sonra köpük hacmi hızla çökmektedir.



Şekil 2.4. Genleşme oranı - yarılanma süresi arasındaki ilişki

Jones vd. (2008) tarafından yarılanma süresi olarak püskürtme başlığının kapanmasından (0. saniyede) köpüğün yarı hacmine çökmesi arasındaki süre kabul edilmiştir. Bağlayıcıya bağlı olarak başlığın kapanmasıyla bitümün maksimum hacme ulaşması birkaç saniye sürebilir. Köpük bu süre boyunca



kararlıdır ve uygulanabilirdir bu nedenle temel olarak bu süre köpük stabilitesinin bir ölçüsü olan yarı ömüre dahil edilmelidir. Bu nedenle Jones vd. (2008)'de öngörülen prosedür tez çalışması için uygun görülmüştür.

Bitüm köpürtme işlemi dinamik bir süreçtir (Newcomb vd., 2015; Hasan vd., 2017). Süreç, köpürtme maddesini (su) sıcak asfalt bağlayıcısına enjekte ederek başlatılır. Su, buhar haline getirilir ve bitümün içindeki çok sayıda küçük kabarcıklar içinde hapsolür, anlık olarak köpürme sağlanır ve bitüm hacmi büyük ölçüde artar. Ancak köpük çok kısa sürede söner. Bu nedenle bağlayıcının köpük formda kaldığı kısa süre içerisinde asfalt malzeme üretilmelidir (Muthen, 1998; Hasan vd., 2017). Köpürme, bitümün yüzey alanını artırır ve viskozitesini önemli ölçüde azaltır, bu da onu soğuk ve nemli agregalarla karıştırmaya uygun hale getirir (Muthen, 1998).

Yumuşak bitümlerin köpürme özellikleri daha iyidir ancak bitümlü karışımların kalıcı deformasyona (rutting) karşı direnci üzerinde olumsuz bir etkiye sahiptirler. Yüksek genleşme oranı ve yüksek yarılanma süresi bitümün karışımda daha iyi dağılmasını ve mineral malzemenin daha iyi kaplanmasını sağlar (Iwanski vd, 2015).

Genleşme oranı, yarılanma süresi ve bu parametrelere bağlı olarak da köpük bitümle geri kazanılmış malzemenin kalitesini etkileyen birden çok etken vardır. Bu etkenler; bitüm penetrasyon derecesi, bitüm ısısı, bitüm püskürtülme oranı, köpürtücü katkıları, bitüm köpürtme için kullanılan suyun basıncı ve hava basıncı olarak sıralanabilir (Jenkins, 2000). Wirtgen (2012)'de bitümün genleşme odasına basınçlı bir şekilde girmesinin de köpüğün kalitesi üzerinde olumlu etkide olduğu belirtilmiştir. Basınç ne kadar yüksek olursa, genleşme odasına girerken bitüm akımı o kadar düzenli olma eğilimindedir, böylece köpük homojenliği artar.

He ve Wong (2006)'da belirtildiği gibi genel olarak su içeriğinin artmasıyla, maksimum genleşme oranı artar ve yarılanma süresi azalır. Bitüm köpürtülürken çok fazla köpürtme amaçlı su aşırı miktarda buhar yaratarak,

bitüm baloncuklarını bozar ve enerji kaybına neden olur (Iwanski vd, 2015; Jenkins, 2000). Ayrıca karışımın nem hasarı eğilimini de artırır (Hasan vd., 2017).

Köpük bitüm kabarcıklarının zamanla çökmesinin iki önemli nedeni vardır. Biri, daha düşük sıcaklıktaki ortam havası ile bitüm filmlerinin temasının buharın sıcaklığını düşürmesidir. Bir kabarcık içindeki sıcaklık ve basıncın düşme hızı, yüzey gerilimi yaşayan bitüm filminin orijinal haline dönme hızını aşarsa, kabarcıklar çökecektir. Diğeri ise kabarcıkların bitüm filminin uzama sınırını aşmış olmasıdır. Kabarcık içindeki buhar basıncı, bitüm filmi sünme sınırının ötesine uzatırsa, kabarcık bozulur (He ve Wong, 2006). Çöküşten sonra, bitüm içinde hapsolmuş küçük kabarcıklar kalmaktadır, bu durum köpük bitümün uzun süre orijinal saf bitüm durumuna geri dönmesini zorlaştırır (Yu vd., 2016). Bu nedenle genleşme oranı bulunurken bitümün köpürtülmemiş hacminin kullanılması çöküşten sonraki hacmine göre daha gerçekçi olacaktır.

Literatürden bazı minimum genişleme oranı (ER) ve yarılanma ömrü (HL) önerileri Çizelge 2.2'de sunulmuştur.

Çizelge 2.2. Literatürde önerilen en küçük genleşme oranı ve yarılanma süreleri

Kaynak	Minimum ER	Minimum HL (s)
Wirtgen (2012) Agrega sıcaklığı 10-15°C	10	8
Wirtgen (2012) Agrega sıcaklığı >15°C	8	6
Muthen (1998)	10	12
Milton ve Earland (1999)	10	10
Ramanujam vd. (2009)	10	20

Maccarrone (1995)'de belirtildiği gibi bazı katkı maddeleri kullanılarak, 15'ten büyük genleşme oranlarına ve 60 saniyeden daha büyük yarı ömürlere sahip oldukça genişlemiş ve kararlı köpürtülmüş bitümler üretmek de mümkün olabilmektedir.

### **2.3.1.2. Köpük indeksi**

Jenkins (2000), hem genleşme oranı hem de yarılanma süresi değerlerini birleştiren (bu değerlerin bağımsız olarak değerlendirilemeyeceğini düşündüğü için) Köpük İndeksi (FI) olarak tanımlanan yeni bir özellik geliştirmiştir. Köpük bitüm üretildikten sonra, köpük genellikle zamanla asimptotik bir genleşme azalması, yani bir bozunma eğrisi sergiler. Köpük indeksi bu eğri altındaki alandır ve minimum genleşme oranı 4'ün üzerindedir (Abreu vd., 2017).

Ancak Sunarjono (2008) ve Hailesilassie vd. (2015)'de belirttiği gibi, su içeriğinden doğrudan etkilenen köpük indeksi her türlü bitüm için uygulanamaz. Artan maksimum genleşme oranı ile yarılanma süresi düzenli olarak azalmadığı için, köpük indeksi ile optimum su içeriğinin belirlenmesi her zaman mümkün değildir.

### **2.3.2. RAP (geri kazanılmış asfalt kaplama)**

Doğal malzemelerin giderek azalması, maliyetlerin artması ve çevresel sınırlamalar nedeniyle doğal agregaların kullanılması giderek kısıtlanmaktadır. Bu durumla karşı karşıya kalan Avrupa Birliği, doğal kaynakların daha verimli ve sürdürülebilir kullanımı için konuyla ilgili kuruluşları mümkün olduğunca yeşil malzemeler olarak adlandırılan malzemeleri kullanmaları konusunda teşvik etmektedir. Bu nedenle, tüm Avrupa'da, doğal agregaları destekleyebilmek için yol yapımında geri dönüştürülmüş malzeme kullanımı artmaktadır (Isola vd., 2013).

RAP, yoldan sökülen veya kazınan eski asfalt üstyapının yeni asfalt karışımının içerisinde tekrar kullanılmasıdır (McDaniel ve Anderson, 2001).

Sıcak karışım asfaltlarda, sera gazı emisyonları (GHG) tüketimiyle ilgili iki ana süreç bağlayıcının ve asfalt karışımının üretimidir (Chappat ve Bilal, 2003). RAP kullanımı bağlayıcı miktarını azaltır ve dolayısıyla bağlantılı olarak çevresel etkiyi de azaltır (Zaumanis vd., 2016).

Geri dönüştürülmüş asfalt, üstyapıda aşınmadan alttemele kadar tüm katmanlarda kullanılabilir (Jacobson, 2002). Geri dönüştürülmüş asfalt malzemedeki bitümün oksidasyonu nedeniyle bu malzemelerin aşınma tabakasında kullanılması genel olarak uygun değildir (Arapoğlu, 2014). RAP içerisindeki bağlayıcının yaşlanmış ve sert olması nedeniyle, RAP malzemesinin bir karışıma dahil edilmesinin oturma performansını artırması beklenir (Khosla, 2012), ayrıca Seferoğlu vd. (2015)'ne göre RAP malzeme iyi drenaj kabiliyetine sahip (Locander, 2009) granüler bir malzeme olup yeterli kesme dayanımına sahiptir, ancak RAP eklenmesi karışımın yorulma ve sıcaklık direncini düşürebilir (Khosla, 2012).

Farklı çalışmalar geri kazanılmış malzemeler için farklı kullanım oranları önermişlerdir. RAP malzemesinin kullanım oranı; kullanılan malzeme türüne, karışım türüne ve üretim plant tipine göre değişkenlik gösterebilmektedir (Arapoğlu, 2015).

Kandhal ve Foo (2017)'ya göre RAP malzemenin %15'e kadar kullanımı bitüm üzerinde etki yapmadığını belirtmiş, McDaniel ve Anderson (2001) %25'ten fazla RAP kullanımı asfalt bağlayıcı maddenin fiziksel özelliklerini önemli ölçüde etkilediğini belirtmiştir. Shu vd. (2008)'de %30'a kadar RAP içeren asfalt karışımlarında daha iyi yorulma performansı gözlenirken, Xiao (2015) %50 RAP içeren asfalt karışımlarında daha düşük yorulma direnci bulmuştur (Gong vd., 2018).

Geleneksel olarak, geri kazanılmış asfalt kaplama, soğuk geri dönüşüm karışımlarında genellikle 'siyah agrega (kara kaya)' olarak bilinmektedir (Yan vd., 2014). Yüksek oranda RAP kullanıldığında ve/veya düşük sıcaklıklarda karışım hazırlandığında, bağlayıcı sıcak karışımdaki gibi yumuşayamayacağından karışım içinde aktif olamayabilmektedir. Bu durumda, kazanılmış asfalt siyah bir agrega gibi davranabilmesine rağmen, elde edilen nihai karışım termoplastik ve viskoelastik performansa sahip olmaktadır (ASMUD, 2018).

Yan vd. (2014) çalışmalarında, RAP malzemesinde yaşlı asfaltın varlığının, agrega ve doğal (virgin) bitüm ara fazındaki gerilme-birim deformasyon konsantrasyonunu azaltabileceğini belirtmiş ve bu nedenle, RAP 'in soğuk geri dönüşümlü karışımlarda siyah agrega olarak değerlendirilmemesi gerektiğini önermişlerdir.

RAP malzemenin karışımda siyah agrega gibi mi yoksa aktif bir bitümlü malzeme gibi mi davranacağıyla ilgili Wirtgen (2012) aşağıdaki durumların gözlenmesi halinde, RAP malzemesi inaktif (siyah agrega) olarak kabul edilebileceğini önermiştir:

- Görsel: RAP, siyah parlak yüzeyi olmayan mat gri bir renktedir.
- Kırılgenlık: Blok halindeki RAP kolay bir şekilde parçalara ayrılır.
- Adezyon: Bir parça RAP'i (ortam sıcaklığında) elinizle sımsıkı tutup bıraktığınızda yapışmaz.

Ayrıca Wirtgen (2012), geri kazanılmış bitümün reolojik özellikleri (penetrasyon), yumuşama noktası ve viskozite açısından test edilebileceği ve Çizelge 2.3'deki gibi değerlendirilebileceği önerisini getirmiştir.

Çizelge 2.3. Geri kazanılmış bitümün aktiflik değerlendirilmesi (Wirtgen 2012)

Penetrasyon	Aktif Değil <	20	< Aktif
Bitüm Durumu	Viskoz Değil	Yarı Viskoz	Viskoz
Elle Sıkıldığında	Yapışkan Değil	Bir Miktar Yapışkan	Yapışkan

RAP içerisindeki bitümün aktif olup olmadığına karar vermenin bir başka yöntemi de tez çalışmasında yapıldığı gibi briket hazırlayarak İÇM<sub>yaş</sub> (yaş (ıslak) dolaylı çekme mukavemeti) kontrolü yapmaktır.

### 2.3.2.1. RAP malzemedeki filler yüzdesi

Köpük bitümle stabilize malzeme üretimi için dikkat edilecek en önemli hususlardan birisi geri kazanılmış malzeme gradasyonudur. Literatürde genel

kanı filler miktarının belli bir yüzdeyi aşması halinde köpük bitümün karışıma daha iyi dağılacağı ve performansı olumlu etkileyeceğidir. Bu durum şu şekilde açıklanmaktadır:

Geri kazanılmış malzemelerde yeterli miktarda filler bulunmazsa, köpürtülmüş asfalt düzgün bir şekilde dağılmayacaktır ve kıymık veya bitüm bakımından zengin topaklar oluşturma eğiliminde olacaktırlar (ARRA, 2001). Bu bitüm bakımından zengin topaklar mastik oluşumunu engeller (Buczyński ve Iwański, 2017).

Kıymıklar, filler büyüklüğüne bağlı olarak farklı boyutlarda oluşur, filler eksikliğine bağlı olarak boyutları büyür. Bu kıymıklar bir kayganlaştırıcı olarak hareket etme eğilimindedir ve geri kazanılan karışımın mukavemetinde ve stabilitesinde bir azalmaya neden olurlar. Bu nedenle, geri kazanılan malzemenin No. 200 eleğinden geçen yüzdesi 5 ila 15 arasında olmalıdır (ARRA, 2001; Thompson vd., 2009). Ancak, filler içeriğinin çok yüksek olması bitüm ihtiyacını arttırabileceği için filler yüzdesi belirlenirken bu durum da dikkate alınmalıdır.

### **2.3.3. Aktif filler**

Aktif filler, karışımın özelliklerini kimyasal olarak değiştiren filler türlerini tanımlamaktadır. Çimento ve sönmüş kireç, literatürde yaygın olarak kullanılan aktif filler çeşitleridir (Asphalt Academy, 2009). Fakat bu malzemelere ek olarak nemlendirme maddeleri olan sülfanat yağlar gibi yüzey aktif maddeler, kalsiyum klorid gibi higroskopik tuzlar, doğal ve sentetik polimerler, petrol reçineleri ve uçucu kül, cüruf, kaya tozu, kömür tozu gibi stabilizatörler de kullanılmaktadır (Wirtgen 2012).

Portland çimentosu, sönmüş kireç ve uçucu kül gibi aktif filler maddeleri, soğuk geri dönüştürülmüş karışımların mekanik özelliklerini geliştirerek kısa vadede yolun trafiğe daha erken açılmalarına izin verirken, uzun vadede soğuk geri

kazanılmış malzeme katmanının sertliğini ve dayanımını artırır (Brown ve Needham, 2000; Dolzycki vd., 2017; Graziani vd., 2018).

Erken dönem bozulmalarının nedeni olan nem hasarına karşı direnç bakımından faydalı olan sönmüş kireç, üstyapıda katkı maddesi olarak yaygın olarak kullanılır (Zou vd., 2013). Karbon ayakzine sahip olmayan bir yan ürün olan uçucu kül de, kaplama agregalarının fiziksel ve geoteknik özelliklerini geliştirmek için potansiyel bir stabilizatör olarak kullanılmaktadır (Mohammadinia vd., 2017).

Aktif fillerin bitümle stabilize malzemede kullanılma amaçları arasında; bitümün agregaya olan yapışmasını artırmak, doğal malzemelerin plastisitesini azaltmak, karışımın sıkılığını artırarak dayanımı artırmak ve kuru hızlandırmak sayılabilir. Ayrıca aktif filler, bitümün karışımın içerisine homojen olarak dağılmasına yardımcı olur. Ancak, aktif filler ilavesi, genellikle maksimum %1 ile sınırlıdır çünkü daha yüksek aktif filler içeriği kırılğan bir yapı oluşmasına neden olur, büzülme ve trafikle ilgili çatlakları artırır. Farklı türlerde aktif fillerler, ayrı ayrı ya da beraber kullanılabilir. Filler tipi erişilebilirlik ve maliyete bağlı olarak seçilir (Wirtgen, 2012). Ayrıca, aktif filler seçiminde kür edilmiş ve suda bekletilmiş Marshall numunelerinin İÇM değeri ve üç eksenli testinden elde edilen kohezyon değeri en kullanışlı belirleme yöntemleridir (Asphalt Academy, 2009).

Soğuk geri kazanım tekniklerinde hidrolik (çimento) ve bitümlü (bitüm emülsiyonu veya köpük bitüm) bağlayıcılar genellikle yüksek geri kazanılmış asfalt ve yüksek boşluk içeriğinden kaynaklanan eksiklikleri kapatmak ve böylece malzemenin mekanik özelliklerini artırmak amacıyla birlikte kullanılırlar (Bocci vd., 2011; Godenzoni vd., 2017). Çimento ve bitüm kullanıldığında, malzemenin mekanik davranışı ve performansı, her bir bağlayıcı maddenin özelliklerine ve dozajına büyük ölçüde bağlıdır (Bocci vd., 2014; Godenzoni vd., 2016; Graziani vd., 2016; Godenzoni vd., 2017).

Asphalt Academy (2009) tarafından bitümle stabilizasyonun faydalı olması için bitüm içeriğinin aktif filler içeriğini aşması tavsiye edilir. Eğer bitüm/çimento oranı birden fazla ise ve çimento içeriği %1'den düşükse, karışım bitümün ince agrega arasında dağılmış olduğu, kaba agrega arasında süreksiz bağların olduğu bir yapıda stabilize edilmiş bir malzeme (BSM) olarak kabul edilebilir (Asphalt Academy, 2009; Godenzoni vd., 2017). Düşük çimento içerikli bitümle stabilize edilmiş malzemeler, kaba granüler malzemelere benzer şekilde davranış gösterirler ancak daha yüksek kohezyona sahiptirler (Jooste ve Long, 2007; Thompson vd., 2009).

Eğer bitüm/çimento oranı birden fazla ve çimento içeriği %1'den fazla ise, karışım çimento ve bitümle iyileştirilmiş malzeme (CBTM) olarak kabul edilebilir. Bu tür karışımlar genellikle asfalt benzeri bir davranış sergiler, yani zaman - sıcaklık bağımlı davranış gösterirler (Bocci vd., 2011; Stimilli vd., 2013; Godenzoni vd., 2017).

Aktif filler uygulamasında, aktif filler karıştırılan malzemeye köpük bitüm uygulanması sırasındaki gecikme minimize edilmelidir. Aktif filler ıslak malzeme ile temas ettiği anda reaksiyona girer ve ince agregalar arasında adezyon sağlar. Aktif filler karıştırılan malzemeye köpük bitüm uygulanması sırasındaki gecikme ne kadar artarsa, FASM (köpük asfaltla stabilize malzeme) karışımındaki bitümün homojen dağılması için kullanılan aktif fillerin kullanılabilme oranı o kadar azalır (Asphalt Academy, 2009).

KBSM üretiminde kullanılan bir diğer malzeme sudur. Suyun ana görevi bitümün köpürtülmesini sağlamaktır. Bir diğer görevi karışımı sıkıştırmak için optimum su içeriğinin sağlanmasıdır.

Karışım suyu ayrıca karıştırma sırasında karışım içindeki bitüm damlacıklarının homojen dağılımına katkıda bulunur (Grilli vd., 2012; Grilli vd., 2016; Graziani vd., 2018).



## 2.4. Köpük Bitümlle Stabilize Edilmiş Malzeme Yapısı ve HMA (Sıcak Karışım Asfalt) ile Farklılıkları

Köpük bitümlle stabilize malzeme yapısında, üç ana aşama tanımlanabilir:

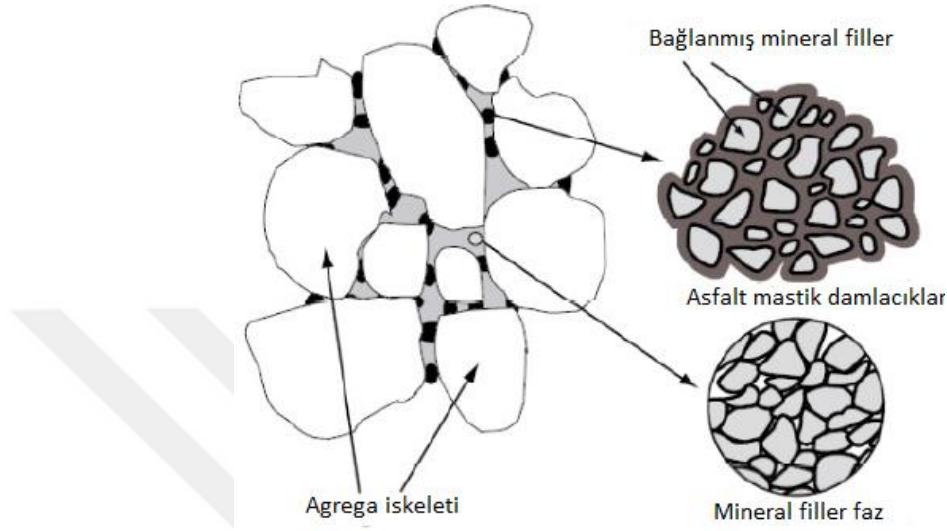
- Agrega iskeletini oluşturan kısmen bitümlle kaplı büyük agrega partikülleri;
- Agrega iskeletini birbirine bağlayan asfalt damlacıkları şeklinde bulunan asfalt mastik fazı;
- İskeletteki boşlukları dolduran mineral filler faz. Hava boşlukları, mastik ve mineral filler fazlarına dahil olarak kabul edilir, ayrı bir faz olarak kabul edilmez (Jones vd., 2008).

Fu ve Harvey (2007)'de de belirtildiği gibi; sıcak karışım asfaltın sıcaklık hassasiyeti ve köpük asfalt karışımlarının rijitliği, asfalt reolojisine bağlı olmaları bakımından bir miktar benzerdir. Bununla birlikte, mikro yapıları ve asfalt bağlayıcının rolleri farklıdır (Jenkins, 2000). Köpük asfalt karışımının mikroskobik yapısının, mastik harçla kaynak noktaları halinde bağlanmış (spot welded) kısmen kaplanmış büyük agregalara sahip olduğuna inanılmaktadır (Jenkins, 2000; Fu vd., 2009). Püskürtülen köpük bitüm, genellikle ince parçacıklara dağılmış olarak görülür (Iwanski ve Kowalska, 2013). Sonuç olarak köpük bitümlle stabilize malzemeler sürekli olarak bağlı değildirler (Asphalt Academy, 2009).

Bu nedenle BSM'ler sıcak karışım asfaltın aksine sıcaklığa duyarlı değildirler (Asphalt Academy, 2009). Ancak, HMA'ya göre köpük asfaltın boşluk oranı ve geçirimsizliği çok daha yüksek olduğu için neme karşı oldukça hassastırlar (Fu vd., 2009).

Köpük asfalt yapısı sıcak karışımlara benzemekle beraber aşağıda açıklandığı ve Şekil 2.5'de görüldüğü gibidir (Su ve hava boşlukları şekilde gösterilmemiştir).

Şekilden görüldüğü üzere; ince agrega parçacıkları, asfalt mastik fazını oluşturmak için köpürme esnasında kısmen asfalt bağlayıcı ile kaplanır, agrega iskeletindeki boşlukların önemli bir kısmı ise bitümsüz mineral filler ile doludur (Fu vd., 2009).



Şekil 2.5. Köpük bitümle stabilize malzemelerin mikroyapısı (Jones vd., 2008)

KBSM'lerin ana başarısızlık mekanizması yükleme altında kalıcı deformasyondur (Asphalt Academy, 2009). KBSM karışımlarının kalıcı deformasyona karşı direnci; agrega iskeletinin iyileştirilmesiyle, açıklık, maksimum agrega boyutunun artırılması, sıkıştırma ve kür işleminin geliştirilmesi ve köpük bitüm içeriğinin maksimum %3 ile sınırlandırılması ile artırılabilir. Aşırı köpük bitüm, agregalar arasında bir yağlayıcı görevi görecektir ve sürtünme açısını azaltacaktır, böylece kesme başarısızlığının artmasına ve bunun sonucunda kalıcı deformasyona neden olacaktır (Wirtgen, 2012; Khosravifar vd., 2015).

Khosravifar vd. (2015)'ne göre; FASB (köpük bitümle stabilize temel) karışımları, GAB (granüler agrega temel) ve HMA malzemelerinin bazı özelliklerini paylaşmaktadır.

Köpük asfalt karışımlarının mukavemet, esneklik modülü ve kalıcı deformasyon direncinin gerilme durumuna bağlı olduğu iyi bilinmektedir. Bu tipik bir

bağlanmamış veya zayıf şekilde bağlanmış granüler malzeme davranışdır (Fu ve Harvey, 2007; Jenkins vd., 2007; Fu vd., 2009). Öte yandan, köpük asfalt karışımları çekme ve eğilme deformasyonuna dayanabilir ve bağlanmış malzemelerin tipik bir özelliği olan bir miktar yorulma direnci gösterebilir (Fu vd., 2009). Muthen (1998)'de köpük asfalt karışımlarının aşınmaya ve sürtünmeye karşı dirençli olmadığı için aşınma tabakası uygulamaları için olmadıkları belirtilmiştir.

Köpük bitüm kullanılarak eski üstyapının stabilizasyonu ile elde edilen malzeme için literatürde; sıcak karışım asfalt ve granüler temel malzemelerinin her ikisinden de farklı özelliklere sahip olduğunu (Fu vd., 2009), granüler malzemelere benzer davranışta ancak daha yüksek kohezyon ve daha düşük nem hassasiyetine sahip olduğunu (Asphalt Academy, 2009) savunan farklı görüşler mevcuttur. Ayrıca Wirtgen (2012) tarafından köpük bitümle stabilize edilmiş RAP (geri kazanılmış asfalt kaplama) malzemelerinin uygun şekilde tasarlanması ve inşa edilmesi şartıyla bitümlü temellerin yerine güvenle kullanılabilmesi, Fu vd. (2011) tarafından köpük bitümlü karışımların ince bir sıcak karışım asfalt yüzey kaplamasının altında stabilize edilmiş bir temel tabakası olarak kullanılabilmesi belirtilmiştir.

Tüm bu görüşler ışığında köpük bitümle geri dönüşüm yöntemi stabilize bir temel gibi davranacağı açıktır. Diğer stabilize temellerle olan farklılıkları şunlardır:

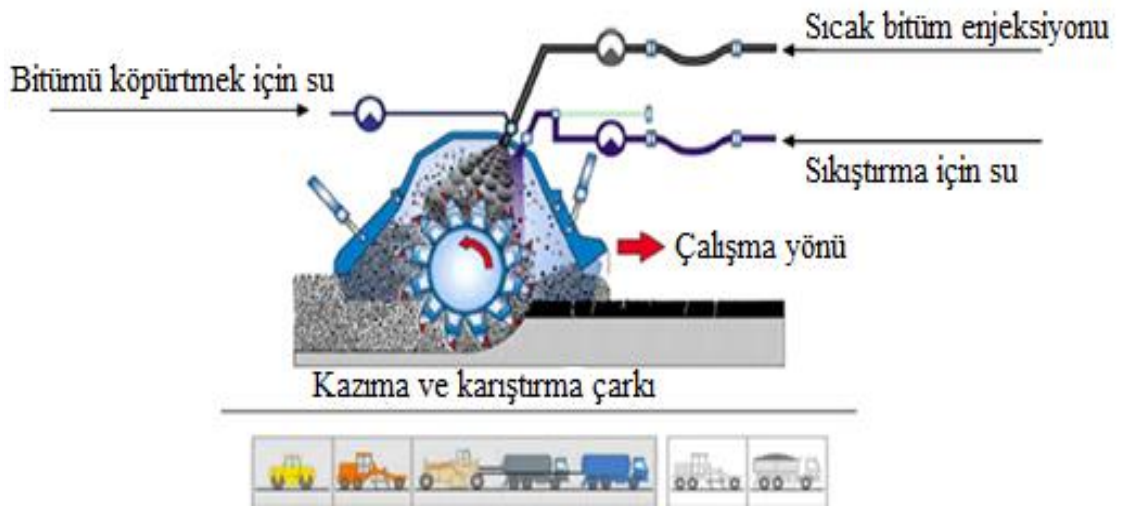
FBB (köpük bitümlü temel), bitümle stabilize edilmiş granüler malzeme üretmek için kullanılan üç yöntemden biridir. FBB, bitümün viskozitesini geçici olarak azaltarak, homojen karışmasını, yerleştirilmesini ve sıkıştırılmasını sağlamak için bitümün köpürtülmesine dayanır. Bitüm emülsiyonu ile stabilize edilmiş temel (ESB) FBB'ye benzerdir, ancak benzer şekilde işlenebilir bir ürün elde etmek için bitüm emülsiyonunun düşük viskozitesinden yararlanır. Bitümle stabilize edilmiş temel (BTB) de diğerlerine benzerdir, ancak bitümün viskozitesini azaltmak için ısıtılır. ESB'nin yavaş kür alması ve BTB'nin yerinde üretilmemesi nedenleriyle FBB, BTB ve ESB'ye kıyasla avantajlıdır. FBB,

genellikle çimentoyla stabilize edilmiş temel tabakasıyla (CTB) karşılaştırılır. Bununla birlikte bitümlü yüzeye yansiyacak olan çatlak sorunu, CTB ile karşılaştırıldığında FBB'de neredeyse tamamen çözülmüştür (White, 2018).

## 2.5. Köpük Bitümle Stabilize Edilmiş Malzeme Ekipmanları, İnşaatı ve Kontrolü

KBST yapım çalışmaları diğer temel yapım yöntemlerine göre farklı ekipmanlar gerektirir. Geri dönüşüm treni (katar) ana elemanları; geri dönüşüm makinesi, asfalt bağlayıcı tankeri, su tankeri, aktif filler serici ve silidirlerden oluşur. Burada geri dönüşüm makinesi, bitüm ve su tankeri birbirine bağlantılı olarak çalışır.

Şekil 2.6, köpük asfalt makinesinin çalışma prensibini göstermektedir. Şekilden görüldüğü üzere geri dönüşüm makinesinin tamburu yardımıyla kazınan malzemeye makineye bağlı olan tanklardan verilen sıcak bitüm ve soğuk su ile köpürtülen bitüm püskürtülür ayrıca tambur sayesinde karıştırma işlemi yapılır ve karışmış malzeme serilir.



Şekil 2.6. Köpük asfalt makinesinin çalışma prensibi (Wahhab vd., 2012)

Aktif fillerin, geri dönüşüm treninin önüne doğru ve eşit şekilde yayılması için aktif filler serici kullanılır.

- Silindirler; geri dönüşüm katarı başına bıçaklı bir adet titreşimli keçi ayağı silindir. Katmanın kalınlığına bağı olarak 10 ila 12 ton arası bir bandajlı silindir. Sıkıştırılacak tabaka kalınlığı 150 mm'den fazlaysa silindir kapasitesi artırılmalıdır. Tabakanın son kez üstünden geçmek için pnömatik lastikli silindir kullanılır.

- Tesviye için standart bir greyder.

- Su tankı; ilave bir su tankeri kullanılarak keçi ayağı silindir ile yapılan ilk sıkıştırmadan sonraki nem içeriğinin ayarlanması ve yüzeyin son halinin toz ve nem kontrolü sağlanmalıdır.

- Yükleyici; fazla ve döküntü malzemeleri karayolundan almak için.

- Mekanik süpürge; trafiğe açılmadan önce ve sıcak karışım asfalt tabakasını yerleştirmeden önce yüzeydeki gevşek malzemeyi süpürmek için kullanılır (Jones vd., 2009).

### **2.5.1. Uygulamada dikkat edilecek hususlar**

KBST için malzeme miktarlarının ve uygun ekipmanın seçimi kadar bir başka önemli konu da uygulamanın doğru ve bilinçli yapılabilmesidir. Öncelikle Asphalt Academy (2009)'da belirtildiği gibi yerinde geri dönüşüm yapılacak üstyapıda taban zemini CBR değeri %3'ten az ise zeminde yeterli dayanım sağlanmadıkça yerinde geri dönüşüm yapılması önerilmemektedir.

Uygulama esnasında bazı dikkat edilmesi gereken noktalar; geri dönüşüm derinlik ölçümleri, malzemede nem kontrolü, uygulama öncesi serilen aktif filler ve uygulama esnasında püskürtülen bitüm miktarlarının kontrolü, sıkışma kontrolü, yüzey düzgünlüğü olarak sıralanabilir (Jones vd., 2009).

Köpük asfalt, ortam sıcaklığı 5°C'nin altında olduğu durumlarda uygulanmamalıdır. Çalışma, karayolu temiz ve su barındırmadığı zaman gerçekleştirilmelidir (Alberta, 2019). Sıkıştırma esnasında sıkıştırma araçları geri dönüşüm katarına mümkün olduğunca yakın ilerlemelidirler. Son sıkıştırma ve tesviye, ilk sıkıştırma işleminden mümkün olan en kısa süre sonra yapılmalıdır. Son sıkıştırma ve tesviye için takip edilen işlemler, standart temel tabakasındakilere benzer. İlk sıkıştırmadan sonra işlemler mümkün olduğunca hızlı olmalıdır çünkü bitüm ve aktif filler varlığı zaman geçtikçe işlenebilirliği zorlaştıracaktır (Jones vd., 2009). Bitümlü stabilizasyon için köpük asfalt kullanıldığında, aşınma tabakası CIR karışımı en az 2 gün kür olduktan sonra yapılmalıdır (Alberta, 2019).

Çizelge 2.4'den yararlanılarak bir KBST üretimi sırasında alınacak numunelerde nasıl bir sonuçla karşılaşılacağı ya da tamamlanmış bir üretimden alınacak numunelerden KBST tasarım ve üretiminin nasıl olduğu yorumlanabilir.

Çizelge 2.4. Dizayna bağlı olarak KBST numunelerinin muhtemel özellikleri (Jones vd., 2008)

Karışım karakteristikleri	Test sonuçları ve kırılmış yüzey özellikleri
Yüksek işlenebilirlik ve yüksek nem direnci, ideal karışım	Yüksek İÇMyaş
	Uniform dağılmış küçük asfalt damlacıkları
	Orta ila yüksek FFAC
Düşük karışım sıcaklığı ve yüksek karışım nem içeriği	Düşük ve değişken yaş İÇM
	Düşük ve değişken FFAC
	Büyük ve yoğun bitüm damlacıkları
Yüksek mineral filler içeriği ve düşük bitüm içeriği	Düşük yaş İÇM
	Düşük FFAC
	Küçük ve seyrek bitüm damlacıkları
Düşük mineral filler içeriği	Orta ila düşük yaş İÇM
	Yüksek FFAC
	Çoğunluğu uniform dağılmış ortalama boyutta asfalt damlacıkları

FFAC (kırılmış yüzeyin bitümlü sarılı alanı) kırılmış numune yüzeyinde görünen mastik faz alanının kırılma yüzeyinin toplam alanına oranı olarak tanımlanır ve

köpük asfalt kırılma yüzeylerinin en basit nicel karakteristiği olarak kabul edilir (Jones vd., 2008).

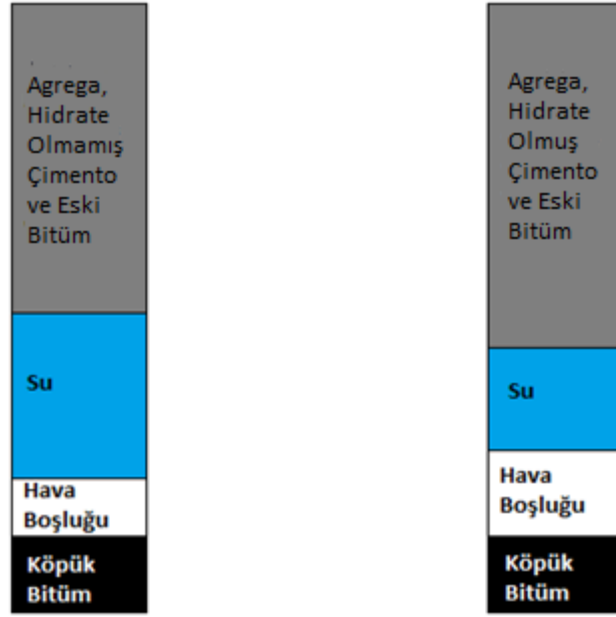
## **2.6. Kür**

Kür olayı malzemelerin nem içeriğinin azalması ve buna bağlı olarak dayanım kazanmaları olarak tanımlanabilir. Soğuk geri kazanılmış yolların, özellikle hidrolik bağlayıcı da içermeleri nedeniyle trafiğe açılmadan kür sürecini tamamlamış olmaları gerekir.

CRM'nin (soğuk geri kazanılmış malzeme) bileşimi ve davranışı geleneksel (veya geri dönüştürülmüş) sıcak karışım asfalt karışımlarına göre karşılaştırıldığında, iki yön büyük öneme sahiptir. İlk olarak, CRM'nin yerleştirilmesi ve sıkıştırılması için ısıtma yerine su kullanılır (Graziani vd., 2016). Nem içeriği, taze durumdaki CRM'nin, özellikle uygun hacimsel özelliklere ulaşma yeteneklerini kontrol eden önemli bir faktördür (Grilli vd., 2012; Graziani vd., 2016). İkincisi, CRM'in fiziksel yapısı zamanla gelişir; kür olarak bilinen bu işlem, uzun vadeli kür durumuna ulaşana kadar mekanik özelliklerin (örneğin rijitlik ve dayanım) gelişmesini sağlar (Cardone vd., 2014; Graziani vd., 2016).

Şekil 2.7'den görüldüğü üzere; CRM'in katı fazı; kazınmış asfalt (yaşlanmış bitüm de katı fazın bir parçası olarak kabul edilir), yeni agrega, filler ve çimento (veya diğer ikincil bağlayıcılar) içerir. Kür, boşlukların ve katı fazın (çimento hidrasyon ürünleri) kapladığı hacmin kademeli olarak artmasına neden olurken, buharlaşma ve çimento hidratasyonu nedeniyle suyun hacmi yavaş yavaş azalmaktadır (Graziani vd., 2018).

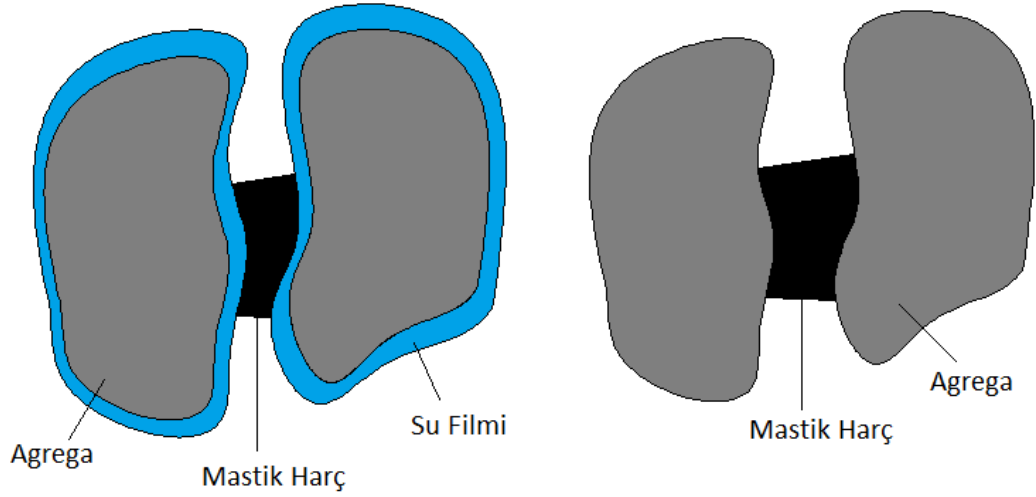
Karışımda yetersiz su bulunması halinde; işlenebilirlik azalır ve bağlayıcı madde homojen dağılmaz, çok fazla su; kür süresini uzatır, sıkıştırılmış karışımın mukavemetini ve yoğunluğunu azaltır ve agregaların bitümlle kaplanmasını azaltabilir (Muthen, 1998).



Şekil 2.7. KBSM'nin küre dayalı hacimsel değişimi

Soğuk geri kazanılmış malzemeler gibi boşluklu karışımlardaki agregalar parçacıkları çoğunlukla bir su membranı ile kaplanır. Sıkıştırma işleminden sonra, mastik damlacıklar agregalar parçacıkları ile sıkı bir şekilde temas halindedir (Şekil 2.8), ancak bu damlacıklar su membranının varlığından ötürü kalıplama (serim) neminin çoğu buharlaşana kadar agregalara fiziksel olarak bağlanamazlar. Kür işlemi sırasında, daha büyük boşluklardaki su önce buharlaşır. Daha düşük termodinamik potansiyele bağlı olarak, özellikle asfalt mastik-agrega partikül ara yüzeyinde, suyun küçük boşluklardan buharlaşması daha uzun zaman alır. Bununla birlikte, agregalar parçacıkları ile mastik harç arasındaki fiziksel bağlar bir kez oluştuğunda karışıma yeniden su girse bile, bu bağlar sadece kısmen zarar görürler. Belirli koşullar altında karışımdaki su sıkıştırmadan sonra muhafaza edilirse (aşınma tabakasının erken yerleştirilmesi ya da yetersiz drenaj nedeniyle) bağlar çok uzun bir süre sonra bile gelişemezler (Fu vd., 2010). Kürü tamamlanmamış bir soğuk karışım hafif de olsa bir kırıcı etkiye (erken kaplama nedeniyle erken yükleme gibi) maruz kaldığında agregalar ile köpük bitüm henüz tam olarak bağlanamamışken ayrılarak erken dayanım kaybına neden olacaktır. Bu nedenle KBST'nin sahada kür durumunu doğru değerlendirmek, üzerine gelecek yeni tabakanın yerleştirilme zamanını belirlemek için önem arz eder.





Şekil 2.8. KBSM kür süreci

Papavasiliou ve Loizos (2013), köpük bitümlü bir tabakada yapılacak ölçümler ve numune alımı için kür olayının tamamen tamamlanması gerektiği bunun da yapımdan sonra yaklaşık bir yıl süreceğini belirtmişlerdir.

Literatürdeki deneysel çalışmalarda 60°C, 40°C ve ortam sıcaklığı olmak üzere üç farklı kür ısı kabul edilmiştir. Köpük bitümlü karışımlar için 60°C'de kür uygun görünmemektedir. Jones vd. (2008)'ne göre, 50°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda kür, köpük asfalt karışım numunelerinin görünümünü değiştirmiştir bu da bitüm dağılımının değiştiği anlamına gelir. Ortam sıcaklığına yakın bir sıcaklıkta kürde (örneğin 20-25°C), bağıl hava neminin etkisinin kontrol edilmesi zordur. Bu nedenlerle 40°C uygun bir sıcaklık gibi görünmektedir (Fu vd., 2010). Laboratuvar ortamındaki 40°C sıcaklıkta 3 günlük bir kür arazi şartlarında 3-6 aylık bir küre tekabül etmektedir (Austroads, 2011).

## 2.7. Dolaylı (İndirekt) Çekme Mukavemeti (İÇM-ITS) Ve Korunmuş İÇM Oranı (TSR)

Dolaylı çekme mukavemeti, bitümlü karışımların sıcaklık ve yorulma nedeniyle oluşan çekme gerilmelerini karakterize eder (Seçginli, 2007). Dolaylı çekme mukavemeti deneyi, kırılma özellikleri potansiyelini ve asfalt karışımlarının nem duyarlılığını değerlendirmek için yaygın olarak kullanılır. Şartlanma öncesi

$\dot{I}CM_{kuru}$  (kuru dolaylı çekme mukavemeti) ve şartlandırmadan sonraki  $\dot{I}CM_{yaş}$  değerleri, nem etkisinin neden olduğu hasarı hesaplamak için kullanılırlar (Diab ve Enieb, 2018).  $\dot{I}CM$  değeri, ASTM (American Society for Testing and Materials) D6931'e göre çap ekseninde 50,8 mm/dakika sabit deformasyon hızına tabi tutulan bir numunenin kırılmasına karşı nihai yükün ölçülmesiyle belirlenir (Orhan, 2012).

Deney sonucunda bulunan  $\dot{I}CM_{kuru}$  değeri optimum bitüm ihtiyacını belirlemek için,  $\dot{I}CM_{yaş}$  değeri ise aktif filler ihtiyacını belirlemek için kullanılır (Wirtgen, 2012).  $\dot{I}CM_{yaş}$  değeri genellikle numunelerin boşluk içeriğine bağlıdır. Boşlukların içeriği ne kadar büyük olursa  $\dot{I}CM_{yaş}$  değeri o kadar düşük olur çünkü su, malzemenin iç kısmına kolayca nüfuz edebilir ve bu nedenle daha fazla hasar verir (Arguelles vd., 2015).

Wirtgen (2012) tarafından  $\dot{I}CM$  için şu sınır değerler önerilmiştir:

- ESDY (eşdeğer standart dingil yükü) > 6 milyon olan yollarda;  $\dot{I}CM_{yaş}$  değeri en az 100 kPa,  $\dot{I}CM_{kuru}$  değeri en az 225 kPa ve TSR değeri 50'den büyük olmalıdır.

- ESDY < 6 milyon olan yollarda  $\dot{I}CM_{yaş}$  değeri en az 75 kPa,  $\dot{I}CM_{kuru}$  değeri en az 175 kPa ve TSR değeri 50'den büyük olmalıdır.

Numunelerin su ile koşullandırılmasından önce ve sonraki dolaylı mukavemet değerlerinin bir oranı olan TSR değeri, su geçirmezliği ve suyun etkilerine karşı direnci değerlendirir (Iwanski ve Kowalska, 2013).

TSR asgari kriterleri, iklim koşullarına bağlı olarak tipik olarak %50 ila %75 arasında değişmektedir (Schwartz ve Khosravifar, 2013), Diab ve Enieb (2018) nem hasarını değerlendirmek için %80 TSR değeri kullanılmasını önermişlerdir. TSR ne kadar yüksek olursa, asfalt karışımı nem hasarına o kadar iyi direnç gösterir (Diab ve Enieb, 2018).

Wirtgen (2012) tarafından TSR değerinin %50'den az olması halinde, aktif filler maddesinin karışıma dahil edilmesi önerilir. Bu tür bir işlemde, maksimum %1 kireç veya çimento uygulanır ve eğer  $İÇM_{yaş}$  değeri artmazsa, stabilize edilen malzemenin yapısı araştırılmalıdır. Bir malzemenin TSR değeri %50'den az ve  $İÇM_{kuru}$  değeri 400 kPa'ı aşarsa, malzemenin killi olması muhtemeldir ve bitüm etkili olamaz. Bu durumda, malzemenin ön işleme tabi tutulması (sönmüş kireç ile stabilizasyon) önerilmektedir (Leek ve Jameson, 2011).

## 2.8. Esneklik Modülü

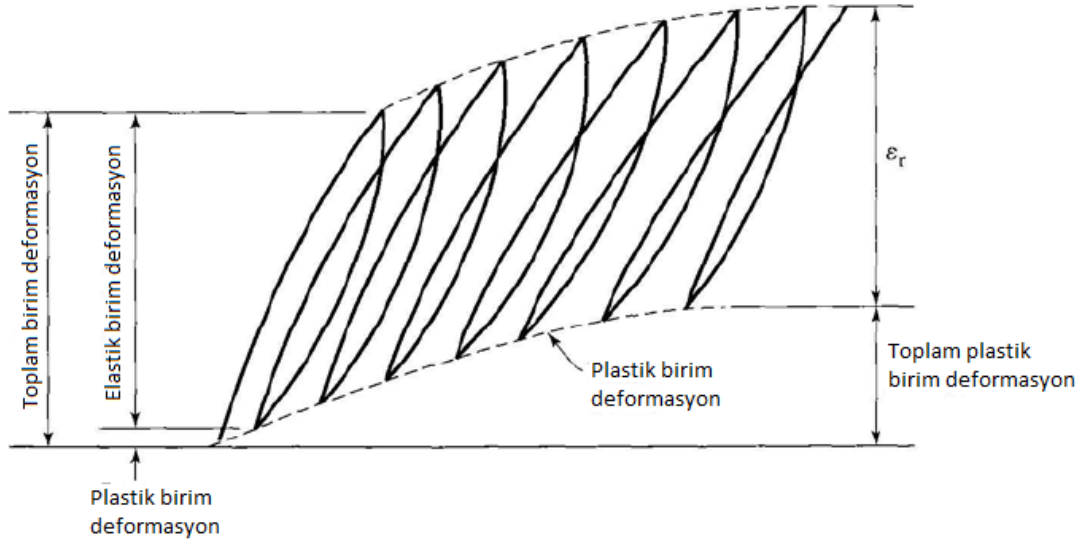
Malzemelerin dayanım özellikleri, bağlayıcısız granüler malzemeler için (temel, alttemel, seçme malzeme, taban zemini) Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR), bitümlü sıcak karışım tabakaları için ise Marshall Stabilitesi değerlerine göre belirlenmektedir ve bu deneyler statik yükleme altında yapılmaktadır. Oysa ki gerçek arazi koşullarında yol üstyapısı statik yükten ziyade, dinamik yüklemelere maruz kalmaktadır. Ayrıca üstyapıya etkiyen yükler sabit değildir ve yükleme koşulları çok değişkendir. Dolayısıyla AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) tarafından 1986 yılında çıkarılan projelendirme rehberinde üstyapının performansı, CBR yerine hem bağlayıcısız granüler malzemeler, hem de bitümlü sıcak karışımlar için esneklik modülü olarak adlandırılan değerle ilişkilendirmiştir (Güngör ve Sağlık, 2017).

Esneklik modülü, üstyapı malzemelerinin uygulanan yükler altında esnek deformasyona karşı direncini tanımlar (Fu vd., 2009).

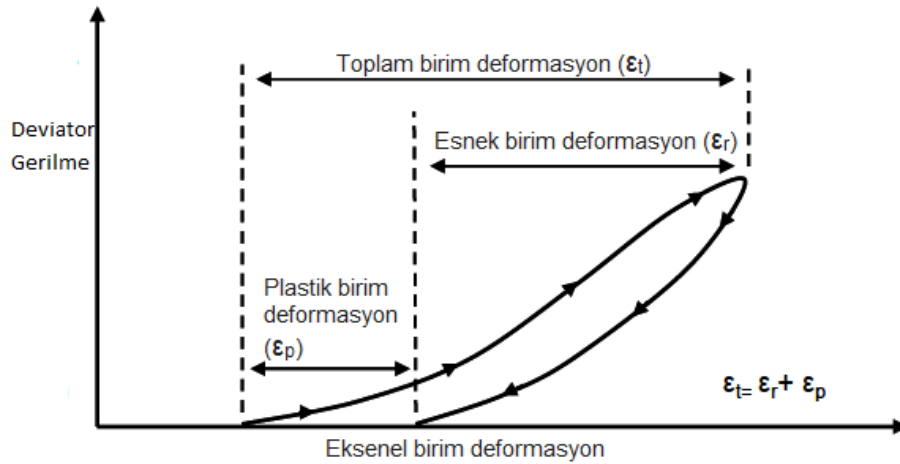
Yavaş uygulanan yükleme durumunda, gerilme-birim deformasyon eğrisinin doğrusal elastik bölgedeki eğimi Elastisite Modülünü verir, oysa hızlı uygulanan yükler için (örneğin üstyapıların maruz kaldığı yükleme) bu değer Esneklik Modülünü (MR) verir (Patel vd., 2008).

Şekil 2.9 ve Şekil 2.10'da bir üstyapıya uygulanan dinamik yükler neticesinde meydana gelen birim deformasyonlar görülmektedir. Yük uygulamalarının ilk

aşamasında, şekillerde plastik birim deformasyon ile belirtildiği gibi önemli kalıcı deformasyonlar vardır. Tekrar sayısı arttıkça, her yük tekrarına bağlı olarak plastik birim deformasyonlar azalır. 100 ila 200 tekrardan sonra şekillerde  $\epsilon_r$  ile gösterilen birim deformasyon pratik olarak tamamen geri kazanılabilir (elastik) (Huang, 2003).



Şekil 2.9. Üstyapıda tekrarlı yükleme altında meydana gelen birim deformasyonlar (Huang, 2003)



Şekil 2.10. Her bir yük tekrarı için oluşan birim deformasyonlar (Buchanan, 2007)

Üstyapıdan geçen bir tekerlek yükünün altındaki esnek kaplama bölgesi, etrafını çevreleyen malzeme tarafından desteklenir ve yükün doğurduğu sürtünme kuvveti ile çevresel koşullandırmaya (yanal basınca) maruz kalır. Oluşan bu

çevresel destek üç eksenli deneyinde uygulanan hücre basıncına benzemektedir ve koşullandırma olarak tanımlanmaktadır. Koşullandırılmış karışımların taşıma kapasitesi koşullandırılmamış durumdan daha yüksektir. Bu tür deneyler genellikle plastik davranış gösteren malzemeler için uygulanmaktadır. Zemin ve bitümlü karışımlar bu sınıfa iyi birer örnektirler. Bu tür malzemeler yük altında ani bir kırılma göstermez ve yük uygulandığı sürece akma devam etmektedir (Çetin, 2008).

Asfalt malzemelerinin çoğunun elastik olmadığı, ancak her yük uygulamasından sonra bazı kalıcı deformasyonlar yaşadığı iyi bilinmektedir. Bununla birlikte, yük malzemenin mukavemetine göre küçükse ve çok sayıda tekrarlanırsa, her yük tekrarı altındaki deformasyon neredeyse tamamen geri kazanılabilir (ve yüke orantılı) ve elastik olarak kabul edilebilir.

Tekrarlı yük altında deviator gerilmenin elastik birim deformasyona oranı ile esneklik modülü Denklem (2.2) yardımı ile bulunur.

$$M_R = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r} \quad (2.2)$$

Burada;

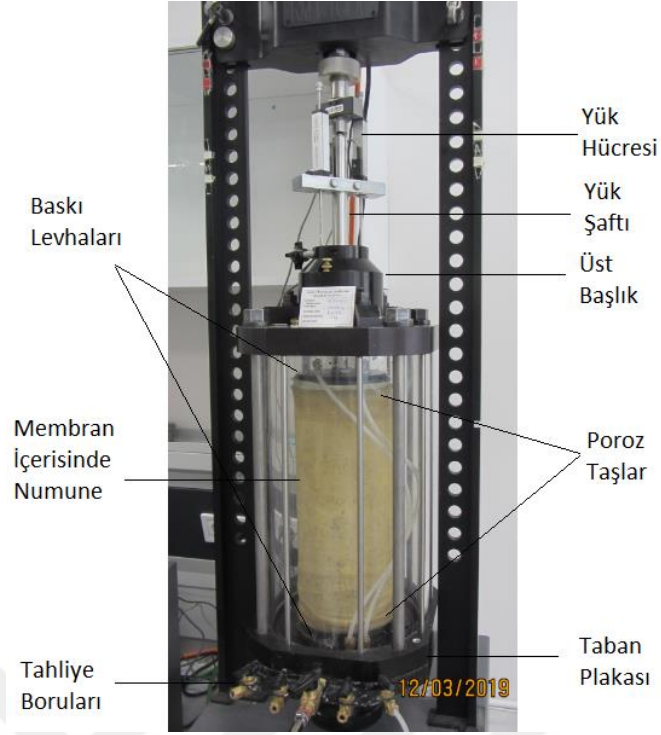
$M_R$  : Esneklik modülü

$\sigma_d$  : Deviator gerilme

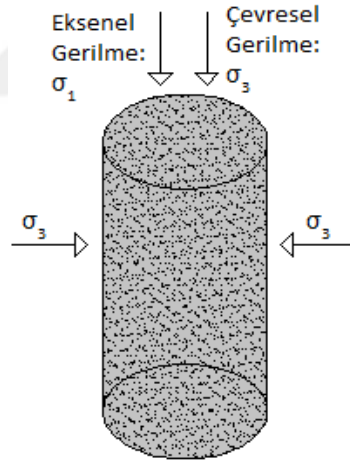
$\epsilon_r$  : Esnek birim şekil değiştirme (eksenel)

Yük uygulama süresi için 0,1 s, dinlenme süresi için 0,9 s tavsiye edilmiştir (AASHTO T 307-99, 2012). Bu 0,1 s'lik süre ortalama 70 km/sa hızla seyreden bir aracın dingil yükünün, yolun 70 cm derinliğindeki bir noktaya etkime süresini temsil etmektedir (Uz, 2012).

Şekil 2.11'de üç eksenli esneklik modülü deney şeması ve Şekil 2.12'de deney esnasında numunede meydana gelen gerilmeler görülmektedir.

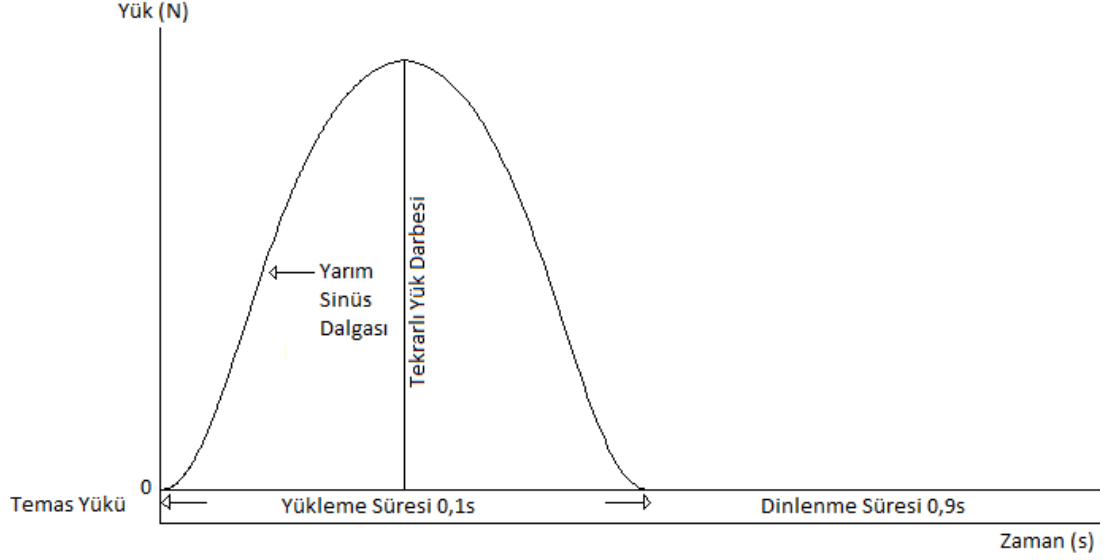


Şekil 2.11. Üç eksenli deney hücresi



Şekil 2.12. Esneklik modülü deneyi sırasında oluşan gerilme durumu

Eksenel yöndeki tekrarlı yükler için standartlarda önerilen şekil, yarım sinüs dalgası  $(1-\cos\theta)/2$  şeklindedir (Şekil 2.13) Burada maksimum eksenel yük, tekrarlı yük ile temas yükünün toplamından oluşmaktadır. Temas yükü maksimum yükün %10'u mertebesinde (AASHTO T 307-99, 2012; Yılmaz vd., 2008). Temas yükü, numune başlığı ile numune arasındaki pozitif teması korumak için bir numuneye uygulanan eksenel yüklemidir (Kim ve Labuz, 2007).



Şekil 2.13. Yarım sinüs dalgası şeklinde tekrarlı yükleme ve dinlenme periyodu

### 2.8.1. Gerilmeye bağlı esneklik modülü tahmini

Üstyapıya etkiyen asal gerilmelerin toplamı olan  $\Theta$  (bulk stress-toplam gerilme) numuneye etkiyen gerilmelerin mertebesini en iyi biçimde belirler (Yılmaz vd., 2008). Esneklik modülünün yükleme nedeniyle oluşan gerilmelere bağlı değişimini gösteren Hicks ve Monismith (1971) tarafından geliştirilen  $K - \Theta$  (toplam gerilme modeli) modeli Denklem (2.3)'deki gibidir, toplam gerilme'nin bulunuşu Denklem (2.4)'deki gibidir (Öcal, 2014).

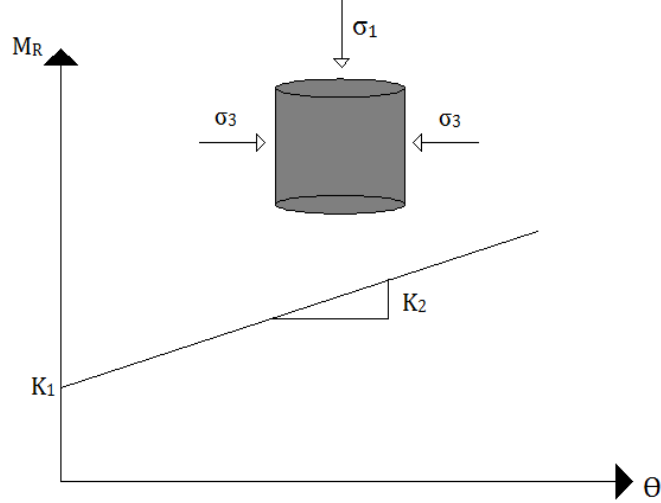
$$M_R = K_1 \cdot (\Theta)^{K_2} \quad (2.3)$$

$$\Theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = \sigma_1 + 2\sigma_3 = 3\sigma_3 + \sigma_d \quad (2.4)$$

Burada;

$\Theta$  (bulk stress-toplam gerilme),  $K_1$  (psi) 1 psi toplam gerilmeye karşılık gelen esneklik modülü ve eğilim çizgisinin eğimi de  $K_2$  değeridir (Şekil 2.14) (Öcal, 2014).

$K_2$  parametresi malzemenin gerilmeye bağlı davranışını temsil eder ve kürlle birlikte artar (Fedrigo vd., 2018).



Şekil 2.14. Esneklik modülü-toplam gerilme ilişkisi

## 2.9. Tabaka (İzafi Mukavemet) Katsayısı (a)

Tabaka kalınlıklarının belirlenmesi esnek kaplama tasarımının son amacıdır. Tabaka kalınlıklarının fazla veya az öngörülmesi olumsuz ekonomik etkilere ve üstyapının kalan ömründe azalmaya neden olmaktadır (Kök ve Kuloğlu, 2007). Gerçek tabaka kalınlığını üstyapı sayısına (SN) dönüştürmek için, üstyapıdaki her tabakaya bir değer atanmıştır. Bu tabaka katsayısı, SN ve kalınlık arasındaki ampirik ilişkiyi ifade eder ve malzemenin üstyapının yapısal bir bileşeni olarak işlev görebilme yeteneğinin bir ölçüsüdür (Bahia vd., 2000).

Üstyapı katmanları tabaka katsayısı değer ve formülleri aşağıdaki gibidir (AASHTO, 1993; Kök, 2008):

Asfalt betonu aşınma tabakası izafi mukavemet katsayısı;  $a: 0,42$

Asfalt betonu binder tabakası izafi mukavemet katsayısı;  $a: 0,40$

Bitümlü temel tabakası izafi mukavemet katsayısı;

$$a: 0,249 \times \log E_{BS} - 0,977 \quad (2.11)$$

Granüler temel tabakası izafi mukavemet katsayısı;

$$a: 0,249 \times \log E_{BS} - 0,977 \quad (2.12)$$



Granüler alt temel tabakası izafi mukavemet katsayısı;

$$a: 0,227 \times \log E_{SB} - 0,839 \quad (2.13)$$

$E_{BS}$  : Psi cinsinden bitümlü ve granüler temel tabakaları elastisite modülü

$E_{SB}$  : Alttemel tabakası elastisite modülü

Literatürde KBSM esneklik modülü ve tabaka katsayısı için farklı görüşler mevcuttur. KBSM esneklik modülü için 500 MPa ila 4.000 MPa arasında kabul edilen farklı yaklaşımlar (Austroads, 2011) bulunmaktadır. Wirtgen (2012) tarafından %100 RAP malzemeyle üretilen KBSM için 1.000-2.000 MPa değeri önerilmiştir. Schwartz ve Khosravifar (2013) KBST için 0,3-0,35 aralığında tabaka katsayısı önermişlerdir. Tia ve Wood (1983) ve Kim vd. (2006) tarafından köpük bitümle yerinde soğuk geri dönüşüm tabaka katsayısının 0,25 ila 0,40 arasında değiştiği aktarılmıştır.

Asphalt Academy (2009) ve Wirtgen (2012), emülsiyon ya da köpük bitümle oluşturulmuş stabilize malzemeleri aşağıda açıklandığı şekilde 3 kategoriye ayırmış ve bu malzemeler için Çizelge 2.5'de verilen sınır değerleri önermişlerdir.

BSM1: Bu malzeme yüksek bir kesme dayanımına sahiptir ve tipik olarak 6 MESA (6 milyon eşdeğer standart dingil)'dan daha fazla tasarım trafiği için bir temel katmanı olarak kullanılır. Bu malzeme sınıfı için, kaynak malzeme tipik olarak iyi derecelendirilmiş kırmataş veya geri kazanılmış asfalttır.

BSM2: Bu malzeme orta derecede kesme dayanımına sahiptir ve tipik olarak 6 MESA'dan düşük trafik uygulamaları için bir temel katmanı olarak kullanılır. Bu malzeme sınıfı için, kaynak malzeme tipik olarak derecelendirilmiş bir doğal çakıl veya RA olacaktır.

BSM3: Bu malzeme tipik olarak daha yüksek bitüm içeriği ile stabilize edilmiş zemin-çakıl ve/veya kumdan oluşur. Temel katmanı olarak, malzeme sadece 1 MESA'dan daha düşük tasarım trafik uygulamaları için uygundur.

Çizelge 2.5. BSM için önerilen yapısal tabaka katsayıları (Wirtgen, 2012)

İnç başına yapısal tabaka katsayısı	0,18-0,23	0,23-0,28	0,28-0,35
Asphalt Academy Sınıflandırması	BSM3	BSM2	BSM1
Stabilizasyon sonrası malzeme özellikleri			
100 mm çapında İÇM <sub>kuru</sub> (kPa)	125	175	225
Stabilizasyon öncesi malzeme CBR değeri (%20 altı CBR önerilmez)	20	40	80
Stabilizasyon için beklenen bitüm uygulama oranı (kütlece %)	2,5-4	2,3-3	2-2,5

Esneklik modülü ve tabaka katsayısı değerlerine literatürde geniş bir aralıkta rastlanılmasının nedeni; geri kazanılan malzemenin derinliği ve buna bağlı olarak içeriğine giren malzemenin çeşitliliği, kullanılan yeni bitüm ve hidrolik bağlayıcı miktarı, farklı kür ve sıkıştırma prosedürleridir.

## 2.10. Sürdürülebilirlik

Sürdürülebilirlik kelimesi, yenilenebilir yakıt kaynaklarını kullanmayı, karbon emisyonlarını azaltmayı, çevreyi korumayı ve gezegenimizin hassas ekosistemlerini dengede tutmanın yollarını düşündürmektedir. Brundtland Komisyonu tarafından sürdürülebilirlik, 'gelecek nesillerin kendi ihtiyaçlarını karşılayabilme kabiliyetinden ödün vermeden günümüzün ihtiyaçlarını karşılayan bir gelişme' olarak nitelendirilmiştir (Environmental Science, 2017).

Sürdürülebilirlik kavramı, yaşamın neredeyse her yönünü kapsayacak kadar geniştir. Birçok endüstri gelecek nesillerin yaşam kalitesini güvence altına almak için en iyi uygulamaları kullanmaktadır. Asfalt endüstrisi de buna dahildir (Almeida vd., 2016). Birçok aşamada; asfalt üretimi, serimi ve birçok farklı uygulamada sürdürülebilirliği katkıda bulunabilir (EAPA, 2015; Almeida vd., 2016).

Günümüzde karayolu taşımacılığı, diğer ulaştırma modlarına kıyasla hakim durumdadır. Karayolu taşımacılığı, küresel karbondioksit emisyonlarının yaklaşık %20'sinden fazlasını oluşturmaktadır (Uherek vd., 2010; Turk vd., 2016).

Yüksek sıcaklıklar yüksek enerji kullanımı gerektirir ve CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> ve NO<sub>x</sub> gibi yüksek emisyonlara ve ayrıca çevreye ve işçilerin sağlığına tehdit oluşturan aerosollere yol açar (Woszuk vd., 2017). Kar vd. (2018)'e göre, karışım üretim sıcaklığındaki her 10°C'lik artış için sera gazı emisyonları iki kat artmaktadır.

Hammadde ve enerji kullanımının yoğun olduğu sektörlerde çevresel etkilerin oluşması kaçınılmazdır. Önemli olan, çevresel açıdan gerekli teknik, hukuki ve idari önlemlerin alınmasıdır (Ceylan, 2009). 2872 Sayılı Çevre Kanunu; bütün canlıların ortak değeri olan çevrenin korunması, iyileştirilmesi; kırsal ve kentsel alanda arazinin ve doğal kaynakların en uygun şekilde kullanılması ve korunması; su, toprak ve hava kirliliğinin önlenmesi; ülkenin bitki ve hayvan varlığı ile doğal ve tarihsel zenginliklerinin korunarak, bugünkü ve gelecek kuşakların sağlık, uygarlık ve yaşam düzeyinin geliştirilmesi ve güvence altına alınması için yapılacak düzenlemeleri ve alınacak önlemleri, ekonomik ve sosyal kalkınma hedefleriyle uyumlu olarak belirli hukuki ve teknik esaslara göre düzenlemeler getirmiştir (Anonim, 1983; Ceylan, 2009).

Karayolları Genel Müdürlüğü'nün stratejik hedefleri arasında da çevre ve sürdürülebilirliğe ilişkin aşağıdaki maddeler bulunmaktadır:

- İnsan ve çevreye duyarlı, sürdürülebilir yolların artırılmasına ilişkin araştırma ve dizayn çalışmaları sürdürülecektir.
- Karayolu kaynaklı çevresel etkileri azaltıcı, enerji verimliliği sağlayan, tarihi ve kültürel varlıkları koruyan çalışmalar yapmak.
- Üstyapı Projelendirme sürecinde geri dönüşüm malzemelerinin kullanılmasına öncelik verilecektir (KGM, 2017).

### **2.11. Tez Çalışmasıyla İlgili Dünyada ve Ülkemizde Yapılmış Bazı Çalışmalar**

Romeo vd. (2018) tarafından aktif fillerlerin bitümlerle stabilize karışımlar üzerindeki etkisini değerlendirmek için bir çalışma yapılmıştır. Floransa yakınlarındaki bir yol inşaatında üç ardışık deneysel bölüm inşa etmek için,

%100 RAP agregaları, farklı filler karışımları (çimento, kireç ve ortak filler maddesi) ve stabilizasyon maddeleri olarak bitüm emülsiyonu veya köpük bitümden oluşan dokuz tip stabilize edilmiş karışım kullanılmıştır. Deneme bölümlerinden alınan karotlar, yarı-rijit malzemeler için geliştirilen Superpave dolaylı çekme dayanımı testi prosedürüne göre test edilmiştir. Sonuçlara göre, aktif filler maddelerinin varlığının karışımların çekme dayanımını iyileştirdiğini, gerilme dayanımını bir miktar artırdığı sonucuna ulaşılmıştır. Aktif filler içeren karışımlarda ilk kırılma ve önemli hasar çoğunlukla daha bölgesel olmuştur, bu da aktif fillerlerin gerilmenin bir kısmını taşıyarak ve tekrar dağıtarak aşırı hasarlanabilecek bölgeleri azalttığı sonucunu doğurmuştur. %1 oranında çimento, %2 oranında sönmüş kireç ve %1,5 oranında geleneksel filler içeren karışımlar, diğer bütün karışımlar arasında en iyi çatlama direncini göstermiştir; %1'i aşmayan çimento, %2 veya daha fazla kireç, bitümle stabilize edilmiş karışımlar için optimum filler oranları olarak gösterilmiştir.

Fu vd. (2010) ve Jones vd. (2008) tarafından yapılan çalışmalarda; köpük bitüm ve portland çimentosu ilave edilmesinin, agrega parçacıklarının bağlanmasına yardım ettiği, ancak rollerinin birbirleriyle aynı değil birbirlerini tamamlayıcı olduğu belirtilmiştir. Çalışmalara göre; çimento ile oluşturulan bağlar, daha zayıf fakat daha sünek olan köpük bitüm bağlarıyla karşılaştırıldığında güçlü ama kırılmandır. Portland çimentosunun neme duyarlılığı azalttığı, erken ve aynı zamanda uzun süreli dayanımı artırdığı, köpük bitümün ise karışımların esnekliğini artırdığı belirtilmiştir.

Dong vd. (2017) tarafından; üç yaşlandırma aşamasında köpük asfaltın mikroyapısını belirlemek için FTIR (Fourier transforms infrared spectroscopy) spektroskopisi kullanılmıştır. Çalışma bulguları şu şekildedir: Köpürme suyunun eklenmesi; oturma direnci, ZSV (60°C'de sıfır kesme viskozitesi), düşük sıcaklık performansı ve asfaltın yorulma direncini olumsuz etkiler. Köpürme suyu içeriği %1,0 olduğunda, köpürme suyu asfaltın yaşlanma direncini artırabilirken, köpürme suyu içeriği %2,0'den fazla olduğunda asfaltın yaşlanma direncini düşecektir. Başka bir deyişle, köpürme suyu ilavesinin asfaltın

yaşlanma derecesini hızlandırdığı ve asfaltın yaşlanması üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olduğu bulunmuştur.

Seferoğlu vd. (2015)'ne göre; karışımda RAP içeriği arttıkça içeriğindeki bitümün karışıma verdiği yapışkanlık nedeniyle malzeme kolay sıkışır ve buna bağlı optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlık azalır.

Seferoğlu vd. (2015) yaptıkları deneysel çalışmalar sonucunda; %100 RAP malzemesi için CBR değerini %26 bulmuş, %30RAP-%70Agrega karışımının CBR değerini %90 bulmuş, tamamen agregadan yapılan üretimin ise %143 CBR değeri verdiği belirtilmiştir.

Alam vd. (2010) ve Hasan vd. (2018)'de temel malzemelerdeki RAP içeriği arttıkça esneklik modülü değerinin de artacağı belirtilmiştir. Wu (2011) ve Hasan vd. (2018)'e göre; doğal agregaya RAP eklenmesi, sadece esneklik modülünü arttırmakla kalmayıp, aynı zamanda belirli koşullar altında oturma potansiyelini de iyileştirmektedir.

Köpük asfalt ve bitüm emülsiyonu ile üretilen soğuk karışımların dinamik özelliklerinin kıyaslandığı Yan vd. (2010) tarafından hazırlanan makalede şu sonuçlar elde edilmiştir; köpük numuneleri esnek formda kaldıkları için düşük gerilme seviyesinde daha yüksek bir yorulma ömrü sergilemişlerdir, daha az visko elastik davranış göstermiş ve yarı-rijit bir malzemeye daha yakın davranmışlardır. Emülsiyon numuneleri, 200 kPa ve 300 kPa gerilme seviyelerinde köpük numunelerden daha uzun yorulma ömrüne sahiptir. Bu durum, karışıma esneklik sağlayan RAP parçacıklarının homojen şekilde bitümlle kaplanmasına dayandırılmıştır. Yazarlar, soğuk köpük bitümlü karışımların temel tabakası, soğuk emülsiyon karışımlarının ise yüzeye daha yakın bağlayıcı bir katman olarak kullanılmasını tavsiye etmişlerdir.

Romanoschi vd. (2003), köpük asfalt ile stabilize edilmiş temellerin tipik bir üstyapıdaki yapısal katkısını tahmin etmek için yaptıkları çalışmada; üçü köpük asfalt ile stabilize temel ve biri geleneksel kırmataş temel dört üstyapı test

bölümü hazırlamışlardır. Bu test bölümlerinin hızlandırılmış yük uygulamadan önce Düşen Ağırlık Deflektometre (FWD) testleri yapılmış, tabaka katsayıları defleksiyon verilerinden geri hesaplanmış ve sonuçlar, köpük asfalt ile stabilize FDR (tam derinlikten geri kazanım) temel malzemelerinin tahmini yapısal tabaka katsayısının 0.18 olduğunu göstermiştir.

Papavasiliou ve Loizos (2013) çalışmalarında; %2,5 köpük bitüm ve %1 çimento karışımı kullanılarak hazırlanan numunelerin İÇM değerlerini 280-498 kPa (kuru) ve 225-469 kPa (ıslak) bulmuşlardır. Numunelerin kuru yoğunluk değerlerinin 2007 ile 2183 kg/m<sup>3</sup> arasında değiştiğini belirtmişlerdir.

Khosravifar vd. (2015)'nin çalışmalarına göre; FASB'ın mekanik özellikleri ve davranışları sahada uygulama ve külden büyük ölçüde etkilenmektedir. Uygun tasarım ve uygulama yapıldığında, FASB'ın yapısal kapasitesi granüler agrega temel ve sıcak karışım asfalt arasında bir yerde bulunmaktadır. Bu nedenle FASB'ın, GAB yerine kullanılmasının, üstyapı bölümünün gerekli kalınlığı azaltılabileceği ve bu durumun geri kazanım faydalarına ek olarak maliyet tasarrufu sağlayacağı belirtilmiştir.

Sakr ve Manke (1985), köpük asfalt karışımlarının stabilitesi için agrega kenetlenmesinin çok önemli bir rolü olduğunu vurgulamışlardır. Sıcak karışımlarda her agrega tanesinin bireysel olarak ince bitüm filmiyle kaplanması ve bu parçacıklar arasında oluşan sıcaklığa duyarlı bağlar nedeniyle köpük bitümlü karışımların davranışının sıcak-karışım asfalttan farklı olduğunu belirtmişlerdir. Bu durum köpük asfalt karışımlarının sıcak karışımlar kadar sıcaklığa karşı hassas olmadığı ve köpük asfalt için viskozitenin çok kritik olmadığını göstermektedir. Ayrıca çalışmada, ince agregaların açısallığının, köpük stabilizasyonun uygunluğu için mükemmel bir gösterge olduğunu belirtilmiştir.

Fu vd. (2009) tarafından yapılan çalışmada; üç eksenli esneklik modülü (TxRM) test sonuçları, köpük asfalt uygulamasının ıslak veya kuru koşullarda, esneklik modülü değerlerini her zaman artırmadığını göstermiştir. Köpük asfaltın ana

rolü malzeme davranışını tipik granüler malzemeden kısmen asfaltla bağlı malzemeye dönüştürmektir. Bu dönüşüm RAP malzemesinin bazı özelliklerinden etkilenmiştir. Daha kaba yüzey dokusuna sahip RAP malzemelerinin, üç eksenli gerilme durumlarında köpük asfalt stabilizasyonundan daha az etkilendiği görülmüştür.

Guatimosim vd. (2018); hem sahadaki hem de laboratuvardaki köpük bitümle stabilize malzeme davranışını, düşen ağırlık deflektometre verilerinden geri hesaplanan ve üç eksenli testten bulunan esneklik modülü değerlerini karşılaştırarak değerlendirmiştir. Ayrıca laboratuvar testleri, malzemeyi sınırlamanın (çevresel basınç) etkisini ve köpükle stabilize malzemeler ile granüler malzemeler arasındaki benzerlikleri analiz etmek amacıyla yapılmıştır. Mevcut üstyapıda granüler temel tabakası üzerinde bulunan 20 cm kalınlığındaki çimento stabilize temel ve onun üzerindeki 16 cm kalınlığındaki sıcak karışıma karşılık olarak bu tabakalar geri dönüştürülmüş ve 34 cm kalınlığında bir bitümle stabilize malzeme ve üzerine 2 cm kalınlığında sıcak karışım getirilmiştir.

Guatimosim vd. (2018) çalışmaları kapsamında şunları bulmuşlardır: Köpük asfaltla soğuk geri dönüşüm karışımı, sürekli bağlı olmayan yapısı nedeniyle granüler malzemeler gibi davranmaktadır ancak daha yüksek kohezyon özelliğine sahiptir ve malzemenin rijitliğinde çevresel gerilmelerin etkisi vardır. Nem içeriği, malzemelerin gerilme bağımlılığı üzerinde önemli bir etki göstermiştir. Kür olayı, esas olarak nem azaltma işlemi temsil etse de hem filler hem de kırılmış CTB'nin hidrolik bağlayıcı olmasından kaynaklanan iç kimyasal reaksiyonlar üzerinde bir miktar etkiye sahip olabilir. Bir BSM tabakası ilk günlerinde kritik durumdadır, özellikle erken bir aşamada trafiğe açıldığında daha yüksek nem içeriği kalıcı deformasyona yatkınlığı beraberinde getirir.

Caltrans (2018)'a göre; ömür döngü maliyet analizi 40 yıllık bir üstyapı tasarım ömrünün daha uygun maliyetli olduğunu göstermedikçe, tam derinlikten köpük bitümle geri kazanım pojeleleri en az 20 yıllık bir üstyapı tasarım ömrü ile

tasarlanmalıdır. Altındaki granüler malzeme yeterli kalitede ise, gerekli sıcak karışım tabakası kalınlığını azaltmak için FDR-FA (köpük bitümlü tam derinlikten geri kazanım) kalınlığını artırmak maliyet açısından daha uygundur. Ancak FDR-FA tekniği orta ve düşük hacimli yollar için daha uygundur.

Zhang vd. (2018) çalışmaları sonucunda aşağıdaki önerileri sunmaktadırlar: FACRM (köpük asfalt soğuk geri dönüşüm karışımları), bir üstyapının erken hasarlanmasını etkili bir şekilde azaltabilir, özellikle çatlak oluşumunu. Düşük trafik hacmi için, tek yönde kümülatif standart dingil yükü  $< 3 \times 10^6$  ise FACRM üstyapının temeli olarak kullanılabilir, orta veya daha yüksek trafik yükleri için, üstyapı temeli görevinin yarı rijit bir temelle kompozit bir yapı oluşturarak karşılanması önerilmektedir (Çizelge 2.6.).

Çizelge 2.6. Köpük asfaltla soğuk geri kazanım karışımlarının önerilen yapısı (Zhang vd., 2018)

Eksenel yük seviyesi	Hafif trafik (toplam standart aks yükü $\leq 3 \times 10^6$ /şerit)	Ağır trafik (toplam standart aks yükü $\geq 3 \times 10^6$ /şerit)
Yapısal tabaka	Üstyapı tabakası	Üstyapı tabakası
1	Sıcak asfalt karışım 4-6 cm	Sıcak asfalt karışım > 6 cm
2	FACRM 14-20 cm	FACRM 14-25 cm
3	Kireç-uçucu kül karışimli temel 0 cm	Kireç-uçucu kül karışimli temel 18-25 cm
4	Taban zemini $\geq 100$ MPa	Taban zemini $\geq 40$ MPa

Ülkemizde Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından yapılan Kızılcahamam-Gerede yolu deneme kesiminde 3,5 km'lik ömrünü tamamlamış BSK kaplamalı kesimde köpük bitümlü yerinde soğuk geri kazanım uygulaması yapılmış ve önerilen takviye üstyapı projesiyle maliyet kıyaslanmıştır. Takviye projesi; 10 cm PMT (plent miks temel), 8 cm bitümlü temel, 6 cm binder ve 4 cm TMA (taş mastik asfalt) olarak düşünülmüştür. Soğuk geri dönüşümde ise mevcut yolda PMT üzerindeki 25 cm kalınlığındaki sıcak karışım geri dönüştürülerek yine 25 cm'lik bir tabaka elde edilmiş üzerine 6 cm kalınlığında binder ve 4 cm kalınlığında TMA tabakaları getirilmiştir. Çalışma sonucunda soğuk geri dönüşüm uygulamasıyla takviye projesine göre yaklaşık olarak %25.4 tasarruf elde edildiği belirtilmiştir. Ayrıca deneme kesiminin performansı yapımdan



itibaren takip edilmiş ve ilk yapıldığında geri dönüşüm tabakasının esneklik modülü 91 ksi (627 MPa) ve tabaka katsayısı 0,20 iken, iki yıl sonra esneklik modülü 340 ksi (2.345 MPa) ve tabaka katsayısı 0,31 olarak tespit edilmiştir. Yazarlar, farklı zamanlarda alınan defleksiyon etütlerinde çimentonun prizine bağlı olarak geri dönüşüm tabakasının mukavemetinin zamanla arttığını bulmuşlardır ve yerinde soğuk geri dönüşüm tabaka katsayısının 0,30 alınmasını önermişlerdir (Sağlık vd., 2013).

## **2.12. Ekonomik ve Çevresel Kazançlar**

Xiao vd. (2018) çalışmalarında; CIR (yerinde soğuk geri kazanım) teknolojisinin geleneksel HMA kaplama teknolojisine göre agrega tüketimini %62, sera gazı emisyonlarını %52, sülfür dioksit emisyonlarını %61, nitrik oksit/nitrojen dioksit emisyonlarını %54 azalttığını belirtmişlerdir.

Turk vd. (2016) çalışmalarında, problemlili bir yol kesimi için geleneksel yeniden yapım ve soğuk yerinde geri dönüşüm yöntemlerini uygulamış ve küresel ısınmaya (kgCO<sub>2</sub> eşdeğeri) yeniden yapımın bir miktar daha fazla etki ettiği (çimento işleme aşamaları nedeniyle geri dönüşümde yeniden yapım yöntemine yakın sonuç bulunmuştur), asidifikasyon (kgSO<sub>2</sub> eşdeğeri) açısından yeniden yapım geri dönüşümün yaklaşık 2 katı olumsuz etki yaratmıştır. Enerji tüketimi açısından ise yeniden yapımın soğuk geri dönüşüme göre yaklaşık %40 daha fazla enerji gerektirdiği sonucuna varmışlardır.

Wirtgen (2012)'de üstyapı için 4 farklı rehabilitasyon seçeneği önerilmiş ve tüm seçenekler 30 milyon ESAL (eşdeğer standart dingil yükü) trafik için, ilerleyen yıllarda ihtiyaçları olacak diğer rehabilitasyon seçenekleri de düşünülerek enerji tüketimleri açısından kıyaslanmıştır.

1. Seçenekte hızı ve basit uygulamasıyla öne çıkan sıkıntılı bölgenin 7,5 cm derinliğinde yamanması ve üzerinin 9 cm sıcak karışımla kaplanmasını içerir. Seçenek 2, problemlili kısmın 12,5 cm kalınlığında kazılması, yenilenmesini ve üzerinin 15 cm sıcak karışımla kaplanmasını içerir. Seçenek 3, problemlili

malzemenin 30 cm derinliğinde çimento ile stabilize edilerek tekrar kullanılması ve üzerinin 15 cm kırmataş ve 6,5 cm sıcak karışımla kaplanmasını içerir. Seçenek 4 ise problemlili malzemenin 25 cm derinliğinde bitümle stabilize edilerek tekrar kullanılması ve üzerinin 6,5 cm sıcak karışımla kaplanmasını içerir

Çizelge 2.7'de 4 rehabilitasyon seçeneğinin yapım ve 20 yıl boyunca periyodik bakımları sırasında harcanacak toplam enerji miktarları verilmiştir.

Çizelge 2.7. Kilometre başına enerji tüketimi (GJ) (Wirtgen 2012)

Rehabilitasyon seçeneği	İlk yapım	7. yıl bakım	14. yıl bakım	20. yıl bakım	Toplam enerji
Seçenek 1	1,793	2,996	4,199	7,046	1,462
Seçenek 2	2,847	3,426	4,005	5,798	1,206
Seçenek 3	2,692	3,271	4,474	6,855	1,335
Seçenek 4	2,381	2,960	3,539	4,742	816

Çizelge 2.7'den görüldüğü üzere yerinde bitümle stabilizasyon uzun vadede enerji tüketimi açısından oldukça avantajlı bir yöntemdir.

Salta (2010)'da; 2 şeritli 1 km'lik bir yol için, soğuk yerinde köpük bitümle geri dönüşüm yönteminin geleneksel sıcak kaplama yöntemine göre yaklaşık %50 daha az seragazı (GHG) çıkardığı, %62 daha az agrega tükettiği ve %40 ila %50 arasında daha az maliyet gerektirdiğini belirtilmiştir ve çalışmada soğuk geri dönüşümün sıcak karışım yöntemine göre emisyonlarda azalma meydana getirmesinin temel sebebinin, belli sıcaklıklara ulaşmayan karışımlarda asfalt emisyonu oluşmaması olduğu belirtilmiştir.

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3.1. Numune Temini ve Depolanması

KBSM için uygun gradasyon aralığının belirlenebilmesi amacıyla öncelikle Karayolları tarafından konuyla ilgili olarak daha önce Ankara-Kızılcahamam-Gerede yolunda denenen köpük bitümle stabilize malzemenin bulunduğu üstyapıdan, karot numuneleri alınmıştır (Şekil 3.1). Alınan karotlar laboratuvarında Asfalt Analizatörü ile ayrıştırılarak geri kazanım sırasında ve trafiğe açıldıktan sonra yük altında agregaların çaplarının ne oranda değiştiği tespit edilmiş ve geri dönüşümlü kesimlerin yapıldığı zaman ki gradasyonlarıyla kıyaslanmıştır.



Şekil 3.1. Kızılcahamam-Gerede köpük bitüm deneme yolundan alınan karot numuneleri

Geri dönüştürülmüş malzemelerde, agregaların kalitesi ve bileşimi aşağıdakilere bağlı olarak oldukça değişken olabilir:

- Mevcut üstyapının yapısı (malzemeler ve kalınlıkları)
- Yapım çeşitliliği (malzeme kalitesi ve kalınlığı)
- Geri dönüşüm derinliği
- Üstyapı yaşı
- Mevcut üstyapıda yama ve onarım derecesi (Asphalt Academy, 2009).

Buna istinaden, uygulamada karşılaşılabilecek geri dönüştürülmesi muhtemel farklı gradasyonlu yollar için 9 tip gradasyon belirlenip (Çizelge 3.1) deneyler bu gradasyonlar için yapılarak kıyaslanmıştır.

Çizelge 3.1. Deneylerin gerçekleştirileceği RAP-Agrega karışımlarına ait gradasyon tipleri

Elek Çapı (mm)	Gradasyon Tipi								
	Tip-1	Tip-2	Tip-3	Tip-4	Tip-5	Tip-6	Tip-7	Tip-8	Tip-9
	KK	KN	Kİ	İK	İN	İİ	NN	Kİ (Sathi)	İK (Wirtgen)
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	20	32	45	33	41	50	35	45	33
0,425	8	17	28	9	18	32	20	28	11
0,18	4	11	20	4	12	20	12	20	7
0,075	1,6	6	12	1,6	6	12	6	12	4
Karışım Tipi	%100 RAP	İnce Kırmataş İkame	İnce Kırmataş İkame	100-70-20-0 %RAP	İnce Kırmataş İkame	İnce Kırmataş İkame	%100RAP	%10 RAP	İnce Kırmataş İkame

Ana gradasyon olan Tip 4 (İK-yoldan kazınan malzemenin orijinal gradasyonu) gradasyonu Çizelge 4.2'deki ortalama elek analizi sonuçlarına göre belirlenmiştir. Tip 8, %90 ikame agrega ve %10 RAP ile üretilerek sathi kaplama kazınmasını temsil etmek için hazırlanmıştır.

Tip 9, Çizelge 3.2'de verilen Wirtgen tarafından KBSM için önerilen gradasyona, en az ikame ile İK gradasyonunun uyarlanmış halidir.

Çizelge 3.2. Wirtgen (2012) tarafından önerilen KBSM için ideal gradasyon aralığı

Wirtgen Katalog Değerleri			
Elek (mm)	Kaba	İnce	Orta
50	100	100	100
37,5	87	100	93,5
26,5	76	100	88
19	65	100	82,5
13,2	55	90	72,5
9,5	48	80	64
4,75	35	62	48,5
2,36	25	47	36

Çizelge 3.2. Wirtgen (2012) tarafından önerilen KBSM için ideal gradasyon aralığı (Devam)

Elek (mm)	Kaba	İnce	Orta
1,18	18	36	27
0,6	13	28	20,5
0,425	11	25	18
0,3	9	22	15,5
0,15	6	17	11,5
0,075	4	12	8

Farklı tip gradasyonlara ait karışımlarda yapılacak deneyler için gerekli malzeme miktarı karotlardan belirlenen gradasyon değişimi de göz önüne alınarak yaklaşık 10 ton olarak belirlenmiştir.

Karayolları 4. Bölge Müdürlüğü (Ankara) kontrolünde bulunan Ankara - Polatlı yolu Km: 67+600'den 22 cm derinlikten kazınan yaklaşık 10 ton BSK malzemesi (Şekil 3.2) Karayolları 4. Bölge Müdürlüğü Ar-Ge laboratuvarlarına getirilmiş ve deneysel çalışmalar için depolanmıştır. Yolun üstyapı kesitine göre mevcut yol; 5 cm Aşınma, 7 cm Binder ve 10 cm Bitümlü Temel'den oluşmaktadır. Numune alınırken temel tabakasına girilmemiştir.



Şekil 3.2. Deney numunesi için kazınan yol kesimi

Gradasyon tiplerinin isimleri No.4 eleği altı ve üstünden geçen malzemelerin granülometrisine göre belirlenmiştir. Çizelge 3.1'de görülen; İK gradasyonu Ankara-Polatlı yolundan kazınarak alınan malzemenin orijinal gradasyonudur.

Burada İ; No.4 elek üstü (4,75 mm) malzeme kısmının ince, K; No.4 elek altı malzeme kısmının kaba gradasyona sahip olduğunu belirtmektedir.

Çizelge'de karışım tipi satırında belirtilenler ise kullanılacak tip gradasyonun İK gradasyonuna göre nasıl ikame (yeni agrega kullanılacak mı) edileceğidir.

İK gradasyonunda belirtilen 100-70-20-0 % RAP değerleri de RAP malzemenin bitümden ayrıldıktan sonra % olarak kullanımınıdır. Burada dışarıdan yeni agrega ikamesi değil tamamen RAP malzemenin bitümden ayrıştırılmış kendi agregasıyla ikame yapılmıştır. Örneğin; 20 kodlu karışımda %20 RAP ve %80 bitümden ayrılmış RAP agregası bulunmaktadır. Bu denemelerin amacı; 100 ve 0 kıyaslaması RAP içerisindeki bitümün karışımda bitüm olarak mı yoksa agrega (bitüme ait özelliklerini kaybetmiş) olarak mı davrandığını görmektir. 20 üretimi sathi kaplamanın kazınması durumundaki performansı görmek için ve 70 üretimi kazıma sırasında bitümlü karışımların altına yani temel tabakasına girilmesi durumundaki performansı görmek içindir.

Deneylerde kullanılacak ikame yeni agrega Hisarlıkaya taş ocağından temin edilmiştir. Deneylerde aktif filler olarak; CEM I 42,5 R sınıfı çimento, sönmüş kireç ve Çayırhan Termik Santralinden temin edilen uçucu kül kullanılmıştır. Çimento sınıfının bir önemi olmamakla birlikte bayat olmamasına dikkat edilmelidir. Bitüm olarak Tüpraş-Kırıkkale rafinerisi 50/70, 70/100, 100/150 ve 160/220 sınıfı penetrasyon bitümleri kullanılmıştır.

Öncelikle Ankara-Polatlı yolundan kazınan BSK numunesi, homojen olarak karıştırılmış ve çuvallanmıştır.

Kazınmış BSK, ikame agrega ve asfalt analizatörü ile ayrıştırılan kazınmış BSK agregaları hava kurusu duruma getirilerek KBSM üretiminde kullanılmak üzere elenmiş ve Şekil 3.3'de görüldüğü şekilde elek arabalarında çaplarına göre depolanmıştır.



Şekil 3.3. Elek arabalarında depolanan kazınmış BSK (RAP) numuneleri

Deneylerde kullanılmak üzere RAP malzeme agregası bitümden ayrıştırılmıştır. Bu işlem için asfalt analizatörü kullanılmıştır (Şekil 3.4).



Şekil 3.4. Asfalt analizatörü ve analizatörden çıkan ayrışmış agrega ve filler

Asfalt analizatöründe cihazın kartuşu içerisine bitümü ayrıştırılacak malzeme koyulur ve yaklaşık 35 dakika boyunca ortalama 7 döngü (ayırışma tamamlanana kadar) olacak şekilde malzeme etilenle yıkanır. Bu döngüde filler kartuş (sağ resimde ağzı kapalı) dışında ayrı bir kap (sağ resimde ağzı açık) içerisinde depolanır. Ardından analizatör içerisinde malzeme 15 dakika kadar 170°C'de kurutulur. Daha sonra kartuş ve filler tutucu kap çıkarılıp bitümden ayrışmış malzeme elde edilir.

Şekil 3.5'den görüldüğü üzere, yoldan kazınan numune kalker ve bazalt kökenli agregaların karışımından oluşmaktadır.



Şekil 3.5. Bitümden ayrıştırılmış kazınmış BSK

Çökelen bitüm de cihazın alt kısmındaki musluktan alınarak deneylerde kullanılabilir (Şekil 3.6). Ancak bitüm içerisinde bir miktar etilen kaldığı için destilasyon yöntemiyle etilenin ayrışması gerekir (Şekil 3.7).



Şekil 3.6. Asfalt analizatörü ile ayrıştırılmış eski bitüm



Şekil 3.7. Destilasyon cihazı ve RAP'den elde edilen bitüm



Asfalt analizatöründen çıkan trikloretilenli bitüm cihazın cam aparatına (beher vs.) koyulur. Aparat cihaza takılır ve alt kısmı sıcak yağa (130°C) batırılır ısınan bitüm-etilen karışımından etilen uçar ve arka taraftaki soğutma kısmında yoğunlaşıp sıvılaşır. Cihaza vakum ve çeşme suyu bağlanır. Su, buharlaşan etilen etrafında dolaşır etileni yoğunlaştırıp toplama kabına damlamasını sağlar. Vakum, biriken havayı çeker.

### 3.2. Agrega Deneyleri

Yerinde soğuk geri dönüşüm uygulamasında kullanılan ana malzemenin geri kazanılmış üstyapı olması nedeniyle; bu malzemenin gradasyonu, trafik ve iklim etkisiyle yıpranmışlık ve kirlenmişlik durumu tespit edilmelidir. Bu bağlamda geri kazanılan malzemeye aşağıda verilen fiziksel deneyler uygulanmış olup elde edilen sonuçlar Araştırma Bulguları bölümünde KTŞ (Karayolu Teknik Şartnamesi) bitümlü temel ve plent mix temel sınır değerlerine göre değerlendirilmiştir.

#### 3.2.1. Elek analizi

Deney; ASTM C136 (2014) deney standardına göre yapılır. Bu deney yöntemi ile belli standartlardaki elekler kullanılarak agregaların dane büyüklüğü dağılımı saptanır.

Deney numuneleri, agreganın maksimum dane çapına göre Çizelge 3.3'de verilen miktarlarda agrega yığını temsil edecek şekilde çeyrekleme metodu ya da bölgeç ile alınır ve alınan agregalar 110±5°C'lik sıcaklıkta kurutulur.

Çizelge 3.3. Agrega maksimum boyutuna göre deney numunesi miktarı

Normal maksimum boyut (mm, inç)	Deney numunesi ağırlığı, min (kg)
4,75 (No.4)	0,5
9,5 (3/8)	1
12,5 (1/2)	2
19 (3/4)	5
25 (1)	10
37,5 (1 1/2)	15

Kurutulmuş numune tartıldıktan sonra No.200 elekten yıkanır (No.200 eleğin yıpranmaması için üzerine No.80 ya da No.40 elek yerleştirilir). Yıkanan numune 110±5°C'lik etüvde kurutulur. Malzemenin %100'nün geçtiği eleklerden başlamak üzere alt eleklerden ayrı ayrı elenir. Her elek üzerinde kalanlar kümülatif (toplu olarak) tartılır. Tartımlar elek analizi formuna geçilir. Rutubeti giderilmiş numune ağırlığı kullanılarak her elek üzerinde kalan miktarların yüzdesi ve daha sonra % geçen miktarları hesaplanır.

Şekil 3.8'de kullanılan elek seti Şekil 3.9'da otomatik eleme makinası, Şekil 3.10'da eleme için numune alımı ve Şekil 3.11'de malzemenin elenmesi görülmektedir.



Şekil 3.8. Deneysel olarak kullanılan çaplarına göre sıralanmış elek seti



Şekil 3.9. Deneysel olarak kullanılan otomatik elek makinesi



Şekil 3.10. Elek analizi için çeyrekleme (dörtleme) yöntemi ve bölgeçe numune alınması



Şekil 3.11. Malzemenin elenmesi

Yurt dışında çoğu kurum maksimum RAP dane boyutunu 1,5 inç (40 mm) ile sınırlamıştır. Daha büyük boyutta malzeme kullanımı; karışımın segregasyona uğramasına, aşırı boşluk nedeniyle, permeabilitenin artmasına ve tabakanın serme-sıkıştırılmasının zorlaşmasına sebep olabilmektedir (Seferoğlu vd., 2017).

### 3.2.2. Los Angeles aşınma deneyi

Aşınma direnci, agregaların önemli bir özelliğidir. Agregaların aşınma direnci genellikle Los Angeles test makinesi kullanılarak test edilir (Şekil 3.12). Test, kaya parçacıkları arasındaki sürtünmeden dolayı ve ayrıca çelik küreler

tarafından darbe ve ezilme nedeniyle agreganın aşınmaya karşı direncini ölçer (Kahraman ve Fener, 2007).

Deney, ASTM C 131 (2006) deney standardına göre yapılmıştır. 19-25 mm arası dane çapına sahip agregalardan 2.500 g, 9,5-12,5 mm arası dane çapına sahip agregalardan 2.500 g elenerek yıkanır ve 110°C etüvde sabit ağırlığa gelinceye kadar kurutulur.



Şekil 3.12. Los Angeles aşındırma cihazı

Daha sonra toplam 5.000 g numune 11 adet standart çelik küre (Şekil 3.13) ile beraber Los Angeles makinesine atılır (Şekil 3.14), dakikada 30-33 devir olacak şekilde makineye 500 devir yaptırılır (Köfteci, 2017).



Şekil 3.13. Deneyde kullanılan 45-49 mm çapında ve toplam 4690-4890 g ağırlığındaki bilyeler



Şekil 3.14. Deney öncesi tambur içindeki malzeme ve bilyeler

Gerekli devir tamamlandıktan sonra numuneler makineden çıkarılır, 1,70 mm elekten elenir, elek üstünde kalan malzeme yıkanır ve 110°C etüvde sabit ağırlığa gelinceye kadar kurutulur. Aşınma kaybı Denklem (3.1) ile hesaplanmaktadır.

$$\text{Aşınma Kaybı Yüzdesi} = 100 \cdot (G_1 - G_2) / G_1 \quad (3.1)$$

Burada;

G<sub>1</sub>: numunenin kuru ilk ağırlığı (g)

G<sub>2</sub>: numunenin kuru son ağırlığı (g)

### 3.2.3. Hava tesirlerine karşı dayanım deneyi (donma deneyi)

Bu deney, uzun zaman hava tesirleri altında kalan agregaların donma ve çözülmeye karşı mukavemetlerinin ölçülmesinde kullanılan çabuklaştırılmış bir deneydir. Deneyde Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (Sodyum sülfat) ve MgSO<sub>4</sub> (magnezyum sülfat) çözeltileri kullanılabilir. Deney No.4 elek üzerinde kalan agregaya 5 donma-çözülme periyodu uygulanarak yapılır ve bu periyotlar sonunda oluşan kayıp yüzdesi hesaplanır. Agregaya üzerinde oluşturulan etki, gerçek hayatta oluşan yaklaşık 500 donma ve çözülme olayına denktir (Orhan, 2012).

TS EN 1367-2 (2010)'ye göre, 10-14 mm aralığında dane çapına sahip olan agregalardan, deneyi yapılacak üstyapı tabakasını temsil eden her elek aralığı

için şartnamede belirtilen miktarlarda agrega alınır, yıkanır (Şekil 3.15) ve 110°C sıcaklıkta sabit ağırlığa gelinceye kadar kurutulur, ağırlığı tartılır ve tel sepete koyulur (Köfteci, 2017).



Şekil 3.15. Bitümden ayrıştırılmış agregaların hava tesirlerine dayanıklılık testi için yıkanması

Hazırlanan magnezyum sülfat çözeltisinin içerisine sepetle beraber agregalar yerleştirilir (Şekil 3.16). Agregaların üstü, en az 2 cm çözelti ile kaplanmalıdır. Agregalar, çözeltinin sıcaklığı  $20\pm 2^\circ\text{C}$  olacak şekilde, çözelti içinde  $17\pm 0,5$  saat bekletilir. Bu süre sonunda agregalar çözüldükten sonra 110°C etüvde 24 saat bekletilir (Köfteci, 2017).



Şekil 3.16. Tel sepetteki agregaların magnezyum sülfat çözeltisine koyulması

Daha sonra, donma çözülme periyodu beş defa tekrarlanır. Beşinci işlemin sonucunda agregalar yıkanır, kurutulur ve tartılır. 10 mm'lik elekten elenir ve elek üstünde kalan agregaların ağırlıkları tartılır. Agregalarda meydana gelen ağırlık kaybı Denklem (3.2)'e göre hesaplanır (Köfteci, 2017).

$$\text{Ağırlık Kaybı} = 100 \cdot (\text{AG}_1 - \text{AG}_2) / \text{AG}_1 \quad (3.2)$$

Burada;

AG<sub>1</sub>: numunenin kuru ilk ağırlığı (g)

AG<sub>2</sub>: numunenin elek üstünde kalan ağırlığı (g)

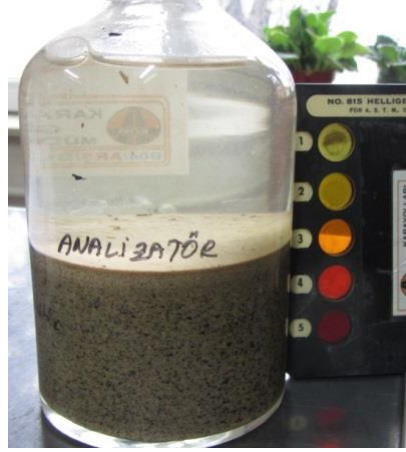
### 3.2.4. Organik madde tayini deneyi

Hayvansal ve bitkisel atıkların çürümesi ile oluşan zararlı maddeler organik madde olarak adlandırılır (Seren, 2015).

TS EN 1744-1+A1 standartına göre yapılan deneyle; numunenin sodyum hidroksit çözeltisinde bekletildiği zaman oluşan renkten agrega içerisinde organik madde bulunup bulunmadığı tayin edilir. 1 lt su içerisinde 30 gr NaOH (Sodyum Hidroksit) çözülerek %3'lük NaOH çözeltisi hazırlanır. Etüvde kurutulan numune 4 mm göz açıklı elekten elenir. Cam bir şişeye 80 mm yüksekliğe kadar %3'lük NaOH çözeltisi koyulur ve yükseklik 120 mm oluncaya kadar numune eklenir. Hava kabarcıklarının çıkması için çalkalanır ve kapağı sıkıca kapatılarak hızlıca sallanır daha sonra 24 saat beklemeye bırakılır (Şekil 3.17 ve Şekil 3.18). Renk organik madde miktarına göre değişir. 24 saat sonra çözelti berrak ya da açık sarı ise organik madde yoktur, ancak koyu renkli bir çözelti oluştuysa zararlı düzeyde organik madde olduğuna işaret eder.



Şekil 3.17. Sodyum Hidroksit çözeltisinde bekletilmiş RAP numunesi



Şekil 3.18. Sodyum Hidroksit çözeltisinde bekletilmiş bitümü ayrıştırılmış RAP numunesi

### 3.2.5. Metilen mavisi deneyi

Agregalarda bulunabilecek kil, silt gibi zararlı madde olarak isimlendirilen çok ince malzemeler, bitümlü sıcak karışımın performansını olumsuz yönde etkilemektedir. Kaba agreganın temizliği büyük ölçüde doğrudan yıkama ile sağlanabilmektedir. İnce agregada ise, doğrudan yıkama imkânı mevcut olmadığı için, çok ince zararlı madde miktarı ancak metilen mavisi deneyi ile belirlenebilmektedir. TS EN 933-9 (2010) şartnamesinde metilen mavisi deneyi ile 0-2 mm aralığında dane çapına sahip agregalardaki çok ince zararlı madde oranı tespit edilir (Köfteci, 2017).

0-2 mm dane çapında kurutulmuş agregadan 200 g alınarak 500 mL damıtık suya karıştırılır. 5 dk boya ekmeden karıştırılır (600devir/dk). Karışıma 5 mL metilen mavisi çözeltisi eklenerek 1 dk karıştırılır (400devir/dk) sonra çözülden süzgeç kağıdına damlatılır. Damlanın etrafında açık mavi bir hale oluşmuyorsa 5 mL çözelti daha eklenir (hale oluşana kadar bu işleme devam edilir ve her boya ilavesinden sonra 1 dk karıştırılır). Hale oluşuktan sonra boya ilave edilmeden 1-2-3-4-5. dakikalarda tekrar süzgeç kağıdına damlatma yapılır. İlk dört dakikada hale kaybolursa 5 mL daha çözelti eklenir 5 dakikalık süreç tekrarlanır 5. dakikada kaybolursa 2 mL çözelti eklenir ve süreç tekrarlanır. Halenin 5 dk boyunca kaybolmadığı miktarda kalınır (Şekil 3.19).





Şekil 3.19. Metilen mavisi çözeltisi ilavesi ve karıştırma işlemi

Şekil 3.20'den de görüleceği gibi metilen mavisi değeri Denklem (3.3) yardımı ile hesaplanır:

$$MM = 10 \cdot VM / MN \quad (3.3)$$

Burada;

MM: Metilen mavisi değeri (g/kg)

VM: karışıma ilave edilen boya çözeltisinin toplam hacmi (mL)

MN: deney numunesinin ağırlığı (g)



Şekil 3.20. Metilen mavisi deney sonu

### 3.2.6. Kaba agregalar için özgül ağırlık ve su emme (absorpsiyon) deneyi

TS EN 1097-6 standartına göre; No.4-37,5 mm elek arası malzeme yıkanır ve tel sepete koyularak 24 saat bekletilir. Agregalar ve sepet su içerisinde tartılır. Agregalar bir bez üzerine alınır (Şekil 3.21) ve silinerek kuru yüzey suya doymun olarak tartılır. Boş sepet tekrar su içerisinde tartılır. Agregalar etüvde kurutulur. Etüvden çıkartılıp laboratuvar ortamında soğuduktan sonra tartım alınır. Gerekli hesaplamalar aşağıdaki denklemler yardımı ile yapılır.

$$\text{Zahiri özgül ağırlık} = A/(A+D-C) \quad (3.4)$$

$$\text{Hacim özgül ağırlık} = A/(B+D-C) \quad (3.5)$$

$$\text{Su emme \%} = 100*(B-A)/A \quad (3.6)$$

Burada;

Etüvde 24 saat kurutulduktan sonraki tartım (A)

Yüzeyi kuru suya doymun tartım (B)

Su içerisinde tartım (agrega+sepet) (C)

Su içerisinde tartım (boş sepet) (D)



Şekil 3.21. Kuru yüzey suya doymun hale getirilen agregalar

### 3.2.7. İnce agregalar için özgül ağırlık ve su emme deneyi

No.200-No.4 elek arası malzeme yıkanıp etüvde kurutulur. Piknometrenin boş olarak ve içi saf suyla tamamen dolu iken tartılır. Malzeme boş piknometre içine

koyulur (Şekil 3.22) ve üzerine saf su eklenerek hafifçe çalkalanır. 24 saat bekletilir ve tartılır. Malzeme ve su santrifüje koyularak yüksek devirde su ve agrega ayrıştırılır. Sonra santrifüjdeki agreganın tamamı alınır (Şekil 3.23) doygun yüzey olarak tartılır. Sonra 24 saat etüvde kurutulur ve tartılır.



Şekil 3.22. Piknometre içerisinde kuru numune



Şekil 3.23. No.4 elek altı santrifüjden çıkmış malzeme

$$\text{Zahiri özgül ağırlık} = E/(B+E-C) \quad (3.7)$$

$$\text{Hacim özgül ağırlık} = E/(B+D-C) \quad (3.8)$$

$$\text{Su emme \%} = 100*(D-E)/E \quad (3.9)$$

Mineral fillerin (No.200 elek altı malzeme) zahiri özgül ağırlığı ise aşağıdaki eşitlikle bulunur:

$$\text{Zahiri özgül ağırlık} = (C-A)/((B-A)-(D-C)) \quad (3.10)$$

Burada;

Piknometre boş ağırlığı: A

Piknometre+Su ağırlığı: B

Piknometre+Kuru numune ağırlığı: C

Piknometre+numune+su ağırlığı: D

Su emme değerleri özellikle donma bölgelerindeki malzemeler için önemli bir parametredir. Yüksek oranda su emen agregalar donma-çözülme sürecinde parçalanmakta ve granülometrileri değişmektedir (Seren, 2015).

### 3.2.8. Plastisite indeksi deneyi

Plastik limit deneyi, zeminin plastik kıvamda olduğu durumdaki en düşük su içeriğini belirlemek amacı ile yapılmaktadır. Deney TS 1900-1 standardına göre gerçekleştirilir. 40 No'lu elekten (0,425 mm) geçen yaklaşık 20 g numune bir miktar su ile homojen bir kıvama gelene kadar karıştırılıp yoğrulur (Şekil 3.24). Cam bir levha üzerinde, 3 mm çapında silindirik bir çubuk şeklini alana kadar el ile yuvarlanır. 10 cm uzunluğundaki bir silindir şeklini kazandığında, kırılıp çatlama'nın meydana geldiği andaki su içeriği, plastik limit olarak değerlendirilir (Seren, 2015).

Plastisite indeksi değeri plastik limit ve likit limit arasındaki farktır. İçerisinde bitüm varlığı nedeniyle RAP malzeme plastik özellik göstermediği için likit limit deneyi yapılamamıştır. Malzeme non-plastik (plastik değil) olarak kabul edilmiştir.



Şekil 3.24. Plastik limit deneyi için hazırlanan numune

### 3.2.9. Modifiye Proktor deneyi

Kuru birim hacim ağırlığı ile optimum su muhtevası arasındaki ilişki TS 1900-1 Standardına uygun olarak Modifiye proktor deneyi ile belirlenir.

Kalıp ağırlığı ve kalıp + sıkıştırılan numune ağırlığı tartımları alınır. Kalıp çapı 6 inç (15,24) cm, hacmi 2.111 cm<sup>3</sup>, tokmak ağırlığı 4,5 kg, tokmak düşüş yüksekliği 45 cm'dir ve numune 56 darbe ile 5 tabaka olarak sıkıştırılır (Şekil 3.25 ve Şekil 3.26). Bu işlem farklı su yüzdeleri için 5 kez tekrarlanır. Her su yüzdesi için hazırlanan malzemeden yaş olarak numune alınır tartılır ve etüvde bekletilerek ve etüv kurusu tartımı alınır böylece maksimum kuru birim hacim ağırlık-optimum su grafiğini çizilir.



Şekil 3.25. Numunenin modifiye proktor ile sıkıştırılması



Şekil 3.26. Sıkışmış tabaka üzerine malzeme eklenerek yeni tabakanın sıkıştırılması için kalıbın cihaza yerleştirilmesi

Hesaplamalar Denklem 3.11 ve 3.12'deki gibidir.

$$\text{Yaş birim Ağırlık} = \text{yaş ağırlık}/2.111 \quad (3.11)$$

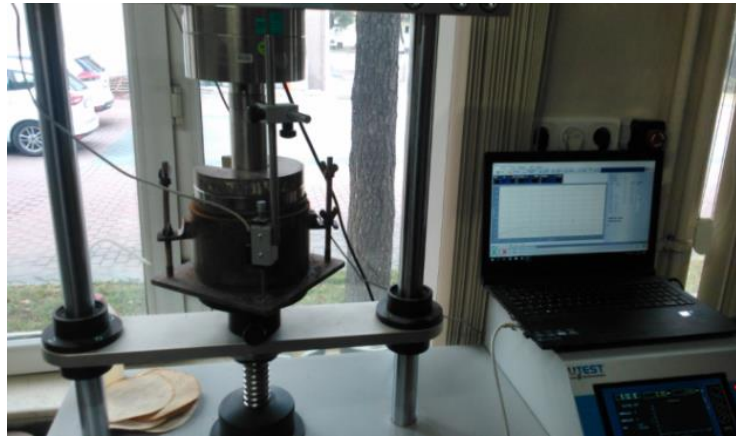
$$\text{Kuru birim ağırlık} = 100 \cdot \text{yaş birim ağırlık} / (100 + \text{numunenin su içeriği}) \quad (3.12)$$

### 3.2.10. CBR deneyi

CBR deneyi (TS 1900-2) için etüvde kurutulan numunelere Modifiye proktor deneyi ile bulunan optimum su miktarı ilave edilmiştir ve modifiye proktordaki prosedür izlenerek CBR numuneleri hazırlanmıştır. Numunler şişme kontrolü için havuzunda bekletilmiştir (Şekil 3.27) ve daha sonra kırılarak yaş CBR değerleri belirlenmiştir (Şekil 3.28). Yaş CBR deneyi numunedeki boşlukların tamamen su ile dolu olduğu en düşük taşıma gücünü saptayabilmek için yapılır.



Şekil 3.27. Suda bekletilen CBR numuneleri



Şekil 3.28. Kırılan CBR numunesi

CBR deneyi, 19,35 cm<sup>2</sup> çapında bir piston ile yüklenen numunede meydana gelen 2,54 mm ve 5,08 mm batma değerlerinde okunan basıncın, uygun gradasyonda standart kırmataştan hazırlanmış numunede aynı batma değerlerini sağlayan basınca oranı olarak tanımlanır.

### 3.3. RAP İçerisindeki Bitümün Aktif Olup Olmadığının Saptanması

RAP numunesi 70°C'de (2-3 saat) bekletilir ve 3 adet 100 mm çapında briket hazırlanır (Şekil 3.29 ve Şekil 3.30). Briketler kalıptan çıkarıldıktan sonra (7-8 saat) 24 saat 25°C su içerisinde şartlandırılır. Daha sonra  $İÇM_{yaş}$  değerlerine bakılır. Eğer ortalama  $İÇM_{yaş}$  değeri 100 kPa'dan büyük ise RAP içerisindeki bitüm aktif kabul edilir (Wirtgen, 2017).



Şekil 3.29. RAP içerisindeki bitümün aktifliğinin kontrolü için briket hazırlanması



Şekil 3.30. Hazırlanan briketin üstten görünüşü

### 3.4. Bitüm Deneyleri

RAP malzemedan elde edilen bitüm ve yeni bitümlerin uygunluğunu değerlendirebilmek için aşağıdaki bitüm deneyleri yapılmıştır.

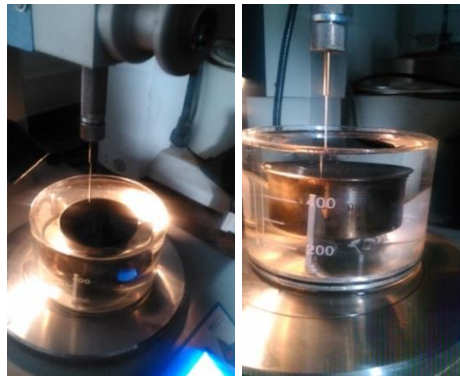
#### 3.4.1. Penetrasyon deneyi

TS EN 1426 standartına göre yapılan penetrasyon deneyi ile bitümlü bağlayıcının sertlik veya kıvamlılığı belirlenir. Standard bir iğnenin belirli bir yük (100 g) altında belirli bir süre (5 s) asfalt çimentosu içine dikey olarak battığı mesafe 0,1 mm cinsinden bulunur. Penetrasyon değeri yükseldikçe bitüm yumuşar. Kıvamlılık arttıkça bitüm sertleşir (Orhan, 2012).

Sıcak bitüm penetrasyon kabına dökülür, oda sıcaklığında soğutulur (1-1,5 saat). Oda sıcaklığına gelen bitüm 25°C'de su banyosuna (Şekil 3.31) koyulur (1-1,5 saat). Daha sonra oturtma kabına numune kabı aynı suyla birlikte alınır. Penetrasyon cihazında 3 kez (üçgen şeklinde) ölçüm alınır (Şekil 3.32). Deney, 2 numune için yapılır ve ortalama alınır.



Şekil 3.31. Su banyosunda bekleyen penetrasyon deney numuneleri



Şekil 3.32. Bitüm penetrasyon deneyi



### 3.4.2. Yumuşama noktası deneyi

Bitümlü bağlayıcının sıcaklığa karşı duyarlılığını ölçmek için (hangi sıcaklıkta bitümün akmaya başladığı) yüzük-bilye yöntemi ile yumuşama noktası olarak ifade edilen sıcaklık değeri belirlenir (Orhan, 2012).

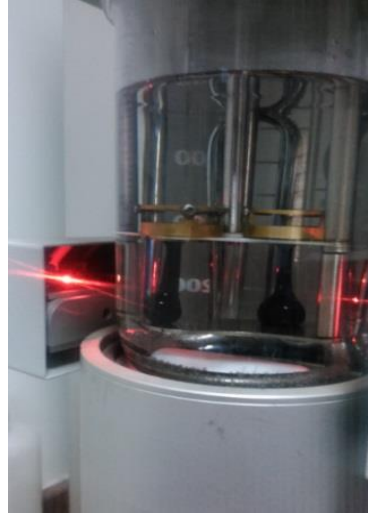
TS EN 1427 standartına göre; ısıtılmış bitüm 2 yüzüğe tepeleme dökülür (Şekil 3.33). Bitüm soğuyunca spatula ve pürmüz yardımıyla yüzüklerin üst sınırını aşan bitümü sıyırılır. Yüzükler cihaza yerleştirilir bilyeler ve bitümün 5°C'ye gelmesi için 5°C'de 15 dk bekletilir (Şekil 3.34), sonra yüzüğün üstünde bilyelerin oturduğu vidalar gevşetilerek bilyelerin bitümle teması sağlanır ve deney başlar. İlk 5 dakikada cihaz suyun ısısını yaklaşık 20°C civarına getirir ve sonra dakikada 5°C artırır. Bilyeler tabana değdiği anda deney tamamlanır (Şekil 3.35).



Şekil 3.33. Bitümün yüzüklere yerleştirilmesi



Şekil 3.34. Yüzüklerin cihaza yerleştirilmesi

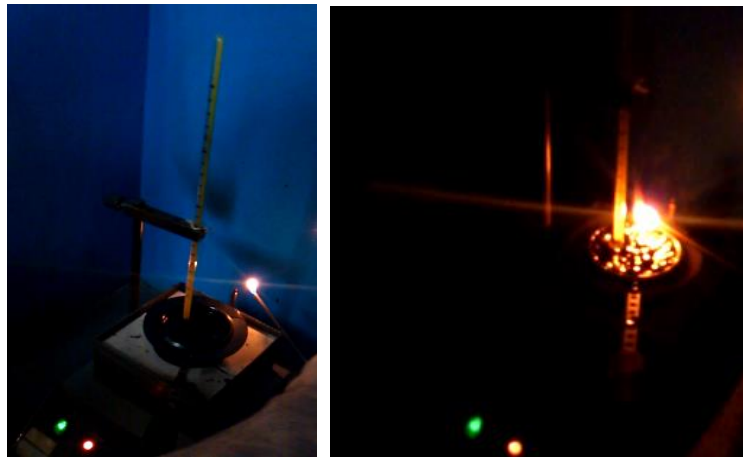


Şekil 3.35. Bilyelerin tabana değmesi ve deneyin sonlanması anı

### 3.4.3. Parlama noktası deneyi

Parlama noktası, bir malzemenin buharının alevle temasında geçici olarak parladığı fakat yanmaya devam etmediği en düşük sıcaklık olarak tanımlanır. Parlama noktası, bitümlü bağlayıcının uygulama sırasında ısıtılırken meydana gelebilecek herhangi bir tutuşma riskini önlemek bakımından önemlidir (Orhan, 2012).

Parlama noktası değeri, asfalt çimentoları ve SC sıvı petrol asfaltlarında Cleveland Açık Kabı ile (Şekil 3.36), MC ve RC sıvı petrol asfaltlarında Tagliabue Kapalı Kabı (15-74°C aralığı için) ile belirlenmektedir (Orhan, 2012).



Şekil 3.36. Parlama noktası deneyi

RAP malzemeden elde edilen bitümden parlama noktası değeri alınamamıştır. İçerisinde kalması muhtemel olan çok ince parçacıklar nedeniyle bitüm parlamadan yanmaya başlamaktadır.

#### 3.4.4. Bitüm özgül ağırlık deneyi

Bitümlü malzemenin özgül ağırlığı 25°C sıcaklıktaki, hacminin havadaki ağırlığının aynı sıcaklık ve aynı hacimdeki havası alınmış destile suyun ağırlığına oranıdır ve piknometre yöntemi ile belirlenir (Orhan, 2012).

TS 1087 standartına göre yapılan deneyde; piknometre boş olarak tartılır. Piknometre saf suyla doldurulup tartılır. Piknometreye 25 mL sıcak bitüm koyulup (Şekil 3.37) 1,5 saat laboratuvar ortamında soğumaya bırakılır ve soğuyunca tartılır. Ağzına kadar saf su doldurulur (Şekil 3.38) ve 25°C su banyosuna koyulur (Şekil 3.39) ve 2 saat kadar bekletilir, çıkartılır ve tartılır. Denklem (3.13) yardımı ile özgül ağırlık bulunur.

$$G_b = (c-a)/((b-a)-(d-c)) \quad (3.13)$$

Burada;

Bitüm özgül ağırlığı:  $G_b$

Piknometre boş ağırlığı:  $a$

Piknometre+su ağırlığı:  $b$

Piknometre+bitüm ağırlığı:  $c$

Piknometre+bitüm+su ağırlığı:  $d$



Şekil 3.37. Piknometreye bitüm koyulması



Şekil 3.38. Soğuyan bitümün üzerine saf su koyulması



Şekil 3.39. Deney numunelerinin su banyosunda bekletilmesi

### 3.5. Bitüm Köpürtme

Bitümün köpürtülmesi ve KBSM üretimi için Wirtgen firmasının ürettiği Laboratuvar köpük bitümle stabilize malzeme plenti (Şekil 3.40) kullanılmıştır.



Şekil 3.40. Laboratuvar KBSM plenti



Şekil 3.40. Laboratuvar KBSM plenti (Devam)

KBSM üretimine geçmeden, tüm bitüm sınıfları için optimum su ve sıcaklık tayini yapılması gerekmektedir. Kullanılması planlanan her bitüm sınıfı için %1-2-3-4 su içeriklerinde 500 g bitüm kullanarak köpürtme yapılmış ve Genleşme oranı-yarılanma süresi grafiğine göre köpürtme için gerekli optimum su yüzdeleri belirlenmiştir.

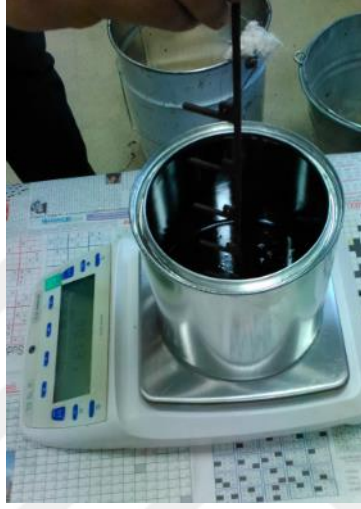
Köpürtme işlemine başlamadan 27,5 cm çapındaki laboratuvar asfalt plenti kovasına, genleşme oranı tayini için köpürtülmemiş 500 g (Şekil 3.41) bitüm koyularak yüksekliği bulunması gereklidir ancak plent kovasının altında ölçüm sonucunu etkileyecek girintiler (Şekil 3.42) bulunması nedeniyle ölçüm, tabanı düz olan 16,1 cm çapında başka bir silindirik kutu ile yapılmış olup (Şekil 3.43) köpürtülmemiş bitüm hacmi; 50/70 bitüm için 479,13 cm<sup>3</sup> ve 160/220 bitüm için 489,33 cm<sup>3</sup> bulunmuştur. 70/100 bitüm için 481,17 cm<sup>3</sup> ve 100/150 bitüm için 487,29 cm<sup>3</sup> bulunmuştur.



Şekil 3.41. Yükseklik ölçümü için 500 g bitüm tartılması



Şekil 3.42. Bitüm ölçüm kovaları



Şekil 3.43. Bitüm orijinal yükseklik ölçümü

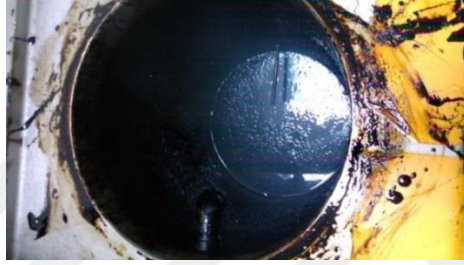
Köpürme için gereken optimum su miktarı ve ideal ısının belirlenmesi için, orijinal yüksekliği ölçülmüş tüm bitümler sırasıyla aşağıdaki işlemlere tabi tutulmuştur:

Bitüm, önceden etüvde 70-130°C'de (ortam ısısına göre karar verilir) ısıtılmış cihazın kendi kovasına, 100 g/s akış miktarı ile püskürtülmüştür (kovanın ve ortamın soğuk olması sonuçları etkilemektedir).

Köpük yüksekliği maksimum seviyeye ulaştığı anda kronometre başlatılmış ve gözlemlenerek maksimum yüksekliğin yarısına düştüğü anda durdurulmuştur. Kovanın içine yerleştirilmiş olan ölçüm çubuğu çıkarılıp bitümün ulaştığı maksimum yükseklik ölçülmüş ve kaydedilmiştir. Çalışma esnasında 2 adet ölçüm çubuğu kullanılmıştır. Doğru ölçüm alabilmek için, her ölçümden sonra ölçü çubuğu trikloretilen bulunan cam mezüre koyulmuş bir sonraki ölçümde

diğer ölçüm çubuğu kullanılmıştır. Bu işlemler; 160°C, 170°C ve 180°C olmak üzere üç farklı sıcaklık için her sıcaklıkta dört farklı su yüzdesi için ve her su yüzdesinde üçer kez olmak üzere 36 kez tekrarlanmış, optimum su-genleşme oranı-yarılanma süresi grafikleri çizilmiştir.

Şekil 3.44'de plentin bitüm haznesi içerisinde köpürtme işlemi için gerekli minimum bitüm miktarını gösteren çubuk ve devirdaim musluğu, Şekil 3.45'de ise püskürtülmüş bitümün sönmüş ama hala kabarcıkların olduğu ve kova dışına sıçramış köpük bitüm görülmektedir.



Şekil 3.44. Laboratuvar KBSM plenti bitüm haznesi



Şekil 3.45. Köpürmüş bitümün söndükten sonraki hali ve kova dışına sıçramış köpürmüş haldeki bitüm

Bitüm köpürtme için yapılan hesaplamalar:

$$\text{Orijinal bitüm hacmi: } (\pi \cdot D^2 \cdot H) / 4 \quad (3.14)$$

Burada;

D: ölçüm kabı çapı

H: köpürmemiş bitüm yüksekliği

$$\text{Genleşme Hacmi: } (\pi \cdot D^2 \cdot H) / 4 \quad (3.15)$$

Burada;

D: ölçüm kabı çapı

H: ölçüm çubuğuyla ölçülen genişleme miktarı

Genleşme oranı; genişleme hacminin orijinal bitüm hacmine bölünmesiyle elde edilir.

### 3.6. Köpük Bitümle Stabilize Malzeme Üretimi

Karışımlar KBSM plentinde homojen karışımın sağlanabilmesi amacıyla 20 kg olarak yapılmıştır. Briketler hazırlanırken her briket için 1150 g malzeme kullanılmıştır.

Malzeme üretimi sırasında karışım haznesine püskürtülen bitümün bir kısmı karıştırma bıçaklarına ya da hazne çeperlerine yapışmaktadır (Şekil 3.46). Ana üretimlerden önce yapılan deneme üretimlerinde bu yapışan bitümler kazınarak ağırlığı, püskürtülen bitüm ağırlığına oranlanmış ve yaklaşık her üretimde %5 civarında bitümün malzemeye karışmadığı sonucuna ulaşılmıştır. Bu nedenle bitüm hesabında kullanılacak bitüm 1,05 katsayısı ile çarpılmıştır. Benzeri bir durumun arazi şartlarında da gerçekleşmesi muhtemeldir. Bu nedenle aynı kontrolün yapılarak belirlenecek bir katsayıya göre bitüm hesabının yapılması önerilir.



Şekil 3.46. Karıştırma haznesi bıçaklarına yapışan ve karışıma katılamamış olan bitüm



Çizelge 3.4'de üretimde kullanılacak agreganın gradasyonuna ve üretim öncesindeki su muhtevasına bağlı olarak, üretim için gerçek su muhtevası hesabı görülmektedir.

Çizelge 3.4. Malzemenin üretim öncesi sahip olduğu su muhtevası nedeniyle yapılan, gerçek su muhtevası için düzeltme hesabı

Elek Çapı (mm)	Ana gradasyon % geçen	Ana gradasyona uygun kaba malzeme gradasyonu	Kalan kaba %	Kaba malzeme miktarı (g)	Ana gradasyona uygun ince malzeme gradasyonu	İnce malzeme miktarı (g)
25	100	100			100	
19	96	90,5	9,5	801,12	100	
12,5	87	69	21,4	1.802,52	100	
9,5	79	50	19	1.602,24	100	
4,75	58	0	50	4.205,88	100	
2	33	0			56,9	5.009
0,425	9	0			15,5	4.808,64
0,18	4	0			6,9	1.001,8
0,075	1,6	0			2,8	480,86
0						320,58
Toplam:				8.411,76		11.620,88
No 4 üzeri kaba malzemenin rutubeti %					0,14	
No 4 altı malzemenin rutubeti %					0,18	
Ortalama su muhtevası %					0,1632	
İhtiyaç olan malzeme miktarı g					20.000	
Rutubete göre kaba malzeme miktarı düzeltilmiş g					8.411,76	
Rutubete göre No4 altı malzeme miktarı düzeltilmiş g					11.620,88	
Toplam düzeltilmiş malzeme miktarı g					20.032,64	
Kaba malzeme %' si gradasyona göre					42	
No 4 altı malzeme %' si gradasyona göre					58	
Rutubetli ve kuru malzeme miktarı oranı					1,001632	

Çizelge 3.5'de bir üretim için temsili olarak, Çizelge 3.4'de yapılan su muhtevası hesabı için, üretimin optimum su ihtiyacına göre üretimde gerekecek gerçek malzeme miktarı ve su miktarı hesabı verilmiştir.

Çizelge 3.5. Temsili bir üretim için su hesabı

Üretim Kodu	KBSM üretimi için gereken malzeme (etüv) (g)	Su Düzeltme Oranı	KBSM miktar (g)	Düzeltilmiş	KBSM Üretimi için Aktif Filler
B2,2İK50Ç1	20.000	1,001632	20.032.64		200
Maksimum Kuru Br.Ağ. (t/m <sup>3</sup> )	Modifiye Proktorla bulunan optimum su %	No 4 altı su muht. %	No 4 üstü su muht. %	BSK/Sathi Trimmer Ortalama su muhtevası %	
2,053	6	0,18	0,14	0,1632	
İkame Agregaya Göre Birleştirilmiş Su Muhtevası %	Su farkı %	Üretime verilecek su miktarı (g)	Suyun % 90'ı (g)	Bitüm püskürtmeden önce eklenecek su (g)	Bitüm püskürtüldükten sonra eklenecek su (g)
0,1632	5,8368	1.179,0336	1.061,13	876,03	185,1

Wirtgen (2012) tarafından yapılan öneriye göre, üretilen briketlerin 100 mm çapında olması durumunda hesaplanan su azaltılarak %90'ı kullanılır.

$$\text{Bitüm püskürtülmeden kullanılacak su} = (0,75 \cdot \text{optimum su} (\%) - \text{su muhtevası}) \cdot (M_{\text{numune}} + M_{\text{çimento}}) / 100 \quad (3.16)$$

Burada;

$M_{\text{numune}}$ : agreganın ağırlığı (g)

$M_{\text{çimento}}$ : çimento ağırlığı (g)

$$\text{Püskürtme sonrası su} = \text{Suyun \%90'ı} - \text{Püskürtme öncesi su} \quad (3.17)$$

Üretim yapılan numune kodlarına ilişkin kısaltmalar:

B2,5İKA070Ç1: B (BSK trimmer), 2,5 (bitüm yüzdesi), İK (gradasyon tipi), A (analizatörden çıkan bitümü ayrıştırılmış agregası), 0 (RAP yüzdesi), 70 (bitüm sınıfı: 70/100), Ç (aktif filler tipi, çimento), 1 (aktif filler yüzdesi)

B2,5İK70Ç1: B (BSK trimmer), 2,5 (bitüm yüzdesi), İK (gradasyon tipi), 70 (bitüm sınıfı: 70/100), Ç (aktif filler tipi Ç: çimento, K: kireç, UK: uçucu kül), 1 (aktif filler yüzdesi)

50 (bitüm sınıfı: 50/70)

100 (bitüm sınıfı: 100/150)

160 (bitüm sınıfı: 160/220)

KBSM üretimi için 7-10 gün aralığında laboratuvar ortamında (nem kontrolü için) beklemiş olan kazınmış BSK malzeme çuvallarından su muhtevası için numune alınarak değişmez ağırlığa gelene kadar (1-2 gün) 40°C etüvde (bitümün yumuşamaması ve su muhtevası sonucunu etkilememesi için) bekletilmiştir. Malzemenin su muhtevası değeri No.4 elek altı ve No.4 elek üstü olarak belirlenmiş ve No.4 elek altı ve üstü malzemenin karışımdaki yüzdelere göre hesaplanmıştır. Aynı işlem her üretim dönemi için yapılarak her seri üretimden önce malzemenin su içeriği tespit edilmiş ve modifiye proktordan bulunan optimum su muhtevasına göre hesap yapılarak karışım için gerekli su miktarı belirlenmiştir.

Üretimler Çizelge 3.1'de verilen tüm gradasyonlar için yapılmıştır. Yoldan gelebilecek malzeme gradasyonuna göre bazı üretimler literatür bilgisine de dayanarak %1,9-2,2-2,5-2,8 ve 3,1 bitüm oranlarında ve %1 çimento için denenmiştir. Bunlara ilave olarak %1,3 ve %3,7 bitüm oranları ile de denemeler yapılmıştır. Bazı üretimler ise kıyas yapabilmek için sadece %2,5 bitüm oranıyla yapılmıştır. Ayrıca %1 kireç ve %1 uçucu kül için de üretimler yapılmış olup aktif fillerin etkisi de ortaya koyulmuştur.

Wirtgen (2012) tarafından önerilen prosedüre göre; üretim esnasında öncelikle kazınmış BSK numunesi ve kullanılacak aktif filler karıştırma haznesine koyularak 15 s kuru olarak karıştırılmıştır. Daha sonra kullanılacak su miktarı Denklem (3.16)'ya göre bitüm püskürtülmeden önce karışıma verilmiş (Şekil 3.47) ve 15 s daha karıştırılmıştır. Ardından bitüm püskürtülmüş ve 30 s daha

karıştırılmıştır. Son olarak karışım suyunun kalan kısmı (Denklem (3.17)) ilave edilip 15 s daha karıştırılmış (Şekil 3.48) ve üretim tamamlanmıştır.

Çizelge 3.6'da temsili bir üretim için malzemelerin karışım miktarları verimiştir.

Çizelge 3.6. B2,2İK50Ç1 kodlu üretim için karışım miktarları

Elek Çapı mm	% Geçen		Karışım Miktarı (g)	%1 Aktif Filler (Çim.ento) (g)	Rutubete göre kullanılacak gerçek malzeme miktarı (g)		Hava kurusu/Etöv kurusu Oranı	Karışıma girecek bitüm %	Karışıma girecek bitüm miktarı (g)	Bitüm sınıfı
	Tip 4	Tip 4			g geçen	g kalan				
	İK %100	İK %100								
25	100	0	20.000	200	20.032,6	0	1,0016	2,31	466,62	50/70
19	96	4			19.231,3	801,31				
12,5	87	9			17.428,4	1.802,94				
9,5	79	8			15.825,7	1.602,61				
4,75	58	21			11.618,9	4.206,85				
2	33	25			6.610,77	5.008,16				
0,425	9	24			1.802,94	4.807,83				
0,18	4	5			801,31	1.001,63				
0,075	1,6	2,4			320,52	480,78				
		1,6			0	320,52				



Şekil 3.47. Üretim için malzemelerin karıştırma haznesine koyulması



Şekil 3.48. Malzemelerin kuru karışım ve su-bitüm ilavesi sonrası karışmış halleri

Ortaya çıkan Köpük bitümle stabilize malzeme tepsiye alınarak briketlerin hepsi hazırlanana kadar nem kaybını önlemek için üzeri nemli havluyla örtülmüştür (üretimler kış aylarında ise nemli havlu kullanmak karışım su içeriğini olumsuz etkileyecektir).  $İÇM_{kuru}$  ve  $İÇM_{yaş}$  değerlerini belirlemek için briketler Marshall kompaktör ile iki yüzüne 75'er darbe vurularak hazırlanmıştır (Şekil 3.49).



Şekil 3.49. Briket hazırlanışı

### 3.7. Köpük Bitümle Stabilize Malzemeye Uygulanan Deneyler

#### 3.7.1. $İÇM$ (dolaylı çekme mukavemeti)

$İÇM$  deneyi hem aktif filler hem de optimum bitüm miktarlarının belirlenmesi için kullanılmıştır.

Üretilen briketler, üretimin ertesi gün (12-24 saat) kalıplardan çıkarılarak boyut ölçümleri yapılmış (Şekil 3.50), gerekli tartımları alınmış ve 40°C etüvde 72 saat beklemeye bırakılmıştır. 72 saat sonunda etüvden çıkarılan briketlerin (Şekil 3.51) yine tartımları alınmış ve kuru olarak kırılacaklar kırılmış diğerleri yaş kırılmalar için 25°C suda 24 saat beklemeye alınmıştır (Şekil 3.52). 24 saat sonra yaş numuneler de sudan çıkarılıp yüzeyi silinerek kırılmışlardır (Şekil 3.53). Ayrıca 2 üretim için Marshall stabilite deneyi yapılmıştır (Şekil 3.54)



Şekil 3.50. Briket boyut ölçümü



Şekil 3.51. Üretilen köpük bitüm briketleri



Şekil 3.52. Numunelerin 25°C suda şartlandırılması



Şekil 3.53. İÇM deneyi



Şekil 3.54. Marshall stabilite deneyi

İÇM ve TSR değerleri aşağıdaki eşitliklerle belirlenmiştir.

$$\text{İÇM (ITS)} = (10^6 \cdot 2 \cdot P) / (\pi \cdot h \cdot d) \quad (3.18)$$

$$\text{TSR} = (\text{Ortalama İÇM}_{\text{yaş}} / \text{Ortalama İÇM}_{\text{kuru}}) \cdot 100 \quad (3.19)$$

Burada;

İÇM: Indirect tensile strength (dolaylı çekme mukavemeti) (kPa)

P: Uygulanan maksimum yük (kN)

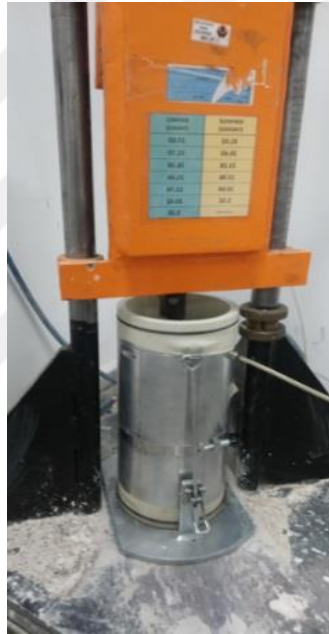
h: Numunenin ortalama yüksekliği (mm)

d: Numunenin çapı (mm)

TSR = Tensile Strenght Retain (Korunmuş İÇM oranı) (Asphalt Academy, 2009).

### 3.7.2. Esneklik modülü

Esneklik modülü tespiti için KBSM'ye özgü net bir numune hazırlanması ve şartlandırma metodu olmamakla birlikte AASHTO T 307-99 (2012) prosedüründen faydalanılmıştır. Numuneler titreşimli tokmak ile 6 kademeli olarak (Şekil 3.55) 152 mm çap ve 315 mm yükseklik olacak şekilde hazırlanmışlardır.



Şekil 3.55. Titreşimli tokmakla numune sıkıştırılması

Muhtemel hizmet koşullarını simule etmek ve KBSM davranışını en iyi şekilde anlamak için ıslak numuneler üzerine de deneyler yapılmıştır. Bu deneyler için numuneler optimum su içeriğinde sıkıştırıldıktan sonra 24 saat 60°C'de (hızlandırılmış kür) bekletilmiştir (Şekil 3.56). Daha sonra 2 saat laboratuvar ortamında soğumaya bırakılmış ve bir numune esneklik modülü deneyine alınırken diğer numune 4 saat 25°C su içerisinde bekletilmiştir (Şekil 3.57). 4 saat sonunda sudan çıkarılan numune 10 dakika suyu süzöldükten sonra dinamik üç eksenli cihazında deneye tabi tutulmuştur.





Şekil 3.56. Numunelerin etüvde bekletilmesi



Şekil 3.57. Islak numunelerin etüv sonrası su içerisinde şartlandırılması

Deneyle Çizelge 3.1'den belirlenen her gradasyonun optimum bitüm ve ideal filler tipi için yapılmıştır. Üretim serileri için farklı bitüm yüzdeleri gerekli İÇM ( $İÇM_{kuru} > 225 \text{ kPa}$  ve  $İÇM_{yaş} > 100 \text{ kPa}$ ) şartlarını sağlıyorsa, düşük bitüm yüzdesi ekonomiklik ve böylece geri dönüşümün faydasının artırılması amacıyla tercih edilmiştir. İlave olarak kireç ve uçucu küllü bir karışım da test edilmiştir.

Deney; 0,1 s yükleme ve 0,9 s dinlenme olacak şekilde yarım sinüs dalgası yükleme ile üç eksenli bir yük hücresi içerisinde gerçekleştirilmektedir.

Numunenin altına ve üzerine poroz taşlar yerleştirilmekte böylece özellikle suya doyurulmuş numunelerdeki fazla su tahliye edilebilmektedir.

AASHTO T 307-99 yöntemi, numunenin üst ve alt plakalar arasında düzgün bir şekilde temasını sağlamak için testten önce 500-1.000 şartlandırma döngüsüne tabi tutulmasını gerektirir (Titi vd., 2006).

Deneyde; yoldan geçebilecek farklı sayıdaki araçları simule etmek için, öncelikle 995 adet ön yükleme yapıp takip eden 5 yüklemenin ortalama esneklik modülü bulunur, ardından 2.500 yüklemeye kadar her 100 yüklemeye (95 ön yükleme + 5 esneklik modülü için yükleme) aynı işlem tekrarlanır ve deney sonlandırılır.

Şartlandırma yüklemesi olan ilk 1.000 yüklemeye çevresel ve maksimum eksenel gerilme değerleri 15 psi (103,4 kPa), diğer yükleme sekanslarında ise 3 psi (20,68 kPa)'dan başlayarak cihaz (Şekil 3.58) tarafından otomatik olarak artırılan gerilme değerlerine göre deney yürütülür.



Şekil 3.58. KBSM numunesine Esneklik Modülü deneyi yapılması

### 3.7.3. Odemark (eşdeğer kalınlıklar) yöntemine göre yapılan kabuller ve bulunan gerilmeler

Esneklik modülü deneyi için her numunede 16 farklı sonuç çıkmaktadır (1.000 şartlandırma yüklemesi ve 2.500 yüklemeye kadar her 100 yükleme için). Bu değerlerden hangisinin kullanılacağı KBST tabakasının esneklik modülünü bulmak için önemlidir. Çünkü farklı gerilme seviyeleri için esneklik modülü ve buna bağlı olarak tabaka katsayısı değerleri çok değişiklik arz etmektedir. Bu nedenle KBST tabakasının maruz kalabileceği gerilmeler aşağıda anlatıldığı şekilde hesaplanarak her üretim için deneysel sonuçlara göre çıkarılan  $k-\theta$  modeline göre esneklik modülleri hesaplanmıştır.

Uz (2012)'de belirtildiği gibi; kesme gerilmesinin yük eksenini altında sıfır kabul edilmesi, KBST'nin granüler malzemeler gibi gerilme bağımlı davranış sergilemesi ve modelin esneklik modülü ile gerilme arasındaki ilişkiyi uygun kurabilmesi nedeniyle çalışmada KBSM'nin kullanılacağı derinliğe denk gelen toplam gerilmeyle esneklik modülünü tahmin etmek için basit bir yaklaşım olan  $k-\theta$  modeli kullanılmıştır.

Deneylelerden elde edilen tecrübeye ve literatür bilgisine dayanarak (Yan vd. (2010); Khosravifar vd. (2015); Zhang vd. (2018)) KBST tabakası uygulamada trafik yüküne göre PMT yerine, bitümlü temel yerine ya da bu iki tabakanın arasına bu tabakaların kalınlıklarını azaltarak kullanılacaktır. Sonuç olarak üstyapıda yaklaşık 15-40 cm civarı bir derinliğe yerleşecektir.

Yük eksenini altında tekrarlı yüklerden kaynaklı gerilmelerin hesabı için öncelikle lastik temas alanının bilinmesi gerekmektedir.

Tabakalı teori, esnek üstyapı tasarımı için kullanıldığında, her lastiğin dairesel bir temas alanına sahip olduğu varsayılmaktadır. Bu varsayım tam olarak doğru değildir, ancak ortaya çıkan hatanın küçük olduğuna inanılmaktadır (Huang, 2003).

Huang (2003)'a göre; 80 psi lastik basıncı için 18 kip (80 kN) standart dingil yükü, her biri 4500 lb (20 kN) yüke sahip dört lastiğe uygulanır.

$$A = \text{Yük/basınç} \quad (3.20)$$

$$r = \sqrt{A/\pi} \quad (3.21)$$

Burada;

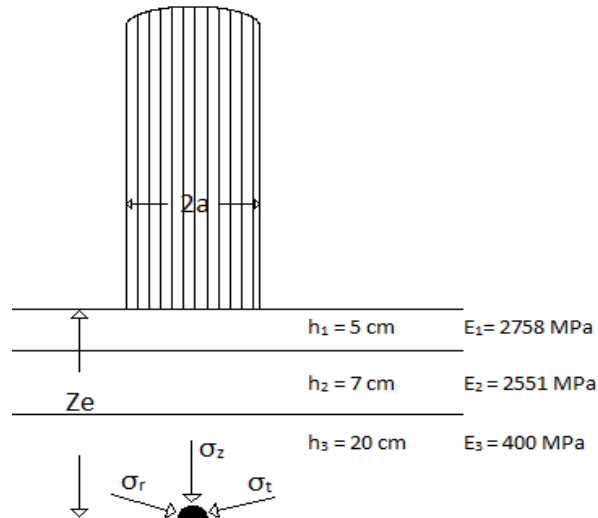
A: Her lastik için temas alanı

r: Dairesel temas alanı için yarıçap

(3.20) ve (3.21) denklemleriyle  $A = 56,25 \text{ in}^2$ ,  $r = 4,23 \text{ inç}$  (107 mm) bulunmuştur.

Kazınacak mevcut yol; Aşınma 5 cm, Binder 7 cm, Bitümlü temel 8 cm olmak üzere toplam 20 cm devlet yolu olarak Sağlık ve Güngör (2008)'den seçilmiştir.

Yapılacak KBST için Kabuller: Teker yarıçapı (a) 107 mm, Aşınma  $E = 2.758 \text{ MPa}$ -5 cm, Binder  $E = 2.551 \text{ MPa}$ -7 cm (aşınma ve binder tabakalarının esneklik modülü değerleri için AASHTO (1993), Sağlık ve Güngör (2008) ve Kök (2008)'den yararlanılmış ve birimler MPa'a çevrilmiştir), köpük bitümle stabilize temel  $E = 400 \text{ MPa}$ -20 cm kabul edilmiştir (tez çalışmasında deneysel olarak elde edilen sonuçlara göre) (Şekil 3.59).



Şekil 3.59. Temsili teker yüklemesi, tabaka kalınlık ve esneklik modülleri

Toplam kalınlık 32 cm'dir. Lastik basıncı  $P(\sigma_0) = 0,5516$  Mpa (80 psi), Poisson oranı ( $\mu$ ) her tabaka için eşit ve 0,35 kabul edilmiştir. Denklem (2.1) için  $h_e$  değerleri aşağıdaki gibi bulunmuştur:

$h_{1e} = 51,317$  mm (aşınma tabakasının binder cinsinden kalınlığı)

$h_{2e} = 179,981$  mm (aşınma+binder tabakalarının KBST cinsinden kalınlığı)

$h_{3e} (Z_e) = 379,981$  mm (aşınma+binder+KBST tabakalarının KBST cinsinden kalınlığı)

Denklem (2.1)'deki  $f$  değeri; çok tabakalı sistemlerde en üst tabaka için  $f=1$ , diğer tabakalar için  $f = 0,8$  alınır ya da tüm tabaka dönüşümlerinde 0,9 olarak da alınabilmektedir (The University of Memphis, 2018).

Yük ekseninde altında tekrarlı yüklerden kaynaklı gerilmelerin hesabı için aşağıdaki Denklemler (3.22), (3.23) ve (3.24) kullanılırlar (Huang, 2003; The University of Memphis, 2018).

$$\sigma_z = \sigma_0 * \left\{ 1 - \left[ \frac{\frac{Ze}{a}}{\sqrt{1 + \left(\frac{Ze}{a}\right)^2}} \right]^3 \right\} \quad (3.22)$$

$$\sigma_r = \frac{\sigma_0}{2} * \left\{ 1 + 2\mu - \frac{2*(1+\mu)*\left(\frac{Ze}{a}\right)}{\sqrt{1 + \left(\frac{Ze}{a}\right)^2}} + \left[ \frac{\frac{Ze}{a}}{\sqrt{1 + \left(\frac{Ze}{a}\right)^2}} \right]^3 \right\} \quad (3.23)$$

$$\sigma_t = \frac{\sigma_0}{2} * \left\{ 1 + 2\mu - \frac{2*(1+\mu)*\left(\frac{Ze}{a}\right)}{\sqrt{1 + \left(\frac{Ze}{a}\right)^2}} + \left[ \frac{\frac{Ze}{a}}{\sqrt{1 + \left(\frac{Ze}{a}\right)^2}} \right]^3 \right\} \quad (3.24)$$

Burada;

$\sigma_0$	Lastik basıncı
$\sigma_r, \sigma_t$	$Z_e$ derinliğinde oluşan yatay (çevresel) gerilmeler
$\sigma_z$	$Z_e$ derinliğinde oluşan düşey gerilme
$Z_e$	KBST cinsinden üstyapı kalınlığı
$\mu$	Poisson oranı
$a$	Teker yarıçapı

$$\sigma_{\text{bulk}} (\sigma_b) = \sigma_z + \sigma_r + \sigma_t \quad (3.25)$$

Burada;

$\sigma_{\text{bulk}}$ : Toplam gerilme (bulk stress)

Hesaplanan  $Z_e$  için (3.25) denkleminin yardımı ile toplam gerilme  $\sigma_b = 55,76 \text{ kPa}$  bulunmuştur.

## 4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

### 4.1. Agrega Deneilerine İlişkin Bulgular

Çizelge 4.1’de daha önce Karayolları tarafından yapılan Kızılcahamam – Gerede deneme kesiminden alınan karot elek analizi sonuçları, deneme kesimi yapılmadan alınan karot elek analizi sonuçları ve deneme kesimi yapıldıktan sonra malzemenin gradasyonunun nasıl değiştiğini gösteren kırılmışlık yüzdesi verilmektedir.

Çizelge 4.1. Karot elek analizi sonuçlarının KBSM deneme yolu öncesi yolun gradasyonu ile kıyaslanması

Kızılcahamam-Gerede köpük bitümle yerinde soğuk geri kazanım deneme yolundan alınan karot sonuçları						Geri kazanım öncesi Kızılcahamam-Gerede mevcut yolundan alınan karot
Elek	Karot 1	Karot 2	Karot 3	Ortalama	Kırılmışlık %	
37,5	100	100	100	100,00	0,00	100
25	97,1	98,2	98,2	97,83	2,55	95,4
19	93,1	93,2	96,9	94,40	21,49	77,7
12,5	87,9	82,6	89,6	86,70	23,50	70,2
9,5	82,9	77,2	82,2	80,77	23,69	65,3
4,75	64	57,9	68,5	63,47	32,78	47,8
2	41,7	38,4	45,3	41,80	41,69	29,5
0,425	18,6	18,8	20,9	19,43	36,85	14,2
0,18	13,4	17	15,5	15,30	48,54	10,3
0,075	9,3	10,4	11,4	10,37	24,90	8,3

Çizelgede görüldüğü üzere; yolun geri kazanım öncesi mevcut halinden alınan ve geri kazanım uygulamasından sonra alınan karot sonuçlarına göre, geri dönüştürülen BSK malzemesinin gradasyonu bir miktar incelmıştır. Bunun nedeninin hem trafik yükü hem de geri dönüşüm sırasında kazıma makinesinin malzemeyi kırması olduğu düşünülmektedir. Bu durum KBSM için uygun gradasyon aralığının belirlenmesi için önemli bir göstergedir.

Deneysel çalışmalar için Ankara-Polatlı yolundan kazınan BSK numunesinin bitümlü ve bitümden ayrıştırılarak elek analizleri yapılmış olup asfalt trimmer makinesinin agrega Dmax (en büyük dane çapı) değerini küçülttüğü Çizelge

4.2'de görülmektedir. Çizelge 3.1'de verilmiş olan ana gradasyon tipi (İK gradasyonu) Çizelge 4.2'de verilmiş olan numunenin ortalama elek analizi sonucudur.

Çizelge 4.2. Kazınmış BSK'nın bitümlü ve bitümsüz elek analizi sonuçları

Elek Açıklığı		Deneylerde kullanılacak kazınmış BSK numunesi bitümlü halde elek analizi (Ankara-Polatlı)					Ortalama	Bitümü ayrıştırılmış elek analizleri	
mm	inç-No								
37,5	1 1/2	100	100	100	100	100	100		
25	1	98	100	100	100	100	99,6		
19	3/4	95,8	95,9	98	94,8	95,6	96,02	100	
12,5	1/2	89,2	88,3	88,3	83,4	85,9	87,02	97,8	100
9,5	3/8	83,5	80,1	77,8	76,2	78,4	79,2	94,7	97,7
4,75	No.4	60,4	55,7	54,2	60,1	59,7	58,02	78,2	87,3
2	No.10	32,9	29,3	29,6	37,9	35,2	32,98	55,9	64,3
0,425	No.40	8,7	7,7	7,7	10,2	10,7	9	29,1	32,6
0,18	No.80	4,4	3,7	3,7	4,3	4	4,02	22,3	24,4
0,075	No.200	1,4	1,2	1,3	2,1	2	1,6	15,5	16,6

Şekil 4.1'de görülen parçacıklar, asfalt analizatöründen çıkan agregayla bitümlü agrega gradasyonunun farklı çıkmasının ana nedenidir.



Şekil 4.1. Kazınmış malzeme içerisinde iri agrega gibi görünen ancak elle kırılabilen ve içerisinde sadece ince agregalar barındıran bitüm topağı

Geri kazanılmış malzemenin bitümlü olması nedeniyle her deney doğrudan yapılamamıştır. Çizelge 4.3'de üretimde kullanılan agrega tiplerine uygulanan



deneylerin sonuçları verilmiştir. Yapılan tüm deneysel sonuçlar KTŞ'de belirtilen hem PMT hem de bitümlü temel gereksinimlerini sağlamıştır. Özellikle bitümden ayrıştırılmış agregalar trafik altında belli bir süre hizmet etmelerine karşın oldukça iyi sonuç vermişlerdir. Sonuç olarak geri kazanılmış agregaların kullanılmaya değer durumda olduğu görülmüştür.

Çizelge 4.3. Kazınmış BSK agregası bitümlü ve bitümsüz fiziksel deney sonuçları

Deney	KTŞ Bitümlü Temel Limitleri	KTŞ PMT Limitleri	Kazınmış BSK	Bitümü ayrıştırılmış agregası	İkame agregası
Parçalanma Direnci (Los Angeles)	30	≤ 35	-	18	24
Hava Tesirlerine Karşı Dayanıklılık (MgSO <sub>4</sub> )	18	≤ 20	-	6,7	2,9
Plastisite İndeksi %	NP	NP	NP	NP	NP
Organik Madde %3 NaOH ile	Negatif	Negatif	Negatif	Negatif	Negatif
Metilen Mavisi g/kg	≤ 2	≤ 3	1,5	1	0,75
Su Emme Oranı Tayini %					
No4 altı	≤ 2,5	≤ 3	2,5	1,7	1,4
No4 üstü	≤ 2,5	≤ 3	1,1	0,6	0,4

#### 4.2. Bitüm Deneylerine İlişkin Bulgular

Çizelge 4.4'de üretimlerde kullanılacak tüm bitüm sınıflarının deneysel sonuçları görülmektedir. Sonuçlar, çizelgede verilen sınır değerlere göre tüm yeni bitümlerin sonuçlarının uygun çıktığını göstermektedir. Ayrıca RAP malzemenin ayrıştırılmasıyla elde edilen bitüme yapılan penetrasyon ve yumuşama noktası deney sonuçları eski bitümün yaşlandığını ve bağlayıcılık özelliklerini kaybettiğini göstermektedir. Parlama noktası sonucu alınamamasının nedeni; bitüme her ne kadar destilasyon yapılsa da içerisinde çok küçük miktarda etilen kaldığı ve bunların da bitümün parlamadan yanmaya geçmesine neden olduğu düşünülmektedir.

Çizelge 4.4. Bitümlere uygulanan deney sonuçları

Bitüm Deney Sonuçları						Sınır değerler			
Deney Adı	50/70	70/100	100/150	160/220	RAP'den gelen	50/70	70/100	100/150	160/220
Penetrasyon, (25 °C) 0,1 mm	53,6	85,2	102,1	172	32,4	50-70	70-100	100-150	160-220
Yumuşama Noktası, °C	49,4	46,8	43,2	37,1	60,6	46-54	43-51	39-47	35-43
Parlama Noktası, °C	295	282	265	245	Alınamadı	>230	>230	>230	>220
Özgül Ağırlık, (g/cm <sup>3</sup> )	1,036	1,033	1,024	1,021	1,06	1,01-1,06	1,01-1,06	1,01-1,06	1,01-1,06

### 4.3. Bitüm Deneylerine İlişkin Bulgular

Çizelge 4.5. RAP malzemedeki bitümün aktif olup olmadığının kontrolü için hazırlanmıştır.

Çizelge 4.5. BSK trimmer bitüm aktifliği için 70°C'de hazırlanan 3 brikete ait  $\dot{I}CM_{yaş}$  değerleri

Maksimum Yük (kg)	33	36	30
$\dot{I}CM_{yaş}$ (kPa)	32,5	35,8	29,5
Ortalama $\dot{I}CM_{yaş}$ (kPa)	32,6		

Çizelge 2.3'de 20 penetrasyon üstü aktif kabul edilmiş olup, Çizelge 4.4'de, RAP malzemedeki bitümün penetrasyon değeri 3,4 çıktığı için geri kazanılmış bitüm aktif görünse de, Çizelge 4.5'deki ortalama  $\dot{I}CM_{yaş}$  değeri 100 kPa'nın çok altında kaldığı için RAP malzemedeki bitüm inaktif kabul edilmiştir.

Çizelge 4.6'de görülen  $\dot{I}CM_{kuru}$  değeri daha sonra aktif fillersiz olarak yapılan üretimlerle kıyaslama yapabilmek için hazırlanmıştır.

Çizelge 4.6. BSK trimmer bitüm aktifliği için 70°C'de hazırlanan 3 brikete ait  $\dot{I}CM_{kuru}$  (kalıptan çıkar çıkmaz) değerleri

Maksimum Yük (kg)	125,7	156	152
$\dot{I}CM_{kuru}$ (kPa)	119,34	148,1	144,31
Ortalama $\dot{I}CM_{kuru}$ (kPa)	137,25		

#### 4.4. Bitüm Köpürtülmesine İlişkin Bulgular

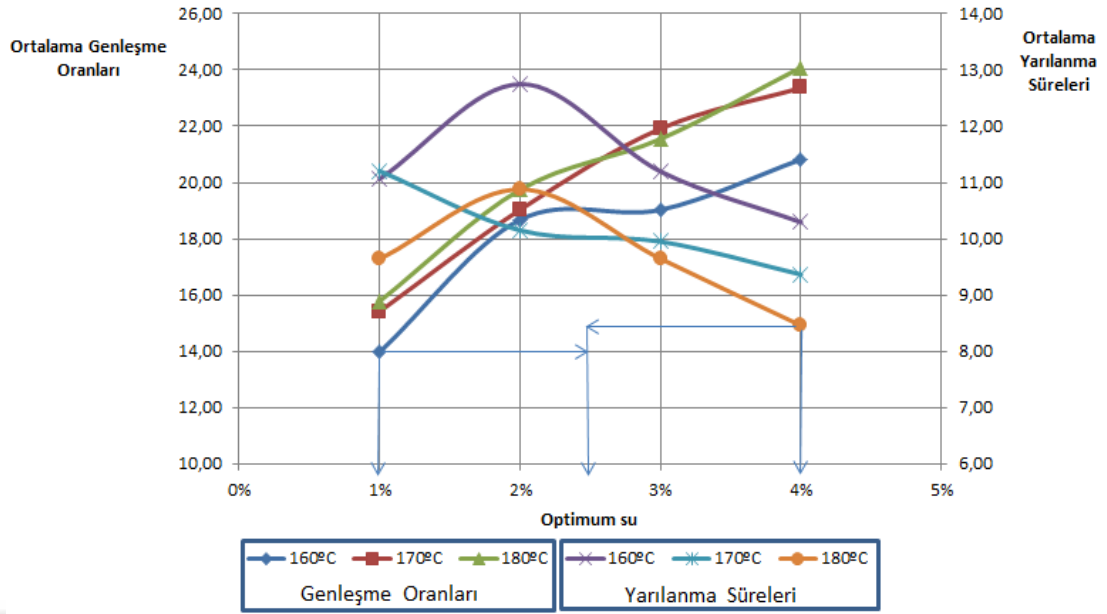
Çizelge 4.7, Çizelge 4.8, Çizelge 4.9 ve Çizelge 4.10'da 4 farklı bitüm sınıfı için üç farklı sıcaklık ve 4 farklı su yüzdesinde elde edilen genişleme oranları ve yarılanma süreleri görülmektedir.

Şekil 4.2, Şekil 4.3, Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'de ise çizelgelerdeki genişleme oranı ve yarılanma sürelerine göre çizilen grafiklerden her bitüm sınıfı için optimum köpürme suyu seçimi görülmektedir.

Çizelgelerdeki kırmızı satırlar o bitüm sınıfı için grafiğe göre seçilmiş optimum değerleri belirtmektedir.

Çizelge 4.7. 50/70 sınıfı bitüm genişleme oranı ve yarılanma süresi sonuçları

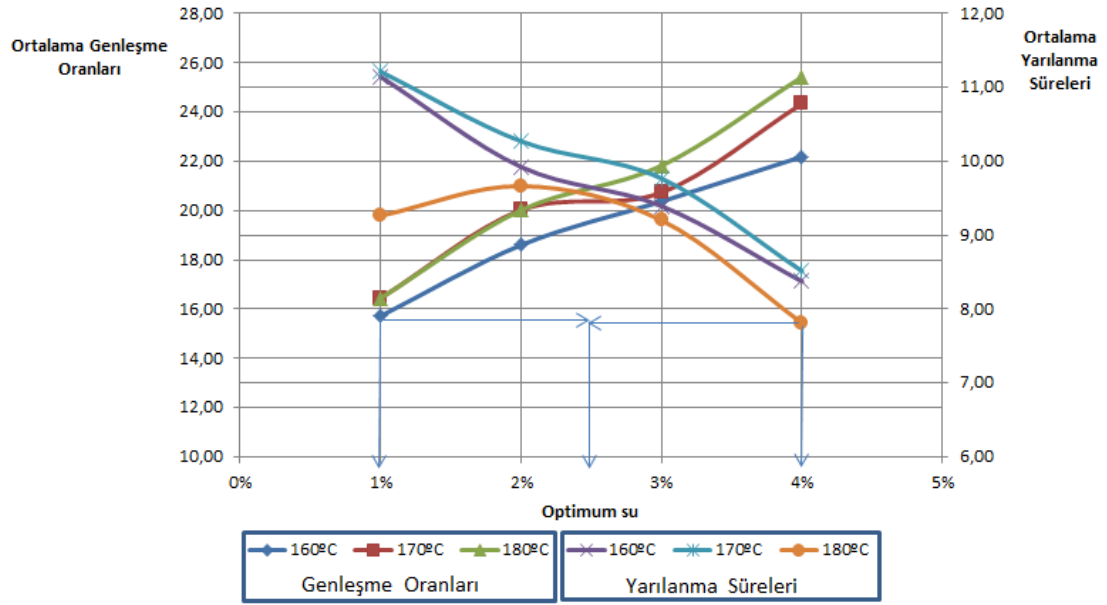
Köpürtme ısısı (°C)	Su Yüzdesi	Ortalama Genleşme Oranları	Ortalama Yarılanma süreleri (s)
160°C	1%	13,97	11,06
	2%	18,68	12,75
	3%	19,03	11,20
	4%	20,82	10,29
170°C	1%	15,42	11,21
	2%	19,03	10,15
	3%	21,91	9,95
	4%	23,37	9,37
180°C	1%	15,78	9,64
	2%	19,75	10,88
	3%	21,55	9,65
	4%	24,09	8,46



Şekil 4.2. 50/70 bitümün farklı sıcaklık ve su değerlerindeki genişleme oranı ve yarılanma süresi grafiği

Çizelge 4.8. 70/100 sınıfı bitüm genişleme oranı ve yarılanma süresi sonuçları

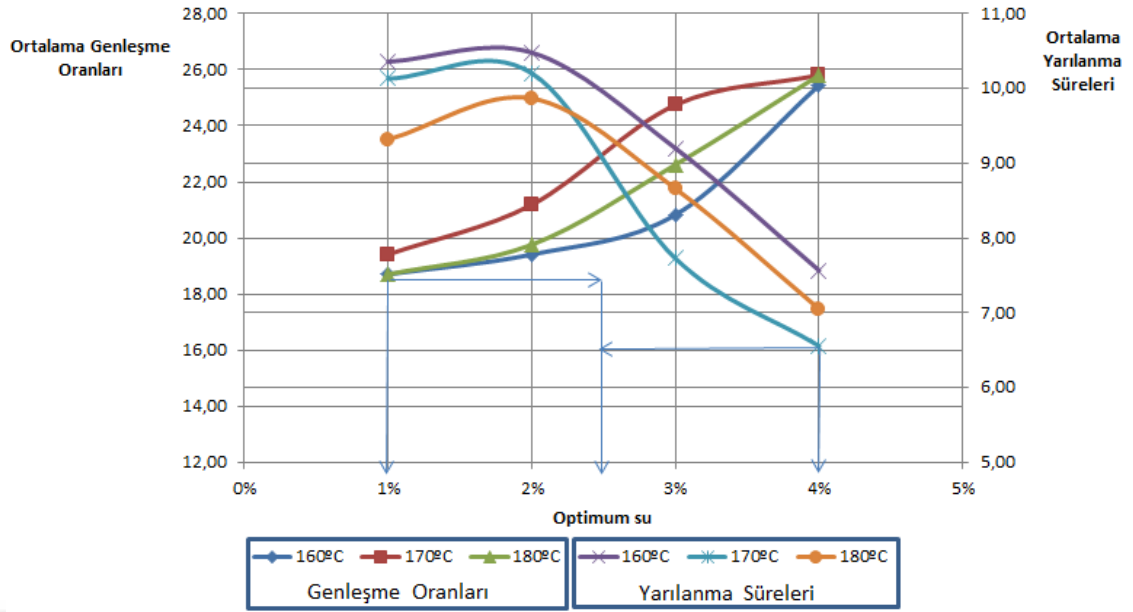
Köpürtme ısısı (°C)	Su Yüzdesi	Ortalama Genişleme Oranları	Ortalama Yarılanma süreleri (s)
160°C	1%	15,72	11,14
	2%	18,60	9,92
	3%	20,37	9,39
	4%	22,18	8,37
170°C	1%	16,44	11,21
	2%	20,01	10,27
	3%	20,73	9,77
	4%	24,34	8,51
180°C	1%	16,44	9,26
	2%	20,01	9,66
	3%	21,82	9,20
	4%	25,42	7,81



Şekil 4.3. 70/100 bitümün farklı sıcaklık ve su değerlerindeki genleşme oranı ve yarılanma süresi grafiği

Çizelge 4.9. 100/150 sınıfı bitüm genleşme oranı ve yarılanma süresi sonuçları

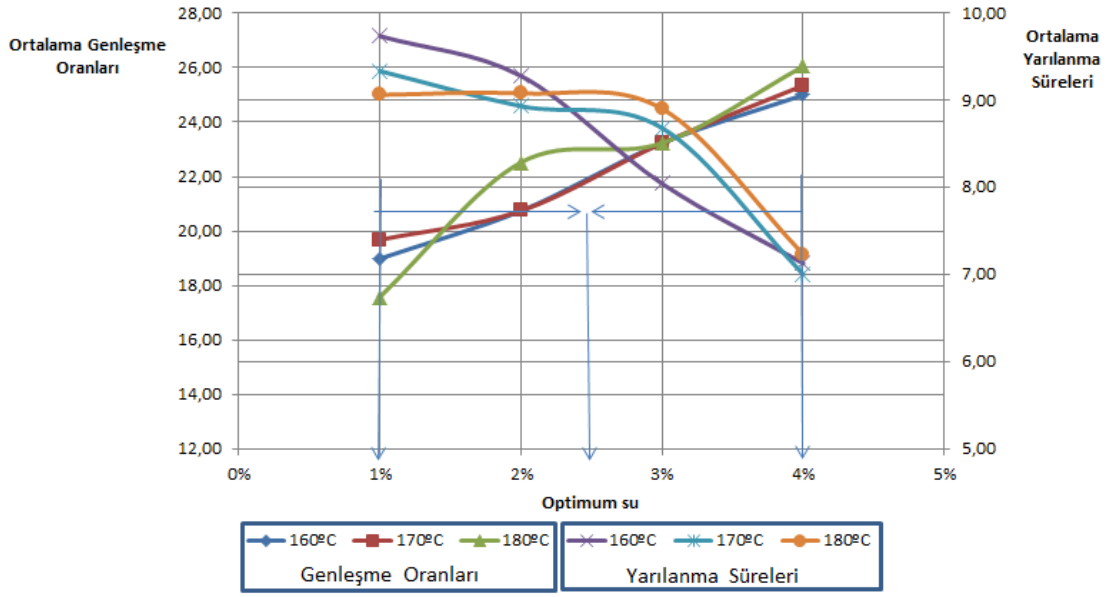
Köpürtme ısısı (°C)	Su Yüzdesi	Ortalama Genleşme Oranları	Ortalama Yarılanma süreleri (s)
160°C	1%	18,71	10,36
	2%	19,41	10,48
	3%	20,83	9,20
	4%	25,45	7,57
170°C	1%	19,41	10,13
	2%	21,19	10,2
	3%	24,75	7,73
	4%	25,81	6,56
180°C	1%	18,71	9,32
	2%	19,76	9,87
	3%	22,62	8,66
	4%	25,81	7,05



Şekil 4.4. 100/150 bitümün farklı sıcaklık ve su değerlerindeki genleşme oranı ve yarılanma süresi grafiği

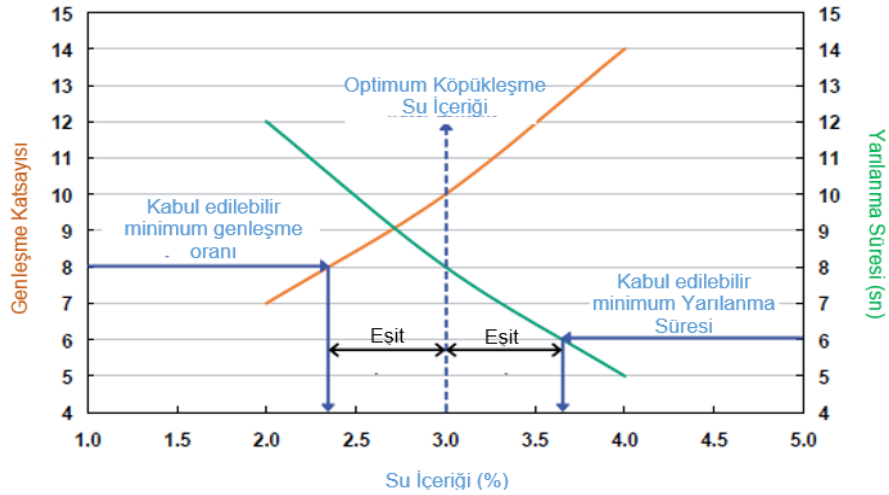
Çizelge 4.10. 160/220 sınıfı bitüm genleşme oranı ve yarılanma süresi sonuçları

Köpürtme ısısı (°C)	Su Yüzdesi	Ortalama Genleşme Oranları	Ortalama Yarılanma süreleri (s)
160°C	1%	18,99	9,74
	2%	20,74	9,28
	3%	23,23	8,04
	4%	25,00	7,13
170°C	1%	19,68	9,34
	2%	20,74	8,93
	3%	23,23	8,68
	4%	25,35	7,00
180°C	1%	17,58	9,06
	2%	22,52	9,08
	3%	23,23	8,90
	4%	26,05	7,23



Şekil 4.5. 160/220 bitümün farklı sıcaklık ve su değerlerindeki genleşme oranı ve yarılanma süresi grafiği

Şekil 4.6'dan görüldüğü üzere optimum su seçiminde genleşme oranı ve yarılanma süresinin minimum değerleri işaretlenip bu noktalara eşit uzaklıktaki su içeriği seçilir ya da eşit uzaklıkta iki su içeriği varsa bu iki yüzde genleşmeleri ve yarılanmaları açısından ayrıca değerlendirilebilir. Ancak tez çalışmasında Wirtgen (2012) tarafından Çizelge 2.2'de önerilen minimum değerlere göre değil çalışma kapsamında yapılan bitüm köpürtme işlemlerinde bulunan minimum değerlere göre grafikler hazırlanmıştır. Bunun nedeni olarak çalışmada kullanılan bitümlerin, Wirtgen (2012)'de önerilenden daha yüksek minimum genleşme oranı ve yarılanma süresi değerlerine ulaşması, bu değerlere göre belirlenen optimum su ve sıcaklık değerlerinde köpürtülen bitümlerin de, hazırlanacak karışımların kalitesini olumlu etkileyeceği nedeniyledir. Yüksek yarılanma süresi köpürmüş bitümün uzun süre kararlı (çökmeden) kalmasını, yüksek genleşme oranı bitümün yüzey alanının artırılmasını sağlamaktadır. Böylece agregaların bitümle sarılma oranı artırılmış ve daha homojen karışımlar elde edilmiş olmaktadır.



Şekil 4.6. Köpürme için gereken optimum su miktarının belirlenmesi (Wirtgen, 2012)

Bitüm köpürtülmesi işlemi için hazırlanan çizelge ve şekillere göre aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır:

1. Çizelge 4.7 ve Şekil 4.2'ye göre 50/70 sınıfı bitüm için; genleşme oranı ve yarılanma süresi eğrileri ideale yakın (doğrusala yakın artış ve azalma gösterip diğerlerine göre daha kararlı) çıktığı için 170°C, köpürtme amaçlı sıcaklık olarak uygun görülmektedir. Köpürtme için gerekli su için de şekilden görüldüğü üzere; %2 ve %3 su en uygun değerlerdir ancak yarılanma süreleri çok yakinken (10,15-9,95) genleşme oranı %3 için daha iyi (19,03-21,91) olduğundan köpürtme amaçlı su %3 olarak uygun bulunmuştur.
2. Çizelge 4.8 ve Şekil 4.3'e göre 70/100 sınıfı bitüm için; hem yarılanma süresi hem de genleşme oranı değerleri için yüksek sonuçlar elde edilmesi nedeniyle, köpürtme amaçlı sıcaklık olarak 170°C ve köpürtme amaçlı su için %2 değerleri seçilmiştir.
3. Çizelge 4.9 ve Şekil 4.4'e göre 100/150 sınıfı bitüm için; 160°C ve 170°C sıcaklıklarda ve her iki sıcaklıkta da %2 su değerinde yarılanma süreleri oldukça yüksekken 170°C'de genleşme oranı daha yüksek çıktığı için, köpürtme amaçlı sıcaklık 170°C ve köpürtme amaçlı su %2 seçilmiştir.



4. Çizelge 4.10 ve Şekil 4.5'e göre 160/220 sınıfı bitüm için; 160°C sıcaklık, %2 su yüzdesinde ve 170°C sıcaklık, %1 su yüzdesinde hem yarılanma süreleri hem de genleşme oranı değerleri için oldukça iyi sonuçlar elde edilmiştir. Ancak yarılanma süreleri çok yakınken genleşme oranı 160°C sıcaklık %2 su oranı için daha iyi olması nedeniyle, köpürtme amaçlı sıcaklık 160°C ve köpürtme amaçlı su %2 olarak uygun bulunmuştur.

Çizelge 4.7, Çizelge 4.8, Çizelge 4.9 ve Çizelge 4.10'a göre şu genellemeler yapılabilir:

- Yarılanma sürelerinin bitüm sıcaklığı arttıkça azaldığı ve genleşme oranlarının bitüm sıcaklığı arttıkça arttığı görülmektedir.
- Aynı bitüm sıcaklığında su miktarı artırılırsa yarılanma süresi azalmakta ve genleşme oranı artmaktadır. Aynı durum He ve Wong (2006) tarafından da belirtilmiştir.
- Su miktarındaki değişikliklerin bitüm ısısına göre genleşme oranı değerlerini daha fazla etkilediği görülmektedir ancak yarılanma süresi değerleri için net bir genelleme yapmak mümkün değildir.
- Iwanski vd. (2015)'te bitüm sınıfının artışının bitümün köpürme özelliklerini olumlu etkilediği belirtilmiş olup tez çalışmasında ise bitüm sınıfı artışıyla, genleşme oranı değerlerinde artış ve yarılanma süresi değerlerinde azalış gözlemlenmiştir.
- Tüm bitüm sınıfları düşünüldüğünde minimum yarılanma süresi 9 s ve minimum genleşme oranı 20 olarak kabul edilmesi uygun görünmektedir.

Tüm değerler Çizelge 2.2'de önerilen sınır şartlara göre uygun çıkmış olsa da çevresel (bitümün gereksiz ısıtılması) ve teknik (İÇM, esneklik modülü açısından daha stabil karışımlar) açıdan sıcaklık ve su yüzdesi değerlendirmesinde; genleşme oranlarının 20-21 ve yarılanma sürelerinin 9-10

s seviyesinde olduğu değerler, Şekil 4.2, Şekil 4.3, Şekil 4.4 ve Şekil 4.5’de ise bitümün farklı sıcaklık ve su yüzdeleri için kararlı davrandığı eğriler etkili olmuştur. Bitüm köpürtme işleminde %5 su içeriği kullanılmamasının nedeni; genleşme oranı ve yarılanma süresi açısından diğer yüzdeler gerekli minimum şartları sağlamıştır ve deneysel sonuçlara göre çizilen eğriler göstermiştir ki %5 su içeriğinde yarılanma süresi daha da düşme eğiliminde olacaktır. Bu da köpük bitümle yapılacak üretimlerde karışım homojenliğini olumsuz etkileyecek bir durumdur. Ayrıca köpürtme amaçlı kullanılan suyun artışı kaynak özetlerinde belirtildiği gibi; bitümün yaşlanmasına (Dong vd., 2017), bitüm köpüklerinin bozunmasına ve enerji kaybına (Iwanski vd, 2015; Jenkins, 2000) ve karışımda nem hasarına neden olabilmektedir (Hasan vd., 2017).

#### 4.5. Optimum Bitüm ve Aktif Filler Seçimi

Üretim serilerine ilişkin optimum bitüm ve aktif filler tipi seçimi için her üretime ait Çizelge 4.11’de verilen formlar hazırlanmış olup gerekli hesaplamalar bu formlardaki değerler kullanılarak yapılmıştır.

Çizelge 4.11. Örnek İÇM formu

Dolaylı Çekme Mukavemeti (İÇM-ITS) Deney Formu								
Üretim Adı (Kodu)	B2,2İK50Ç1							
Malzeme Tanımı	Kazınmış BSK							
Rapor Tarihi								
Maksimum Kuru Yoğunluk (t/m <sup>3</sup> )	2,053							
Optimum Nem İçeriği (%)	6							
Bitüm Sınıfı	50/70							
Bitüm Yüzdesi	2,2							
Aktif Filler Tipi	Çimento							
Aktif Filler Yüzdesi ve Gramı	%1 - 200							
Üretim Tarihi	25.1.2018							
2. Briket Sonrası Numune	Kap No	1	Yaş Ağ.(g)	395,40	Kuru Ağ.(g)	380,56	% Su	3,900
5. Briket Sonrası Numune	Kap No	2	Yaş Ağ.(g)	343,34	Kuru Ağ.(g)	331,53	% Su	3,562
40°C Etüve Koyuluş ve Çıkarılış Tarihi	26.01.2018				29.01.2018			
25°C Suya Koyuluş ve Çıkarılış Tarihi	29.01.2018				30.01.2018			

Çizelge 4.11. Örnek İÇM formu (Devam)

Dolaylı Çekme Mukavemeti (İÇM-ITS) Deney Formu								
Briket Ölçüleri	Kuru			Islak			Dp Briketleri	
	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.
Çap (mm)	101,50	101,60	101,50	101,60	101,50	101,50	101,50	101,50
Numunenin Yükseklik Ölçümleri								
1 (mm)	63,80	63,60	63,50	63,70	64,00	64,20	63,60	63,70
2 (mm)	63,90	63,20	63,80	63,40	63,80	64,10	63,60	63,60
3 (mm)	63,50	62,90	64,20	63,40	64,00	63,80	63,50	63,70
4 (mm)	63,70	63,60	63,90	63,60	63,90	64,10	63,60	63,60
Ortalama (mm)	63,73	63,33	63,85	63,53	63,93	64,05	63,58	63,65
Havadaki Ağırlık (g)							1.099,00	1.099,90
Sudaki Ağırlık (g)							610,00	613,90
Doygun Yüzey Kuru Ağırlık (g)							1.119,40	1.119,00
Hacim (cm <sup>3</sup> )							509,40	505,10
Hacim Özgül Ağırlık (Dp) (g/cm <sup>3</sup> )							2,16	2,18
Kür (Etüv) Öncesi Ağırlık (g)	1116,60	1114,70	1112,50	1116,20	1108,20	1113,90	1113,70	1117,20
Kür (Etüv) Sonrası Ağırlık (g)	1095,20	1096,40	1095,60	1098,80	1083,30	1088,90	1099,00	1099,90
Su Banyosu Sonrası Ağırlık (g)				1123,90	1120,70	1121,50		
Hacim Yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> )	2124,04	2135,59	2120,65	2133,52	2094,38	2101,10	2136,44	2135,67
Ortalama Hacim Yoğunluğu (Xn)	2118,21						2121,44	
Standart Sapma (Sn)	16,95						25,30	
Test Değeri (T0)	0,34	1,02	0,14	0,90	1,41	1,01	0,59	0,56
Uygun Olmayan Numuneler (T0>1,82)								
Nem İçeriği (Kuru Numune)(%)	1,95	1,67	1,54	1,58	2,30	2,30	1,34	1,57
Kuru Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	2082,53	2099,94	2087,94	2099,74	2046,24	2052,86	2107,86	2102,07
Dolaylı Çekme Mukavemeti								
	Kuru			Islak			Dp Briketleri (Kırılmasına Gerek Olursa)	
Nem İçeriği (Yaş Numune)(%)				2,28	3,45	2,99		
Test Tarihi	29.01.2018			30.01.2018				
Deplasman (Akma) (mm)	1,00	1,10	1,00	0,90	0,90	1,20		
Kırıldığı Anda Merkez Isısı (°C)	32,90			24,80				
Maksimum Yük (kg)	287,00	222,00	314,00	256,00	291,00	236,00		
Maksimum Yük (kN)	2,87	2,22	3,14	2,56	2,91	2,36	0,00	0,00
ITS (kPa)	282,48	219,67	308,45	252,51	285,52	231,10	0,00	0,00
Ortalama ITS (kPa)	270,20			256,38			0,00	
TSR (%)	94,89							
Kırıldığı Anda Briket Nem İçeriği	Yaş Ağ. (g)		1140,80	Kuru Ağ. (g)		1104,56	% Su	3,28

Formdaki hacim yoğunluğu, Wirtgen (2017)'e göre Denklem (4.1) ile hesaplanmıştır.

$$\text{Hacim Yoğunluğu} = (1.000.000 \cdot 4 \cdot \text{Numune ağırlığı}) / (3,14159 \cdot \text{numune yüksekliği} \cdot \text{numune çapının karesi}) \quad (4.1)$$

2. ve 5. briket sonrası nem kontrolü malzemenin uygun sıkıştırılabilmesi için nem durumunun nasıl değiştiğini görmek amacıyla yapılmaktadır (arazi şartlarında da kontrol yapılması önerilir).

Formdan görüldüğü üzere her üretimde 9 briket hazırlanmıştır. 3 tanesi İÇM<sub>kuru</sub>, 3 tanesi İÇM<sub>yaş</sub> hesabı için ve 3 tanesi de hacim özgül ağırlık (Dp) kontrolü için kullanılmıştır.

Maksimum kuru yoğunluk ve optimum su değerleri daha önceden yapılan ve Çizelge Ek.A.'da verilen modifiye proktor sonuçlarıdır.

Çizelge 4.12'de üretimlere ait formlara (Çizelge 4.11) ilişkin tüm veriler bulunmamaktadır. Bunun yerine özellikle üretim serileri için değişiklik gözlenen değerler verilmiştir. Diğer tüm veriler Çizelge Ek.A.'da verilmiştir.

Çizelge 4.12. Üretimlere ait formlardaki verilere göre oluşturulan tüm üretimlere ait özet çizelge

Seri adı	Üretim Kodu	Optimum su %	Ort. Dp (gr/cm <sup>3</sup> )	Ort. Kuru İÇM (kpa)	Ort. Yaş İÇM (kpa)	TSR (%)	Yaş CBR %	Marshall Stabilite 25°C	Marshall Stabilite 60°C
Bitümsüz RAP agregası %1 çimentolu	B2,5İKA070Ç1	5,2	2,217	140,05	196,05	139,99			
	B2,5İKA2070Ç1	5,9	2,229	179,77	165,89	92,282			
	B2,5İKA7070Ç1	6	2,17	158,38	230,12	145,3			
%1 Çimentolu Seriler	B1,3İK70Ç1	6	2,185	194,96	199,59	102,38			
	B1,9İK70Ç1	6	2,189	225,12	239,88	106,56			
	B2,2İK70Ç1	6	2,169	192,1	237,45	123,61			
	<b>B2,5İK70Ç1</b>	6	2,169	244,26	243,52	99,696	64,623		
	B2,8İK70Ç1	6	2,152	144,37	165,17	114,41			
	B3,1İK70Ç1	6	2,177	192,79	237,13	123			
	B3,7İK70Ç1	6	2,126	222	250,8	112,97			

Çizelge 4.12. Üretimlere ait formlardaki verilere göre oluşturulan tüm üretimlere ait özet çizelge (Devam)

Seri adı	Üretim Kodu	Optimum su %	Ort. Dp (gr/cm <sup>3</sup> )	Ort. Kuru İÇM (kpa)	Ort. Yaş İÇM (kpa)	TSR (%)	Yaş CBR %	Marshall Stabilite 25°C	Marshall Stabilite 60°C
%1 Çimentolu Seriler	B2,5KK70Ç1	5,2	2,195	220	257,6	117,07			
	B2,5NN70Ç1	3,9	2,176	272	244,8	90,064			
	B2,5KN70Ç1	4,4	2,195	302	312	103,46			
	B1,9İN70Ç1	6	2,183	230	237,3	103,31			
	B2,2İN70Ç1	6	2,155	265	224,9	85,004			
	B2,5İN70Ç1	6	2,15	223	236	105,93			
	B2,8İN70Ç1	6	2,147	221	247	111,89			
	B3,1İN70Ç1	6	2,086	148	205,3	139,06			
	B1,9İİ70Ç1	5,9	2,152	273	257,4	94,303			
	B2,2İİ70Ç1	5,9	2,149	299	291,8	97,602			
	B2,5İİ70Ç1	5,9	2,131	296	248,1	83,785			
	B2,8İİ70Ç1	5,9	2,143	296	279,7	94,484			
	B3,1İİ70Ç1	5,9	2,151	286	278,2	97,389			
	B1,9W70Ç1	4,1	2,127	253	223,5	88,181			
	B2,2W70Ç1	4,1	2,141	261	241,9	92,548			
	B2,5W70Ç1	4,1	2,116	172	196,7	114,58			
	B2,8W70Ç1	4,1	2,109	227	227,7	100,22			
	B3,1W70Ç1	4,1	2,092	196	165,3	84,514			
	B2,5W070Ç1	5	2,139	286	262,9	91,916			
	B2,5KİB70Ç1	4,8	2,161	289	293,5	101,62			
	B1,9KİS70Ç1	4,7	2,249	346	282,2	81,629			
	B2,2KİS70Ç1	4,7	2,256	246	277,6	113,05			
	B2,5KİS70Ç1	4,7	2,24	352	284,7	80,785			
	B2,8KİS70Ç1	4,7	2,242	311	356	114,38			
	B3,1KİS70Ç1	4,7	2,205	270	295,8	109,6			
	B1,9İK50Ç1	6	2,136	189	218,5	115,76			
	B2,2İK50Ç1	6	2,16	270	256,4	94,885			
	B2,5İK50Ç1	6	2,175	201	214	106,35		1.949,3	
	B2,8İK50Ç1	6	2,134	170,7	221,38	129,69			
	B3,1İK50Ç1	6	2,159	150,94	243,39	161,25			
	B1,9İK100Ç1	6	2,169	264,82	214,04	80,826			
	B2,2İK100Ç1	6	2,173	212,55	205,96	96,895			
	B2,5İK100Ç1	6	2,161	252	209,1	82,974			
	B2,8İK100Ç1	6	2,164	244,15	215,72	88,354			
	B3,1İK100Ç1	6	2,163	296,91	260,2	87,637			
	B1,9İK160Ç1	6	2,185	251,05	232,64	92,668			
	B2,2İK160Ç1	6	2,188	273,39	195,65	71,566			
	B2,5İK160Ç1	6	2,172	305,35	249,04	81,561			
	B2,8İK160Ç1	6	2,142	186,09	221,51	119,04			
	B3,1İK160Ç1	6	2,156	147,47	250,73	172,68			

Çizelge 4.12. Üretimlere ait formlardaki verilere göre oluşturulan tüm üretimlere ait özet çizelge (Devam)

Seri adı	Üretim Kodu	Optimum su %	Ort. Dp (gr/cm <sup>3</sup> )	Ort. Kuru İÇM (kpa)	Ort. Yaş İÇM (kpa)	TSR (%)	Yaş CBR %	Marshall Stabilite 25°C	Marshall Stabilite 60°C
%1 Kireçli Seriler	B2,5İK70K1-7	5	2,107	135,28	189,62	140,16	53,398		
	B1,9İK70K1	5	2,123	206,92	166,24	80,342			
	B3,1İK70K1	5	2,131	187,92	186,48	99,233			
	B2,5W70K1	5,1	2,128	184,56	169,72	91,962			
	B2,5İK160K1	5	2,144	148,85	169,68	114			
	B2,5İK100K1	5	2,114	160,25	214,47	133,84			
%1 Uçucu Küllü Seriler	B2,5İK70UK1	4,7	2,125	119,9	113	94,25	57,008		
	B1,9İK70UK1	4,7	2,129	101,37	74,66	73,653			
	B3,1İK70UK1-7	4,7	2,116	114,94	104,94	91,301			
	B2,5W70UK1	5,6	2,135	134,08	102,66	76,567			
	B2,5İK160UK1	4,7	2,132	123,29	107,93	87,539			
	B2,5İK100UK1	4,7	2,138	158,28	110,44	69,776			
Aktif Fillersiz Seriler	B2,5İK70-7	4,7	2,142	148,49	67,65	45,557	31,2		
	B1,9İK70	4,7	2,13	120,42	53,02	44,033			
	B3,1İK70	4,7	2,118	163,46	77,04	47,132			
	B2,5W70	5,3	2,125	120,81	67,38	55,771			
	B2,5İK160	4,7	2,142	125,17	76,02	60,736			
	B2,5İK100	4,7	2,088	132,85	105,04	79,067			
Kireç ve Uçucu Küllü üretim	B2,5İK70K1UK1	4,6	2,137	197,34	258,51	131		2.026,5	498

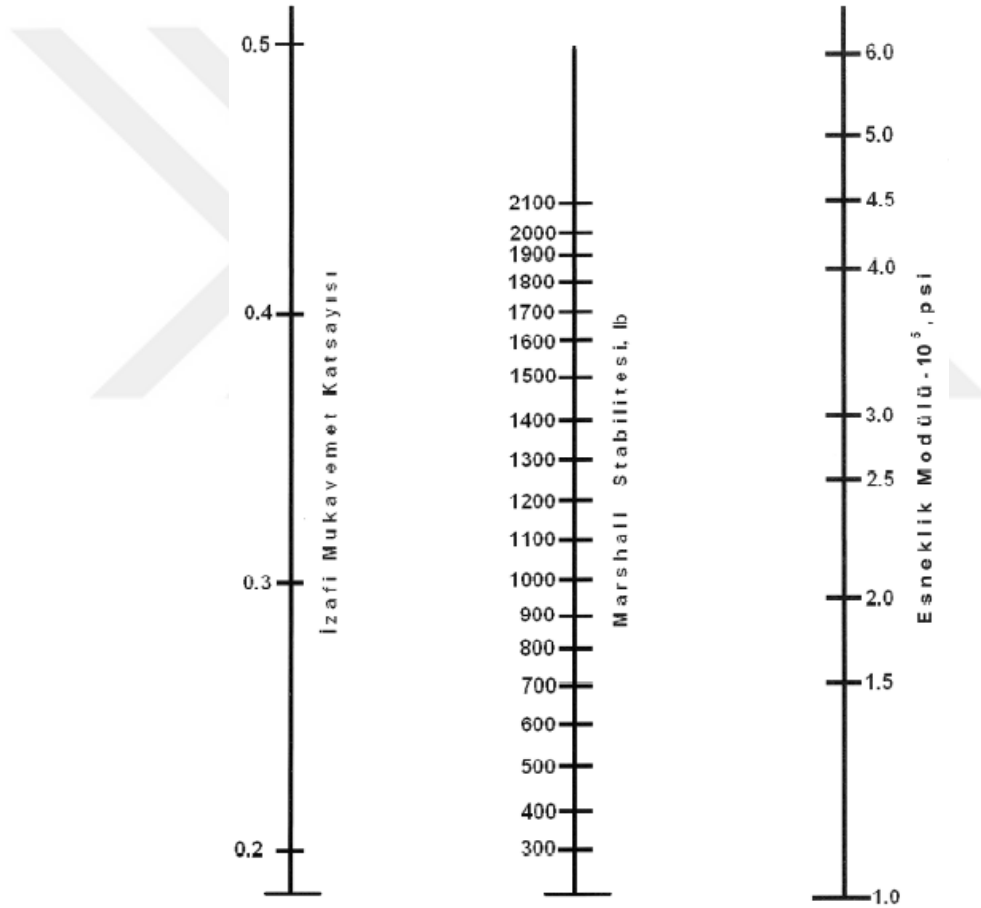
Çizelge 4.12 ile ilgili açıklama ve değerlendirmeler:

B2,5İK50Ç1 üretimi için ilave briketler hazırlanmış ve aynı üretimin diğer İÇM<sub>kuru</sub> numuneleriyle aynı kür koşullarından sonra bu ilave briketler normalden farklı olarak 25°C suda 35 dk tutularak Marshall Stabilite değerleri incelenmiştir ve sonuçlar oldukça yüksek çıkmıştır (Çizelge 4.12).

B2,5İK70K1UK1 üretimi için de benzer yöntem izlenmiş 25°C'ye ilave olarak da briketler hazırlanmış ve bu briketler normal prosedüründe olduğu şekilde 60°C suda 35 dk bekletilerek Marshall Stabilite deneyi yapılmıştır. 25°C'deki sonuçlar yine yüksek çıkmış ancak 60°C'deki sonuçlar oldukça düşük çıkmıştır. Üretimlerde kullanılan aktif fillerin malzemeyi oldukça rijitleştirdiği ancak bitüm ve aktif filler yüzdelerinin düşük olması nedeniyle, yüksek ısıda bağlayıcı

fazın gevşeyerek dayanımının buna bağlı olarak ciddi oranda (Çizelge 4.12) düştüğü düşünülmektedir.

Elde edilen sonuçlar (üretimlerin esneklik modülleri de kullanılarak) ile Şekil 4.7'den izafi mukavemet katsayısı elde edilmiş (yaklaşık 0,45) ancak deneysel çalışmaya ve literatür bilgisine bağlı olarak değerlerin KBST için uygun olmayacağına karar verilmiştir. Bu nedenle köpük bitümlü stabilize malzeme için Marshall stabilite deneyi değerlendirme için uygun bir kriter olarak görülmemektedir.



Şekil 4.7. BSK tabakaları için tabaka katsayısı seçim abağı (AASHTO, 1993; Sağlık ve Güngör, 2008)

B2,5KİS70Ç1 üretimi Tip 8 gradasyona (%10 RAP-%90 yeni agrega) (Çizelge 3.1) göre (sathi kaplama temsili) üretimdir. B2,5KİB70Ç1 üretimi ise aynı gradasyonun sadece No.40 elek altı malzemede yeni agrega kullanılmış halidir.

İki üretim  $\dot{I}CM_{yaş}$  değerleri açısından oldukça yakın bulunmuşken, B2,5KİB70Ç1 üretiminin  $\dot{I}CM_{kuru}$  değeri, B2,5KİS70Ç1'ye göre düşük çıkmıştır.

Asfalt Analizatöründen çıkan bitümü ayrıştırılmış agrega ve RAP malzemenin farklı oranlarda karıştırılmasıyla yapılan üretimlerin  $\dot{I}CM$  değerlerinde tamamen doğrusal bir artış ya da çıkış olmasa da B2,5İKA070Ç1, B2,5İKA2070Ç1, B2,5İKA7070Ç1 ve B2,5İK70Ç1 arasında en yüksek  $\dot{I}CM$  kuru ve yaş değerlerini B2,5İK70Ç1 (bitümü ayrıştırılmış agregası olmayan) %100 RAP ile yapılan üretim vermiştir. Bu da RAP'teki bitümün (penetrasyon değerinden de görüldüğü üzere) aslında tam olarak inaktif olmadığını desteklemektedir. Ancak benzer mantıkla %90 yeni agregayla üretilen KİS üretiminin %100 RAP ile üretilen KİB üretiminden  $\dot{I}CM_{kuru}$  açısından iyi sonuç vermesi; iki kıyas arasındaki gradasyon farklılığından olabileceği gibi bitümden ayrıştırılmış agreganın yeni agregaya göre yıpranma ihtimalinden de kaynaklanmış olabileceği düşünülmektedir.

Her seri için ve tüm bitüm yüzdeleri için düşünülürse; gradasyon açısından, No.4 elek üstü malzeme kabalaştıkça (No.4 elek üstündeki eleklerden geçen malzeme yüzdelerinin düşmesi) ve No.4 elek altı malzeme inceldikçe (No.4 elek altındaki eleklerden geçen malzeme yüzdelerinin yükselmesi)  $\dot{I}CM_{kuru}$  değerleri artmaktadır. Aynı yorum  $\dot{I}CM_{yaş}$  için de yapılabilir.

Farklı bitüm sınıfları için üretimler İK gradasyonunda yapılmıştır. Bitümün yumuşaması  $\dot{I}CM$  değerlerini bir miktar artırmıştır.

Tüm üretimlerde TSR ve  $\dot{I}CM_{yaş}$  değerleri kaynak özetlerinde Wirtgen (2012) tarafından önerilen minimum değerleri sağladığı için  $\dot{I}CM_{kuru}$  üzerinden değerlendirme yapılmıştır. Bazı üretimlerde  $\dot{I}CM_{yaş}$  değeri  $\dot{I}CM_{kuru}$  değerinden yüksek çıkmış bu nedenle TSR değeri %100'ü geçmiştir. Kaynak özetlerinde Schwartz ve Khosravifar (2013) ve Diab ve Enieb (2018) tarafından önerilen TSR değerlerine göre yüksek olan ve özellikle çimentolu serilerde gerçekleşen bu durum için, numunelerin etüv sonrası 24 saat su içerisinde beklemesinin



çimentolu serilerde hidrasyon olayından dolayı İÇM değerini artırmasıyla açıklanabilir.

Serilerde denenen %1,9-3,1 aralığından farklı bitüm yüzdelerinin sonuçlara etkisini araştırmak için B1,3İK70Ç1 ve B3,7İK70Ç1 üretimleri yapılmıştır. Ancak iki üretimde de serinin optimum bitüm yüzdeli üretimine (B2,5İK70Ç1) göre İÇM<sub>kuru</sub> değerleri düşmüş, İÇM<sub>yaş</sub> değerleri %1,3 bitüm için düşmüş %3,7 bitüm için önemsiz düzeyde artmıştır (Çizelge 4.12). Dolayısıyla bitüm miktarını çok artırmak ya da çevresel ve ekonomik nedenlerle çok azaltmak uygun görülmemektedir.

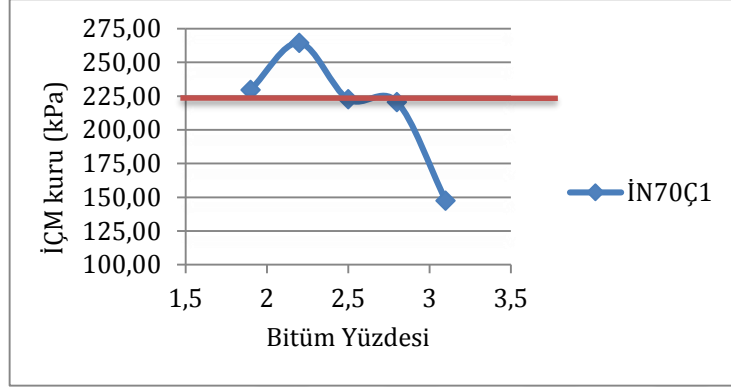
Bitüm yüzdesinin yüksek seçilmesi durumunda; bitüm bir noktadan sonra homojen dağılmak ya da kaba agregayı sarmak yerine Thompson vd, (2009)'nin belirttiği gibi bitüm topakları oluşturmaktadır. Şekil 4.8.b'de görülen numune iç yapısı Şekil 4.8.a'da görülene göre daha homojen bitüm dağılımı açısından Jones vd. (2008)'de belirtilen ideal karışım tarifine uymaktadır. Şekil 4.8.a'daki problem muhtemel olarak karışımda nem içeriği fazlalığı ya da bitüm fazlalığından kaynaklanmaktadır. Sıkıştırmanın optimum su muhtevasında yapılması ve bitüm yüzdesinin karışımlarda kullanılan en yüksek değer olan %3,1 olması problemin bitüm fazlalığı olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.8. Solda Şekil a'da görülen %3,1 bitümle üretilmiş KBSM ve sağda Şekil b'de %2,2 bitümle üretilmiş KBSM

Optimum bitüm yüzdesi belirlenirken Şekil 4.9'dan görüldüğü üzere İÇM<sub>kuru</sub> değeri 225 kPa ve üzeri olan bitüm yüzdeleri dikkate alınmıştır. Eğer bu değer üzerinde birden fazla değer var ve bitüm yüzdeleri 1,9 ve 2,8 gibi oldukça farklı

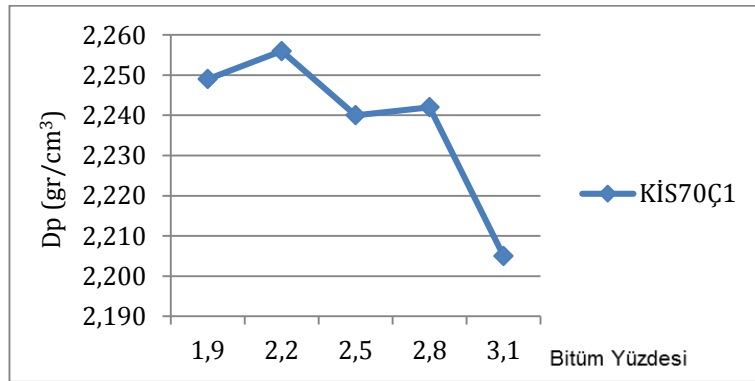
ise maliyet açısından düşük olan seçilmiştir. Ancak bitüm yüzdeleri 2,5 ve 2,8 gibi yakın ama İÇM'ler arası fark oldukça fazla ise teknik açıdan düşünülerek yüksek İÇM veren bitüm yüzdesi seçilmiştir.



Şekil 4.9. İN gradasyonu çimentolu üretim için optimum bitüm yüzdesi seçim grafiği

Çizelge 4.12'de kırmızı kodlar üretim serilerine ait optimum değerler olarak seçilmiştir. Tek üretimlerde (KK-NN-KN-KİB) sabit %2,5 bitüm kullanılmıştır. Çizelge 4.12'ye göre genel olarak düşünüldüğünde, serilerin optimum bitüm değerleri %1,9-2,2 gibi düşük yüzdelerde çıkmaktadır. Bu nedenle uygulamada %1,8-2 ve 2,2 bitüm yüzdeleri için İÇM kontrolü yapmanın yeterli olacağı düşünülmektedir.

Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'dan görüldüğü üzere bitüm yüzdesi artışı ile İÇM için de Dp için de değerler bir noktada maksimuma ulaşip daha sonra tekrar düşüşe geçmektedir. Her üretim serisi için benzer durum söz konusudur.



Şekil 4.10. KİS serisi için bitüm yüzdesi - Dp değişimi

Dp değerinin genel olarak bitüm yüdesi artışı ile düşme eğilimi, bitümün belli bir yüdeden sonra sıkışmayı zorlaştıracı etki yapabilme ihtimalinden kaynaklanmaktadır. Yüksek bitüm yüzdesinde çok iyi sıkışamayan malzemenin İÇM değerlerinin de düşmesi beklenen bir durumdur.

Seriler arasında genel değerlendirme yapılırsa çimento ile hazırlanmış seriler İÇM açısından en iyi sonuçları vermiştir. Bunu kireçle hazırlanmış seriler izlemiş ve en kötü sonuçlar aktif filler kullanılmayan üretimlerden elde edilmiştir. Fu vd. (2010) ve Jones vd. (2008)'nin çalışmalarında da belirttikleri gibi çimento KBSM'nin neme duyarlılığını azaltmıştır. Kireçli, uçucu küllü ve aktif fillersiz seriler İÇM açısından gerekli kriterleri sağlayamamıştır. Bu nedenle çimento dışındaki aktif fillerlerin tek başlarına kullanımları önerilmemektedir. Sadece, B1,9İK70K1 ve B2,5İK70K1UK1 üretimleri çimentolu üretimlere yakın sonuçlar vermişlerdir. B2,5İK70K1UK1 için düşünüldüğünde, farklı filler tiplerinin birlikte kullanılmasının olumlu olabileceği görünmektedir.

Ayrıca uçucu kül geç dayanım kazanan bir ürün olduğu için ve Austroads (2011)'de belirtildiği gibi çalışmada uygulanan kürün arazi şartlarında 3-6 ay'a tekabül etmesi nedenleriyle, uçucu küllü üretimlerin uzun vadeli dayanımının gözlenmesi düşünülebilir.

Uçucu küllü ve kireçli serilerden çimentolu serilere göre daha düşük Dp değerleri bulunması; kirecin boşluklu yapısı ve çimentonun uçucu külden daha yüksek özgül ağırlığa sahip olmasıyla açıklanabilir.

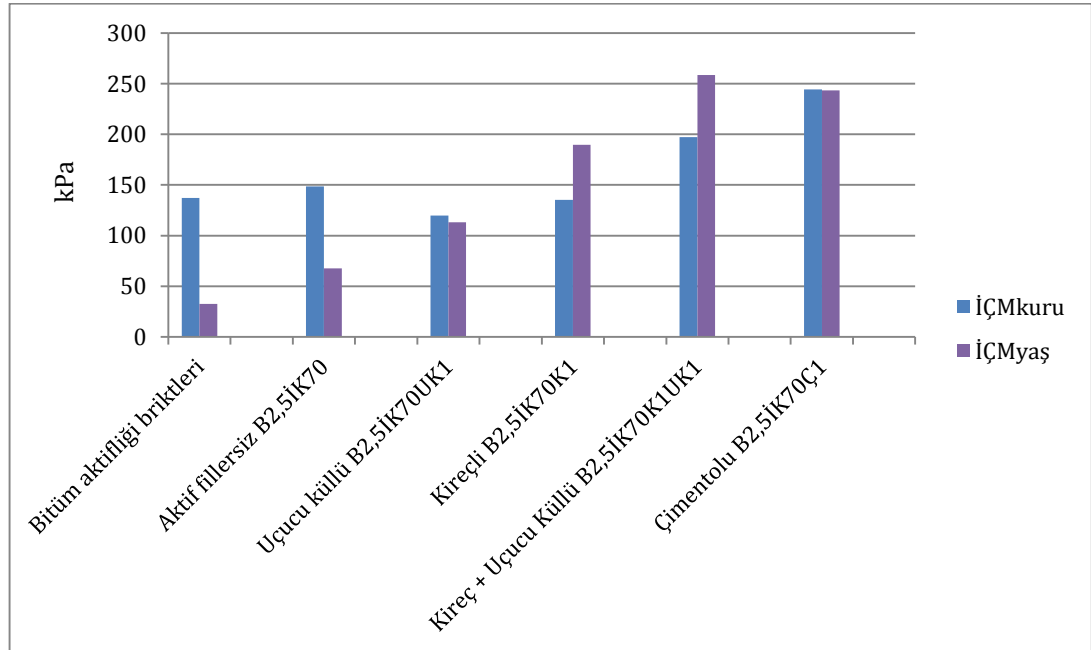
Çimento en uygun filler olarak belirlendiği ve 2,5 bitüm yüzdesi tüm gradasyon üretimleri için ortak olduğu için çimentolu serilerde 2,5 bitüm yüzdeli üretimlerin Dp değerleri kıyaslanırsa; No.4 altı malzeme inceldikçe Dp değeri düşmüş, No.4 üstü malzeme kabalaştıkça Dp değeri artmıştır.

Çizelge 4.13'de bitüm aktifliği için hazırlanan briketler (aktif fillersiz ve köpük bitümsüz olarak), aktif fillersiz (köpük bitümlü) olarak ve %2,5 köpük bitüm ve

farklı aktif fillerle hazırlanan briketlerle kıyaslanmıştır. Çizelgeden görüldüğü üzere köpük bitüm eklenmeden hazırlanan briketlere sadece köpük bitüm eklendiğinde İÇM değerleri çok fazla artış göstermemiştir. Sadece köpük bitüm eklemek bitüm aktifliği briketlerinden elde edilen değerlere göre bir miktar artış göstermiştir. Uçucu kül ya da kireç eklemek sadece İÇM<sub>yaş</sub> değerini olumlu etkilemiştir ki İÇM<sub>yaş</sub> değerinin aktif filler ihtiyacına işaret ettiği kaynak özetleri bölümünde bahsedilmiştir. Hem uçucu kül hem de kirecin kullanıldığı üretimde kayda değer bir artış olmuştur, ancak asıl etkiyi çimento yapmıştır. Çizelgeden görüldüğü üzere aktif filler kullanılması İÇM değerleri üzerinde bitümden daha etkili olmaktadır.

Çizelge 4.13. Aktif filler tipinin İÇM değerlerine etkisi

Üretim tipi	İÇM <sub>kuru</sub>	İÇM <sub>yaş</sub>
Bitüm aktifliği briktleri	137,25	32,6
Aktif fillersiz B2,5İK70	148,49	67,65
Uçucu küllü B2,5İK70UK1	119,9	113
Kireçli B2,5İK70K1	135,28	189,62
Kireç + Uçucu Küllü B2,5İK70K1UK1	197,34	258,51
Çimentolu B2,5İK70Ç1	244,26	243,52



Şekil 4.11. Aktif filler tipinin İÇM değerlerine etkisi

Aynı üretimler için Çizelge 4.12’de verilen CBR değerleri için de çimentonun en etkili filler olduğu görülmektedir. Ayrıca %100 RAP malzeme için CBR değerlerinin Wirtgen (2012) ve Seferoğlu vd. (2015)’de belirtildiği gibi standart kırmataş malzemedenden düşük çıkması beklenen bir durumdur.

Çizelge 4.14’de verilen B2,8W70Ç1-7 üretim kodu için 18 briket üretilmiş olup 9 tanesi için diğer üretimlerdeki standart prosedür izlenmiştir. Diğer 9 briket ise üretimin tüm briketleri etüvden çıktıktan sonra çizelgede görülen 3 farklı koşulda bekletilip kırılmış ve İÇM değerlerinin nasıl değiştiği gözlemlenmiştir.

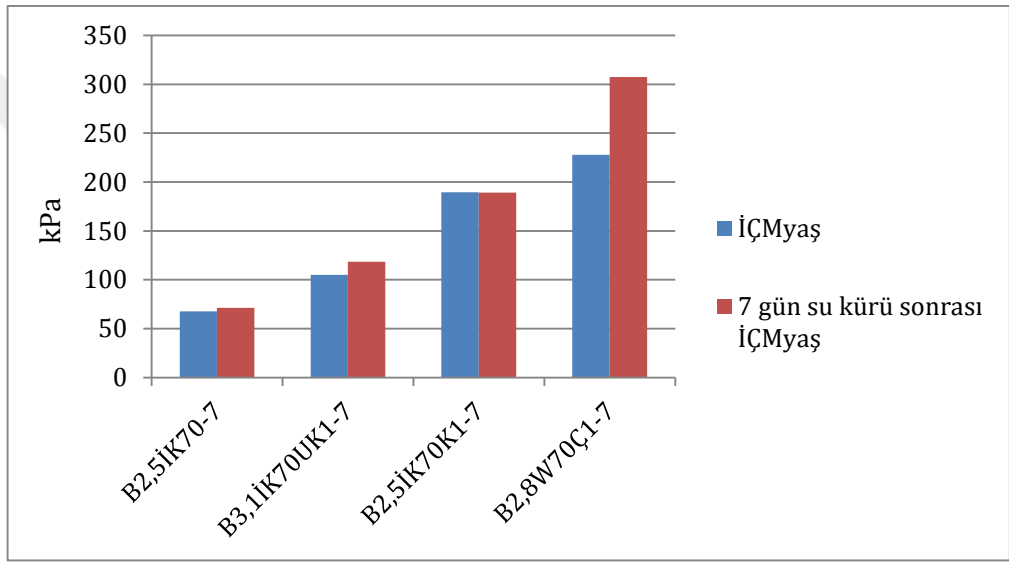
Çizelge 4.14. Farklı koşullarda bekletilmiş aynı üretim numuneleri için İÇM değerleri

B2,8W70Ç1-7				
Kuru	Yaş	Etüv Sonrası 7 Gün Suda 25°C	Etüv Sonrası 7 Gün Havada 25°C	Etüv Sonrası 7 Gün Etüvde 40°C
227,18	227,67	307,51	407,89	226,10

Çizelge 4.14’den görüldüğü üzere, malzemenin sürekli etüvde bekleme dışındaki koşullarda zamanla İÇM değerleri artmaktadır. Etüvde bekletilen malzemenin su kaybının fazla olması, uzun zamanda gerçekleşen hidrasyon olayının (Graziani vd., 2018; Papavasiliou ve Loizos, 2013) hızlı su kaybıyla durduğu ve buna bağlı dayanım artışı olmadığı anlamına gelmektedir. Fu vd. (2010) tarafından da belirtildiği gibi sıkıştırmadan sonra karışımda bulunacak fazla su agrega-mastik harç arası bağların zarar görmesine neden olmuştur. Laboratuvar ortamında (havada) bekletilen numunenin suda bekletilene göre daha yüksek sonuç vermesi; malzemedeki hem hidrolik hem de hidrokarbonlu bağlayıcı yüzdesinin düşük olması nedeniyle su içerisinde bağların belli bir seviyeden ileriye geçemediği ya da oluşan bağların zarar gördüğü, havadaki numunede ise optimum su bulunması hidrasyon için uygun ortam oluşturmakta ve dayanım artışı sağlanabildiği anlamına gelmektedir. Bu nedenlerle arazi koşullarında köpük bitümle stabilize temel tabakası uygun hava koşulları bulunması halinde hemen sıcak karışım katmanlarıyla kaplanmamalıdır.

B2,5İK70K1-7, B3,1İK70UK1-7 ve B2,5İK70-7 üretimlerinde Dp briketleri standart kür prosedürünün ardından 7 gün su banyosunda bekletilerek tartılmış ve kırılmaları yapılmıştır, ancak su emme açısından ya da İÇM açısından hiçbirisinde de üretimlerin normal kür sonucunda elde edilen İÇM<sub>yaş</sub> değerlerine göre anlamlı bir fark gözlenmemiştir (Şekil 4.12).

7 gün suda bekletilen kireçli, uçucu küllü ve aktif fillersiz karışımlarda önemli bir dayanım artışı gözlenmezken çimentolu üretimde artış olması da hidratasyon olayından kaynaklanmaktadır.



Şekil 4.12. Kür sonrası 7 gün suda bekletilen briketlerin İÇM değerlerinin aynı üretimlere ait İÇM<sub>yaş</sub> değerleriyle kıyaslanması

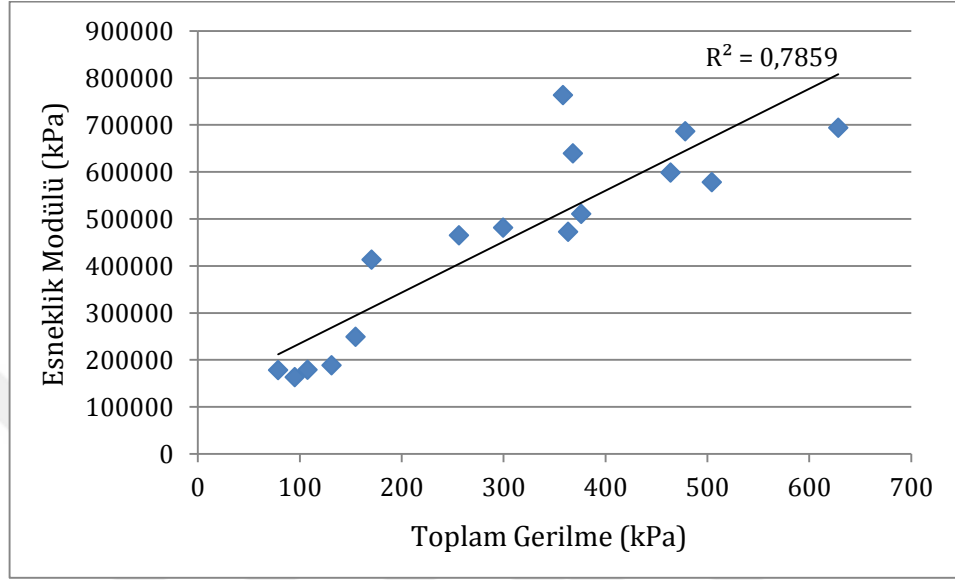
B2,5İK70 üretimlerinde Çizelge 4.15’de verilen karışım suyu ihtiyacı değişikliği, çimentonun hidratasyon için daha çok suya ihtiyaç duyması ile açıklanabilir.

Çizelge 4.15. B2,5İK70 üretimlerine ait filler tipi optimum su yüzdesi değişimi

Filler Tipi	Optimum Su %
Ç1	6
K1	5
UK1	4,7
Fillersiz	4,7

#### 4.6. Esneklik Modülü Bulguları

Şekil 4.13'de; esneklik modülü deneyi sırasında o üretime ait tüm sekansların (adımların) esneklik modüllerine ilişkin dağılım görülmektedir.



Şekil 4.13. B2,5KN70Ç1-K numunesi için esneklik modülü toplam gerilme bağıntısı

Çizelge 4.16'da, esneklik modülü deneyinden bulunan her sekans için esneklik modülü değerleri ve Bölüm 3.7.3'de hesaplanmış olan bulk stress (toplam gerilme) için Denklem (4.2) yardımıyla hesaplanan esneklik modülü değeri görülmektedir.

Çizelge 4.16. B2,5KN70Ç1-K numunesi için esneklik modülü çizelgesi (her 100 döngünün son 5 değeri)

B2,5KN70Ç1-K						
Sekans	Tekrarlı Yük Sayısı	Çevre Basıncı (kPa)	Son 5 Bulk Stress (kPa)	Tekrarlı Deviator Gerilme (kPa)	Esnek Birim Deformasyon (%)	Esneklik Modülü (kPa)
1	1000	103,4	367,93	57,73	0,0090283	639.760
2	100	20,68	78,697	16,657	0,0093833	178.260
3	100	20,68	94,937	32,897	0,020238	163.240
4	100	20,68	107,713	45,673	0,026172	179.410
5	100	34,47	131,049	27,639	0,01476	188.810
6	100	34,47	154,62	51,21	0,021201	249.150

Çizelge 4.16. B2,5KN70Ç1-K numunesi için esneklik modülü çizelgesi (her 100 döngünün son 5 değeri) (Devam)

Sekans	Tekrarlı Yük Sayısı	Çevre Basıncı (kPa)	Son 5 Bulk Stress (kPa)	Tekrarlı Deviator Gerilme (kPa)	Esnek Birim Deformasyon (%)	Esneklik Modülü (kPa)
7	100	34,47	170,31	66,9	0,0176	413.480
8	100	68,95	256,153	49,303	0,010651	465.490
9	100	68,95	299,628	92,778	0,01968	481.530
10	100	68,95	363,26	156,41	0,033323	472.700
11	100	103,4	358,247	48,047	0,0063908	763.330
12	100	103,4	376,186	65,986	0,012984	510.900
13	100	103,4	463,91	153,71	0,02607	598.860
14	100	137,9	478,206	64,506	0,0099413	686.570
15	100	137,9	504,516	90,816	0,015977	578.240
16	100	137,9	628,44	214,74	0,032005	693.890
Denklem (4.2) ile hesap			55,75			322.022

Çizelge 4.16'dan görüldüğü üzere, esneklik modülü değerleri cihazın verdiği sonuçlara göre genel olarak çevresel ve deviator gerilmeyle orantılı olarak artmaktadır. Cihaz tarafından verilen en düşük çevre basıncı olan 20,68 kPa değeri genelde, köpük bitümle stabilize malzemenin üstyapıda konumlanacağı derinlikten daha aşağıda bulunan ve yanal olarak sınırlanmış zeminler için kullanılmaktadır. Çevre basıncının giderek artması da daha derin tabakaların simülasyonu içindir.

Denklem (4.2), Çizelge 4.16'da görülen esneklik modülü değerlerine (1. şartlandırma sekansı hariç) göre çıkarılmış olan k- $\theta$  model bağıntısıdır.

$$M_R = 29.554 * B^{0,594} \quad (4.2)$$

Burada;

B : Denklem (3.25) yardımıyla bulunan toplam gerilme

Her üretim için bu şekilde bulunan esneklik modülü değerlerine göre sonuçlar Ek.B'de verilmiştir ve Denklem (4.3) kullanılarak KBSM üretimlerine ait tabaka katsayıları belirlenmiştir (AASHTO, 1993; Kök, 2008; Schwartz ve Khosravifar, 2013).



$$a = 0,249 \times \log E_{BS} - 0,977$$

(4.3)

Burada;

$E_{BS}$ , psi cinsinden esneklik modülü değeridir.

Çizelge 4.17. Kuru numune deney sonuçlarına göre üretimlere ait çizelge

Seri adı	İÇM (kPa)	MR (kPa)	MR (MPa)	MR (psi)	Tabaka katsayısı (a)
B2,5İK70Ç1-K	244,26	399.265,5	399,266	57.907	0,21
B2,2İK50Ç1-K	270,20	539.734,7	539,735	78.279	0,24
B1,9W70Ç1-K	253,46	440.874,9	440,875	63.941	0,22
B1,9İK100Ç1-K	264,82	403.582,3	403,582	58.533	0,21
B1,9İİ70Ç1-K	272,97	150.538,5	150,538	21.833	0,10
B1,9İK160Ç1-K	251,05	334.901,1	334,901	48.572	0,19
B1,9KİS70Ç1-K	345,66	209.411,2	209,411	30.371	0,14
B2,5KN70Ç1-K	301,59	322.022,1	322,022	46.704	0,19
B2,2İN70Ç1-K	264,55	197.908,1	197,908	28.703	0,13
B2,5İK70K1UK1-K	197,34	351.439,1	351,439	50.970	0,20

Çizelge 4.17’de kuru numunelere ait tüm deneysel sonuçlar verilmiştir. Çizelge’den görüldüğü üzere;

İK gradasyonu için 160 penetrasyonlu üretimin esneklik modülü değeri, diğer bitüm sınıflarına göre düşük çıkmıştır.

No.4 altı malzemenin incelenmesi (KİS ve KN gradasyonlu üretimlerde olduğu gibi) üretimde İÇM değerini artırmaktadır, ancak esneklik modülü ve buna bağlı olarak tabaka katsayısının artması için No.4 altı malzemeyi kabalaştırıp No.4 üstü malzemeyi inceltmek gereklidir (İK gradasyonuna benzer şekilde).

Ayrıca Kİ ve İİ gradasyonlarında ince malzemenin bitümsüz yeni agregayla ikame edilmesinin de bu üretimlerin esneklik modülü değerlerini düşürücü etkenlerden olduğu düşünülmektedir.

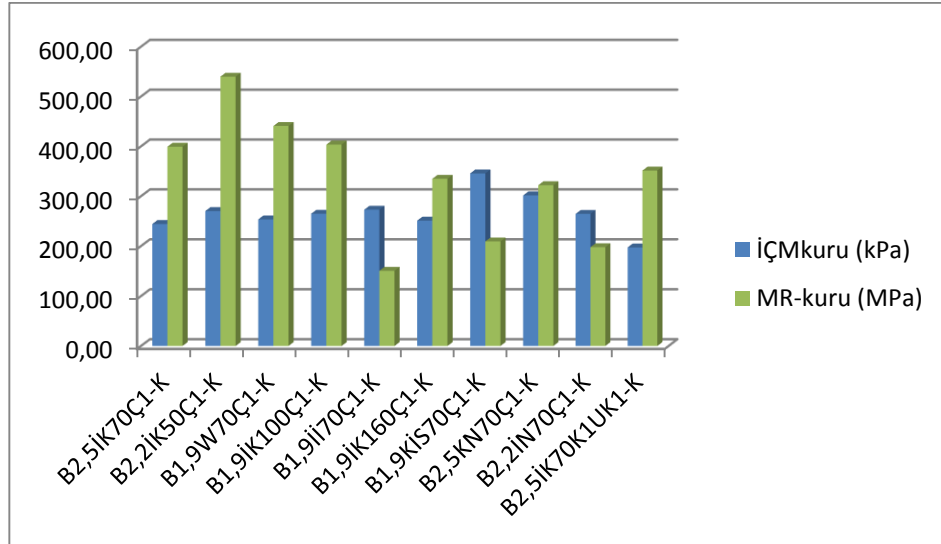
B2,5İK70K1UK1 üretiminde çimento olmamasına rağmen ve İÇM değeri düşük olmasına (Çizelge 4.12) rağmen tabaka katsayısı 0,20 bulunmuştur. Tabaka

katsayısının yüksek seviyede çıkması gradasyonun etkinliğini ve farklı aktif fillerlerin birarada kullanımının olumlu sonuç verdiğini ortaya koymaktadır.

Sağlık vd. (2013), ülkemizde Kızılcahamam-Gerede yolunda denenmiş olan köpük bitümle geri dönüşüm uygulamasının ilk yapıldığında tabaka katsayısını 0,20 bulunmuşken, iki yıl sonra 0,31 olarak tespit etmişlerdir. Tabaka katsayısındaki artışın çimento hidrasyonuna bağlı olduğu düşünülmektedir.

Kaynak özetlerinde Wirtgen (2012) tarafından %100 RAP malzeme için minimum 1.000 MPa ve %50 RAP+%50 kırmataş malzeme için minimum 800 MPa esneklik modülü önerilmiştir. Bu değerler deneylerde elde ettiğimize göre oldukça yüksektir. Ancak Çizelge 4.17 incelendiğinde RAP malzemenin kırmataş malzeme ile ikamesi Wirtgen (2012) ile paralel olarak esneklik modülü değerini düşürmektedir. Bu durum Yan vd. (2014)'de belirtildiği gibi RAP malzemedeki yaşlı bitümün hala bir miktar aktif olduğunu göstermektedir.

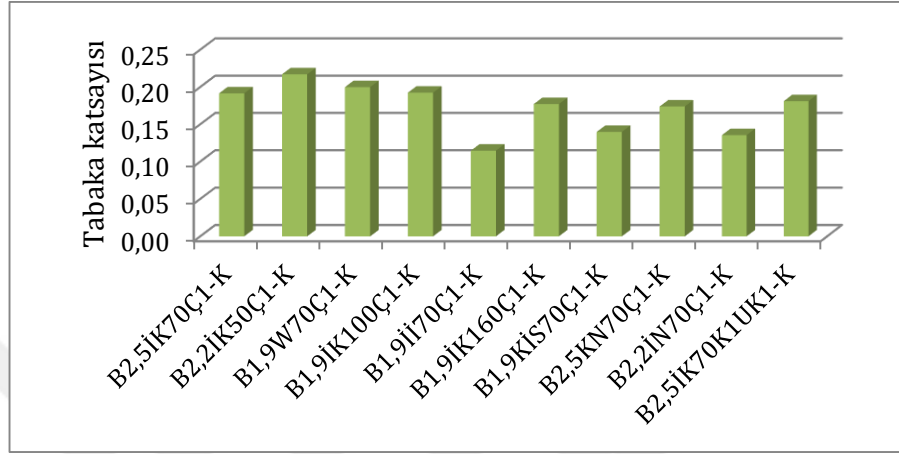
Şekil 4.14 ve Şekil 4.15'den görüleceği gibi tabaka katsayısı yüksek çıkan üretimler İÇM ve MR açısından da daha kararlı sonuçlar vermişlerdir.



Şekil 4.14. Çizelge 4.17'de verilen üretimler için MR ve İÇM değerlerinin kıyaslanması

Şekilden görüldüğü üzere en yüksek esneklik modülü değeri 50/70 sınıfı bitümle yapılan üretimden elde edilmiştir. 50/70 sınıfı bitümle yapılan

üretimde bitümün diğer bitüm sınıflarına göre daha viskoz olması nedeniyle numunelerin deformasyon direnci artmıştır. En yüksek İÇM değeri ise KİS gradasyonlu üretimden elde edilmiştir. KİS gradasyonunda %90 yeni agrega olması malzemenin daha iyi sıkışmasını sağlamış ve nem hassasiyetini azaltmıştır.



Şekil 4.15. Çizelge 4.17.'de verilen üretimler için tabaka katsayılarının kıyaslanması

Çizelge 4.17'de verilen sonuçlara göre KBSM için Çizelge 4.18'deki sınır değerlerin kullanılması önerilmektedir (tabaka katsayılarında virgülden sonraki 3. hanesi 5 ve üzeri olan rakamlar için, 2. haneler bir üst rakama yuvarlanmışlardır).

Çizelge 4.18. Deneysel sonuçlara göre çalışmada önerilen sınır değerler

Esneklik Modülü (Mpa)	≥ 400
Tabaka katsayısı	≥ 0,21

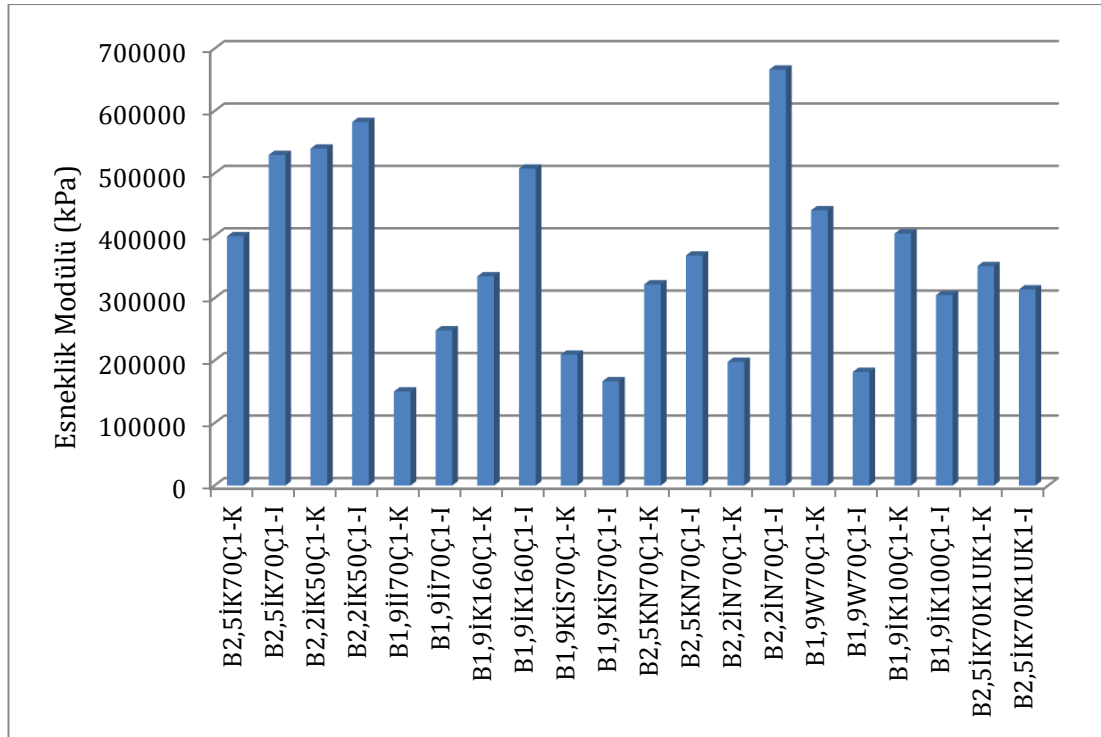
Çizelge 4.19'da tüm üretimlere ait kuru ve ıslak esneklik modülü değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.19. Kuru ve ıslak tüm numunelere ait esneklik modülü değerleri

Seri adı	MR (kPa)	MR (psi)	Tabaka katsayısı (a)
B2,5İK70Ç1-K	399.266	57.907	0,21
B2,5İK70Ç1-I	529.634	76.814	0,24

Çizelge 4.19. Kuru ve ıslak tüm numunelere ait esneklik modülü değerleri (Devam)

Seri adı	MR (kPa)	MR (psi)	Tabaka katsayısı (a)
B2,2İK50Ç1-K	539.735	78.279	0,24
B2,2İK50Ç1-I	582.576	84.492	0,25
B1,9İİ70Ç1-K	150.538	21.833	0,1
B1,9İİ70Ç1-I	248.354	36.019	0,16
B1,9İK160Ç1-K	334.901	48.572	0,19
B1,9İK160Ç1-I	507.725	73.637	0,23
B1,9KİS70Ç1-K	209.411	30.371	0,14
B1,9KİS70Ç1-I	166.924	24.209	0,11
B2,5KN70Ç1-K	322.022	46.704	0,19
B2,5KN70Ç1-I	368.342	53.422	0,2
B2,2İN70Ç1-K	197.908	28.703	0,13
B2,2İN70Ç1-I	666.535	96.669	0,26
B1,9W70Ç1-K	440.875	63.941	0,22
B1,9W70Ç1-I	181.826	26.371	0,12
B1,9İK100Ç1-K	403.582	58.533	0,21
B1,9İK100Ç1-I	304.832	44.211	0,18
B2,5İK70K1UK1-K	351.439	50.970	0,2
B2,5İK70K1UK1-I	313.972	45.536	0,18



Şekil 4.16. Islak ve kuru üretimler için esneklik modülü değerlerinin kıyaslanması

Şekil 4.16'ya genel olarak bakıldığında ıslak numunelerin esneklik modülü değerleri kuru numunelere göre daha yüksek çıkmıştır. KBSM boşluk oranı (%10-15) yüksek olduğu için boşluklara giren suyun basıncının da ıslak numune sonuçlarını artırmış olabileceği düşünülmektedir.

Numunenin arazi şartlarında suyla karşılaşması, üstyapıyı tahrip edecek kadar uzun süre suya maruz kalmadığı sürece, dayanım açısından problem doğurmayacağı yorumu Şekil 4.12 ve Şekil 4.16'ya göre yapılabilir. Ayrıca drenaja izin verebilecek boşluk yüzdesine sahip bir katman olmasına karşın küçük parçacıkların bitümlle bağlanması nedeniyle de borulanma olayı ve buna bağlı olarak üstyapıya alttan desteğin azalması riski de düşük görünmektedir. Sonuç olarak KBST, temel tabakasına göre teknik açıdan avantajları olan bir tabakadır.

KBST için yapılan deneysel çalışmalar ışığında Çizelge 4.20'de ideal gradasyon aralığı önerilmiştir.

Çizelge 4.20. Deneysel sonuçlara göre KBST için önerilen gradasyon

Elek Çapı (mm)	Geçen (%)
37,5	100
25	98-100
19	90-97
12,5	78-89
9,5	70-81
4,75	50-60
2	28-36
0,425	8-16
0,18	4-10
0,075	1-6

Çizelge 4.20'de KBST için önerilen ideal gradasyon alttaki yorumlara göre oluşturulmuştur (kodları verilen gradasyonlar Çizelge 3.1'de bulunmaktadır):

KİS gradasyonu, İK gradasyonuna göre oldukça farklıdır ve tabaka katsayısı da İK gradasyonlu üretilere göre düşük çıkmıştır bu durum ideal gradasyonda İK gradasyonuna yaklaşmanın daha uygun olacağını göstermektedir.

İİ ve İN gradasyonlarının tabaka katsayılarının düşük olması da bu durumu desteklemektedir. Bu gradasyonların 2 mm üstü yüzdeleri İK gradasyonuna yakındır. Bu durumda sonucu etkileyen alt eleklerdeki malzemeler olmuştur.

KN gradasyonu KİS gradasyonuna benzemekle birlikte 2-9,5 mm elek aralığında yüzdece daha fazla (kaba) malzemeye sahiptir. KN gradasyonlu üretimde İK gradasyonlu üretime daha yakın tabaka katsayısı bulunmasının nedeninin 2-9,5 mm elek aralığındaki malzeme yüzdesinin fazla olmasına bağlı olduğu düşünülmektedir.

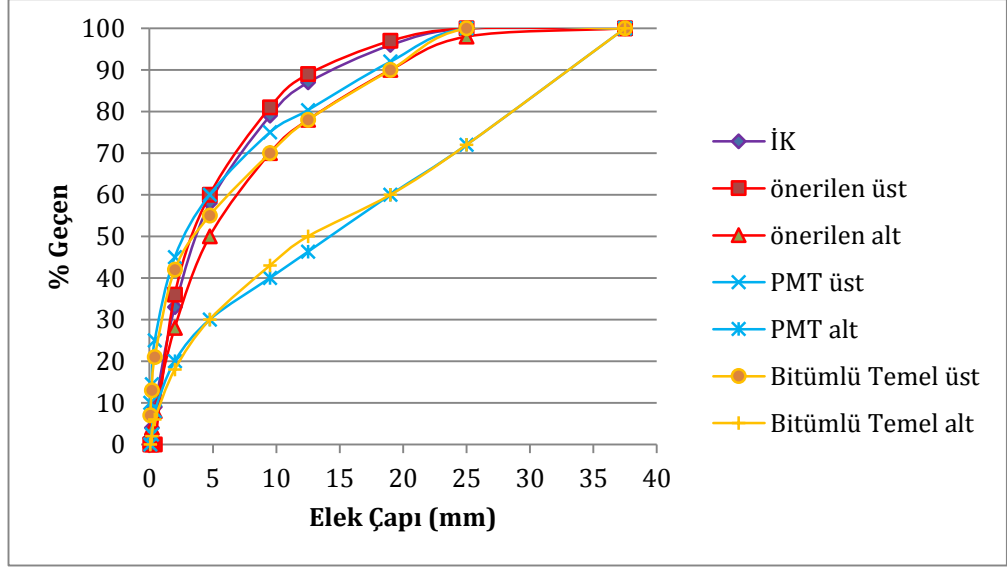
W kodlu üretimde İK kodlu üretime göre tabaka katsayısının benzer çıkması alt eleklerde malzemenin bir miktar incelebileceğinin göstergesidir.

Bir gradasyon aralığı belirlemek için mümkün mertebe İK gradasyonuna yakın kalmak, hem yapısal performans açısından hem de muhtemel arazi koşullarında ikameyi azaltması ve işi hızlandırması anlamında uygun olacaktır. Ancak yolda her kazınan malzeme İK gradasyonuna çok yakın çıkamayacağı nedeniyle aralık önerisi olarak 2 mm altı malzeme W ve KN gradasyonlarını da referans alarak bir miktar incebilir. 2 mm üstü malzeme ise KN gradasyonun baz alarak bir miktar kabalaşabilir. KİS gradasyonu da İİ gradasyonuna göre daha iyi sonuç vermesi No.4 elek üstü malzemenin bir miktar kabalaşabileceğini destekler.

Şekil 4.17'de KBST için önerilen gradasyon, Anonim (2013)'de verilen PMT ve bitümlü temel gradasyonları ile kıyaslanmıştır.

Şekil 4.17 incelendiğinde önerilen aralık; İK gradasyonunu kapsayan PMT ve bitümlü temele kıyasla daha ince olan bir aralıktır ancak görüldüğü üzere önerilen alt sınır hem PMT hem de bitümlü temelin sınırları içerisinde kalmaktadır. Bu nedenle arazi şartlarında az bir ikame ile yolların geri dönüşümünün sağlanabileceği düşünülmektedir.

Ayrıca BSK bir üstyapıda 20-30 cm derinliğinde kazıma için, ince gradasyonlu aşınma ve binder tabakaları da karışıma gireceği için ideal gradasyonun PMT ve bitümlü temele göre ince olması yol durumunu daha iyi temsil edecektir.



Şekil 4.17. Önerilen gradasyonun İK gradasyonu, KTS PMT ve bitümlü temel gradasyonları ile kıyaslanması

Çizelge 4.1'den malzemenin kırılarak incelendiği görülüyor buna göre ilk yapım için gradasyonu bir miktar kabalaştırmak uygun olacaktır.

Çizelge 4.20'de 25-37,5 mm arasına %2 tolerans bırakılması her ne kadar yoldan kazınan malzemede 25 mm üzeri malzeme olmayacağı düşünülse de, kazıma derinliğine ve kaplama türüne göre 25 mm üzeri malzeme gelme ihtimaline karşıdır. Nitekim, çalışmada 25 mm elekten geçen malzemeyi %100 kabul etsek de, çalışmada kullanılan numune tamamen BSK olmasına ve kazıma sırasında PMT tabakasına girilmemesine rağmen Çizelge 4.2.'de verilen ortalama değerden de görüleceği gibi %0,4 malzeme 25 mm elekte kalmıştır. Yoldan gelebilecek 25 mm üzeri malzeme üretim esnasında ayrıştırılamayacağı için %2'lik bir oran bırakılması uygundur.

ARRA (2001), Thompson vd. (2009) ve Wirtgen (2012)'de önerildiği gibi ince malzeme yüzdesinin artması sadece nem hasarı açısından (İÇM) doğru görünmektedir. Esneklik modülü açısından düşünüldüğünde ise tam tersi bir durum söz konusudur.

İK, W ve KN gradasyonları (ideal gradasyon belirlenirken tabaka katsayılarının yüksek olması nedeniyle yararlanılan gradasyon tipleri), 50-70-100

penetrasyon serileri (160/220 sınıfı bitümlü karışım daha düşük tabaka katsayısına sahip bulunduğu için değerlendirilmemiştir) çimentolu (ideal filler tipi olarak bulunması nedeniyle) %1,9 ve 2,2 bitümlü (%2 bitüm yüzdesine yakın olan üretimler) üretimler yani tüm üretim değişkenlerinin ideal değerleri incelendiğinde, Papavasiliou ve Loizos (2013)'de önerilenle paralel olarak Dp değerinin 2,10-2,20 arasında olması uygun görülmektedir.

#### 4.7. KBST ve Yeniden Yapım Yöntemleri İçin Ekonomik Analiz

Ekonomik analiz olarak yeniden yapım ve köpük bitüm ile yerinde soğuk geri kazanım kıyaslanmıştır. Geri dönüşüm için PMT tabakasının sağlam olduğu sadece bitümlü katmanların geri kazanıldığı düşünülmüştür. Bu nedenle yeniden yapım yönteminde de PMT tabakasının yapımı analiz dışı tutulmuştur.

KBST için kazanacak mevcut yol kabulleri:

Sağlık ve Güngör (2008)'den yararlanılarak geri kazanım için, 15-20 milyon arası trafiğe sahip ve tabaka kalınlıkları Aşınma 5 cm, Binder 7 cm, Bitümlü temel 8 cm olmak üzere toplam 20 cm olan bir devlet yolu seçilmiştir.

Bitümlü temel tabaka katsayısı: 0,36

Binder tabaka katsayısı: 0,4

Aşınma tabaka katsayısı: 0,42 (Sağlık ve Güngör, 2008)

KBST tabaka katsayısı: 0,21 (Çizelge 4.18)

Köpük bitümle stabilize temel üzerine 5 cm aşınma ve 7 cm binder düşünülerek toplam toplam 32 cm kalınlık öngörülmüştür.

Bu yapı için;

$$SN = a_1 \cdot D_1 + a_2 \cdot D_2 + a_3 \cdot D_3 \quad (4.4)$$

Denklem (4.4) ile SN = 9,1 olarak hesaplanmıştır.

Burada;

a<sub>1</sub>, a<sub>2</sub> ve a<sub>3</sub> : sırasıyla aşınma, binder ve KBST'ye ait tabaka katsayıları

D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub> ve D<sub>3</sub> : sırasıyla aşınma, binder ve KBST'ye ait kalınlıklardır



Aynı devlet yolunun 35-45 milyon trafik değeri (Sağlık ve Güngör, 2008). için yeniden yapımda;

SN = 8,9 olarak hesaplanmıştır. KBST ile yaklaşık aynı yapısal dayanıma karşılık gelmektedir.

Yeniden yapım için; 5 cm aşınma, 8 cm binder ve 10 cm bitümlü temel olmak üzere toplam 23 cm kalınlık gerekmektedir. Bu durumda yeniden yapıma göre  $32-23 = 9$  cm kot yükselmesi olacaktır. (20 cm PMT tabakaları ortak olduğu için SN hesabında dikkate alınmamıştır.)

Kolaylık olması için yol genişliği iki yöntem için de aynı ve 10 m alınmıştır. Yol uzunluğu da aynıdır ve 1 km olarak alınmıştır. Kullanılan fiyatlar 2019 yılına aittir.

#### **4.7.1. Yeniden yapım maliyet hesabı**

- Poz No: KGM/6405

Poz Tanımı : 5 cm Sıkışmış kalınlıkta 1 m<sup>2</sup> asfalt betonu aşınma tabakası yapılması (kırılmış ve elenmiş ocak taşı ile) (Tip-1)

Birim : m<sup>2</sup>

Birim Fiyat : 10,19 TL

Miktarı: 1.000m\*10m = 10.000 m<sup>2</sup>

Fiyatı: 10.000\*10,19 = 101.900 TL

- Poz No: KGM/6308

Poz Tanımı : 8 cm Sıkışmış kalınlıkta 1 m<sup>2</sup> asfalt betonu binder tabakası yapılması (kırılmış ve elenmiş ocak taşı ile)

Birim : m<sup>2</sup>

Birim Fiyat : 15,79 TL

Miktarı: 1.000m\*10m = 10.000m<sup>2</sup>

Fiyatı: 10.000\*15,79 = 157.900 TL

- Poz No : KGM/6208

Poz Tanımı : Bitümlü sıcak temel yapılması (kırılmış ve elenmiş ocak taşı ile)  
(Tip-A)

Birim : ton

Birim Fiyat : 82,03 TL

Bitümlü Temel (10cm için) : 1.000 m x 0,1 m x 10,00 m = 1.000 m<sup>3</sup>

1 m<sup>3</sup> bitümlü temel 2,3 ton ağırlığındadır.  $0,1*10*1.000*2,3 = 2.300$  ton

$2.300*82,03 = \underline{188.669}$  TL

Nakliye masrafları Denklem (4.5) ve Denklem (4.6)'e göre hesaplanır ve taşımalarda 150 metreye kadar ücret alınmamaktadır.

150 m. - 10000 m. arası mesafeler için;

$$F=A*1,25*0,00017*K*\sqrt{M}-0,00260*K \quad \text{TL/ton} \quad (4.5)$$

10.000 m ve üstü mesafeler için;

$$F=A*1,25*K*(0,0007*M+0,01)-0,00260*K \quad \text{TL/ton} \quad (4.6)$$

Burada;

F : ton bazında birim maliyet

M : taşıma mesafesi

K : taşıma katsayısı

A : sabit olarak 1 alınır

Uygulamadaki taşıma mesafeleri bilinmediği için Türkiye'de yaklaşık olarak ortalama taşıma mesafelerine göre bir örnek nakliye maliyeti hesabı yapılmıştır.

Bitümlü temel:  $2,3*1.000 = 2.300$  ton

Binder (birim ağırlığı 2,4 ton):  $2,4*0,08*10*1000 = 1.920$  ton

Aşınma (birim ağırlığı 2,4 ton):  $2,4*0,05*10*1000 = 1.200$  ton

Toplam  $2.300+1.920+1.200 = 5.420$  ton malzeme taşınacaktır.

Ocaktan konkasöre malzeme taşıma (mesafe 1.000 m alınmıştır):

K= 330 TL (02.017 pozu), A = 1,00

$$F= 1,00 \times 1,25 \times 0,00017 \times 330 \times \sqrt{1.000} - 0,00260 \times 330 = 1,36 \text{ TL/ton}$$
$$5.420 \text{ ton} \times 1,36 \text{ TL/ton} = \underline{7.371,2 \text{ TL}}$$

Plentten sahaya malzeme taşıma (mesafe 5.000 m alınmıştır):

$$F= 1,00 \times 1,25 \times 0,00017 \times 330 \times \sqrt{5.000} - 0,00260 \times 330 = 4,1 \text{ TL/ton}$$
$$5.420 \text{ ton} \times 4,1 \text{ TL/ton} = \underline{22.222 \text{ TL}}$$

Mevcut üstyapının kazınması ve depoya nakli (5cm aşınma+7cm binder+8cm bitümlü temel, toplam 20cm) (Konkasör ve Plentin aynı alan içinde olduğu varsayılp aralarındaki nakliye masrafı ihmal edilmiştir)

- Poz No : KGM/40.130

Poz Tanımı : Asfalt kazıma makinesi ile her cins bitümlü karışım kaplamaların kazılması

Birim : m<sup>3</sup>

Birim Fiyat : 98,99 TL

$$1.000 \text{ m} \times 10,00 \text{ m} \times 0,20 \text{ m} = 2.000 \text{ m}^3$$

$$2.000 \times 98,99 = \underline{197.980 \text{ TL}}$$

- Poz No : 07.005/K (Kz)

Poz Tanımı : Kazı nakli (5km)

Birim : m<sup>3</sup>

Birim Fiyat : 8,51 TL

$$2.000 \times 8,51 = \underline{17.020 \text{ TL}}$$

Toplam:

$$101.900+157.900+188.669+7.371,2+22.222+197.980+17.020 = \underline{693.062,2 \text{ TL}}$$

#### **4.7.2. Köpük bitümle yerinde soğuk geri kazanım maliyet hesabı**

Uygulama için; geri kazanılacak tabaka 20 cm derinliğinde, çalışmada önerildiği gibi 2,2 ton yoğunluğunda, %2 köpük bitüm kullanılarak, optimum su

miktarının %5,5 olacağı ve köpürtme için %3 su kullanılacağı düşünülmüştür.  
Toplam;  $0,20 \cdot 1.000 \cdot 10 \cdot 2,2 = 4.400$  ton malzeme geri kazanılacaktır.

Arazi uygulamaları WR 250 Kazıma-Karıştırma makinasıyla yapılacaktır. Cihazın günlük üretim miktarı ortalama  $1.000 \text{ m}^2/\text{saat}$ , kazıma derinliği 15-20 cm ve ortalama yakıt tüketimi saatte 70 lt'dir. Cihazın günlük kira bedeli 600 Euro'dur (Cihazla ilgili veriler Wirtgen firmasından alınmıştır).

Saatte  $1.000 \text{ m}^2$  ilerlediği ve genişliğin 10 m kabul edilmesi nedeniyle cihaz saatte 100 m ilerleyecektir ve 10 saatlik bir çalışmayla tüm malzeme kazınmış olacaktır. Tahmini olarak 1 günde (10 saat) işlem tamamlanmış olacaktır.

Malzeme ihtiyacı (kazınan malzemede %1 rutubet olduğu farz edilerek):

Hesaplarda kullanılacak malzeme miktarı =  $4.400 \cdot (1+0,01) = 4.444$  ton

Çimento miktarı:  $Mç = 4.444/100 = 44,44$  ton

Bitüm miktarı:  $Mb = 2 \cdot (4.444+44,44)/100 = 89,77$  ton

Köpürtme amaçlı su miktarı =  $89,77 \cdot 3/100 = 2,693$  ton bulunur.

Karışım suyu;

Su farkı = Modifiye proktor- su muhtevası =  $5,5-1 = 4,5$

$M_{\text{karışım suyu}} = 4,5 \cdot (4.444+44,44)/100 = 201,98$  ton

Toplam su miktarı:  $M_{\text{su}} = 201,98+2,693 = 204,673$  ton bulunur.

Bitüm (50/70 Tüpraş Kırıkkale) ton fiyatı: 1.694,78 TL/ton (KDV dahil)

$89,77 \cdot 1.694,78 = \underline{152.140,4 \text{ TL}}$

Çimento (10.130.1202 poz) : 221,00 TL/ton+KDV = 260,78 TL/ton

$44,44 \cdot 260,78 = \underline{11.589,06 \text{ TL}}$

Su ton fiyatı (İşyerleri için Ankara): 13,72 Tl (KDV dahil)

$204,673 \cdot 13,72 = \underline{2.808,11 \text{ TL}}$

Motorin : 6,57 TL/lt (KDV dahil)

$10*70*6,57 = \underline{4.599 \text{ TL}}$

- Poz No : 03.545

Poz Tanımı : Lastik tekerlekli silindirin 1 saatlik ücreti (40 HP çekici + 7-8 tonluk - 8 ton dahil, çekicisi ile)

Birim : saat

Birim Fiyat : 75,24 TL

$10 \text{ Sa} \times 75,24 \text{ TL/Sa} = \underline{752,4 \text{ TL}}$

- Poz No : 03.541

Poz Tanımı : Titreşimli silindir'in 1 saatlik ücreti (4-5 ton- 5 ton dahil-statik ağırlık ve 8-9 ton dinamik kuvvette titreşimli silindir+lastik tekerlekli traktör,takriben 35-58 HP)

Birim : saat

Birim Fiyat : 106,29 TL

$10 \text{ Sa} \times 106,29 \text{ TL/Sa} = \underline{1.062,9 \text{ TL}}$

- Poz No : 03.544/1

Poz Tanımı : Demir merdaneli silindirin 1 saatlik ücreti (60 HP çekici + 10-14 tonluk - 14 ton dahil, 2-3 tekerlekli)

Birim : saat

Birim Fiyat : 90,72 TL

$10 \text{ Sa} \times 90,72 \text{ TL/Sa} = \underline{907,2 \text{ TL}}$

- Poz No : KGM/15.053

Poz Tanımı : 1 çift tamburlu keçiyağı silindir ile sıkıştırma yapılması

Birim : saat

Birim Fiyat : 93,63 TL

$10 \text{ Sa} \times 93,63 \text{ TL/Sa} = \underline{936,3 \text{ TL}}$

- Poz No : 03.508

Poz Tanımı : Motor Greyderin 1 Saatlik Ücreti

Birim : saat

Birim Fiyat : 127,15 TL

10 Sa x 127,15 TL/ton= 1.271,5 TL

- Poz No : KGM/4355

Poz Tanımı : Yarı katı bitümlü malzemenin sarnıç veya tanklarda erimiş derecesine kadar ısıtılması (makine ile) 2 adet

Birim : ton

Birim Fiyat : 34,26 TL

2\*89,77\*34,26 = 6.151,04 TL

- Poz No : KGM/1911/1

Poz Tanımı : Su tankının 1 günlük ücreti

Birim : gün

Birim Fiyat : 13,68 TL

- Poz No : KGM/4466

Poz Tanımı : Büyük plent ünitesi ile hazırlanmış olan çimento karışımının büyük finişerle serilmesi ve silindirlerle sıkıştırılması

Birim : ton

Birim Fiyat : 20,75 TL

44,44\*20,75 = 922,13 TL

WR 250 kira bedeli (1 gün) = 600\*6,38 = 3.828 TL

1 Euro = 6,38 TL

- Poz No: KGM/6405

Poz Tanımı : 5 CM cm Sıkışmış kalınlıkta 1 m<sup>2</sup> asfalt betonu aşınma tabakası yapılması (kırılmış ve elenmiş ocak taşı ile) (Tip-1)

Birim : m<sup>2</sup>

Birim Fiyat : 10,19 TL

Miktarı: 1.000 m\*10 m = 10.000 m<sup>2</sup>

Fiyatı: 10.000\*10,19 = 101.900 TL

- Poz No: KGM/6307

Poz Tanımı : 7 CM cm Sıkışmış kalınlıkta 1 m<sup>2</sup> asfalt betonu binder tabakası yapılması (kırılmış ve elenmiş ocak taşı ile)

Birim : m<sup>2</sup>

Birim Fiyat : 13,87 TL

Miktarı: 1.000m\*10m = 10.000 m<sup>2</sup>

Fiyatı: 10.000\*13,87 = 138.700 TL

Ocaktan konkasöre malzeme taşıma (mesafe 1.000 m alınmıştır):

Binder (birim ağırlığı 2,4 ton): 2,4\*0,07\*10\*1.000 = 1.680 ton

Aşınma (birim ağırlığı 2,4 ton): 2,4\*0,05\*10\*1.000 = 1.200 ton

Toplam : 1.200+1.680 = 2.880 ton malzeme taşınacaktır.

K= 330 Tl (02.017 poz), A = 1,00

F= 1,00 x 1,25 x 0,00017 x 330 x  $\sqrt{1.000}$  - 0,00260 x 330 = 1,36 TL/ton

2.880 ton x 1,36 TL/ton = 3.916,8 TL

Plentten sahaya malzeme taşıma (mesafe 5.000 m alınmıştır):

F= 1,00 x 1,25 x 0,00017 x 330 x  $\sqrt{5.000}$  - 0,00260 x 330 = 4,1 TL/ton

2.880 ton x 4,1 TL/ton = 11.808 TL

Toplam:

152.140,4+11.589,06+2.808,11+4.599+752,4+1.062,9+907,2+936,3+1.271,5+6.

151,04+13,68+922,13+3828+101.900+138.700+3.916,8+11.808= 443.306,5 TL

Yeniden yapım yerine KBST uygulaması yapılması halinde;

693.062,2 TL - 443.306,5 TL = 249.755,7 TL kazanç sağlanacaktır.

Sonuç olarak;

$249.755,7 / 693.062,2 = \%36,03$  kar edilmiş olacaktır.

Yapılan ekonomik analizin sonucu, ekonomik ve çevresel kazançlar bölümünde paylaşılan verilerle paralel bulunmuştur.

Çizelge 4.22'de ekonomik analize ilişkin değerlendirilmenin özeti görülmektedir.

Çizelge 4.22. Yeniden yapım ve KBST yöntemleri için yapılan ekonomik analize ilişkin özet çizelge

<b>Yeniden Yapım</b>	
İş Kalemi	TL Değeri
Aşınma	101,9
Binder	157,9
Bitümlü Temel	188,669
Nakliye	29.593,20
Kazıma	197,98
Kazı Nakli	17,02
<b>Toplam</b>	<b>693.062,20</b>

<b>KBST Uygulaması</b>	
İş Kalemi	TL Değeri
Malzeme	171.136,57
İş Makinesi	15.845,15
Aşınma	101,9
Binder	138,7
Nakliye	15.724,80
<b>Toplam</b>	<b>443.306,52</b>



## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Ülkemizde köpük bitümle geri dönüşüm konusundaki eksikliği kapatma ve bu konudaki yeni çalışmalara ışık tutma amacıyla yapılan tez çalışmasında hedeflenenler, varılan sonuçlar ve öneriler şu şekilde sıralanabilir:

Köpük bitümle stabilize malzeme üretimi için öncelikle Ankara-Polatlı yolundan temin edilen malzeme, ikame amaçlı kullanılacak yeni agrega ve çalışmada kullanılması planlanan farklı penetrasyon dereceli bitümlerin uygunluğunun tespiti için ön fiziksel deneyler yapılmış araştırma bulguları ve tartışma kısmında sunulan sonuçlarla malzemelerin deneysel çalışmalar için uygunluğu ortaya koyulmuştur.

Yoldan gelebilecek malzemelerin fiziksel olarak KTŞ (Karayolu Teknik Şartnamesi) PMT (Plent Mix Temel) sınır değerlerini sağlaması uygun olacaktır. BSK geri dönüşümü sırasında elde edilecek malzeme büyük oranda sıcak karışım malzemesi olduğu için fiziksel sonuçlar, çalışmada da görüldüğü üzere PMT'ye göre oldukça iyi çıkacaktır ancak sathi kaplamalı yolların geri kazanımı ve BSK (Bitümlü Sıcak Karışım)'lı yollarda kazıma sırasında PMT tabakasına da girilebileceği düşünüldüğünde PMT sınır değerleri daha uygun görülmektedir.

Öncelikle, üretimlerde kullanılmak üzere bitümlerin ideal köpürme karakteristikleri belirlenmiştir. Hangi bitümün hangi sıcaklık ve su yüzdesinde daha iyi köpüreceği buna bağlı olarak; malzemenin homojen karışması, sıkıştırılması ve dayanım özelliklerinin geliştirilmesini sağlayacak uygun genişleme oranı ve yarılanma süresi değerleri tespit edilmiştir. Bitümün köpürtülmesi safhasında literatürle paralel olarak; bitüm penetrasyon değeri, sıcaklık ve su yüzdesi artışının genişleme oranını artırdığı ve yarılanma süresini azalttığı görülmüştür.

Kaynak özetlerinde bahsedildiği üzere yarılanma süresi ve genişleme oranı değerlerine ilişkin çeşitli görüşler bulunmakla birlikte çalışmada, tüm bitüm

sınıfları düşünülduğünde minimum yarılanma süresi 9 sn ve minimum genişleme oranı olarak 20 değeri önerilmektedir.

İkinci aşamada geri dönüşüm yapılacak mevcut yol şartlarında karşılaşılabilecek farklı gradasyon tipleri için, literatürde sık karşılaşılan aktif filler tipleri (çimento, uçucu kül, kireç ve fillersiz üretimler) için ve farklı bitüm yüzdeleri için üretimler yapılarak (1,9-2,2-2,5-2,8-3,1 yüzdelerinde)  $\dot{I}CM_{kuru}$  (kuru dolaylı çekme mukavemeti) ve  $\dot{I}CM_{yaş}$  (yaş dolaylı çekme mukavemeti) değerleri tespit edilmiştir. Bunun amacı ise ideal filler tipi ve üretim serilerine ait optimum bitüm yüzdesi değerlerini belirlemektir.

Bitüm sınıfı ve gradasyona göre değişebilecek bitüm yüzdesi için net bir öneride bulunmak çok uygun olmamakla birlikte genel olarak çalışmada optimum bitüm değerleri düşük seviyelerde çıktığı için uygulamada %1,8-%2 ve %2,2 bitüm yüzdeleri için  $\dot{I}CM$  kontrolü yapmanın yeterli olacağı düşünülmektedir.

Aktif filler tipi olarak; çimento, uçucu kül ve kirece göre oldukça yüksek sonuçlar vermiştir ve uygulamada çimentonun kullanılması uygun görülmektedir. Çalışmada uçucu kül ve kirecin aynı anda kullanıldığı tek bir üretim yapılmıştır ve sonucu çimentoya yakın bulunduğu için bu tür denemelerin genişletilmesi yeni çalışmalar için önerilmektedir. Aktif fillersiz özellikle  $\dot{I}CM_{yaş}$  sonuçlarının oldukça düşük çıkması aktif filler kullanılmadığında nem hasarıyla karşılaşılabileceğini göstermektedir. Bu nedenle KBSM (Köpük Bitümle Stabilize Malzeme) için aktif fillersiz üretim önerilmemektedir.

Deneysel sonuçlarına dayanarak  $\dot{I}CM_{kuru}$  değeri için 225 kPa,  $\dot{I}CM_{yaş}$  değeri için 150 kPa ve TSR (Korunmuş  $\dot{I}CM$  Oranı) değeri için %70 sınır değerleri uygun görülmektedir.

Farklı koşullarda bekletilmiş aynı üretim numuneleri için değerlendirilen  $\dot{I}CM$  değerlerine göre; ideal hava koşullarında (25°C civarı, yağmursuz, rüzgarsız ve çok fazla güneş ışığına maruz kalmayan) numune bekletilmesi  $\dot{I}CM$  değerini

oldukça artırmakta ancak bu durum arazi şartlarında çok mümkün olmayacağı için kür amacıyla KBST (Köpük Bitümle Stabilize Temel) tabakası serildikten sonra üzerinin kaplanması için yağmursuz ortamda 2-3 gün beklemesi yeterli görülmektedir.

Bir sonraki aşamada, her üretim serisi için belirlenen optimum bitüm yüzdeli üretimler tekrarlanarak esneklik modülü ve tabaka katsayısı değerleri araştırılmıştır. Literatürde de önerisi yaygın olmadığı için sadece iki üretimde deneme amaçlı 25°C ve 60°C'de Marshall stabilite değerleri belirlenmiştir. 25°C'deki sonuçlar beklenmeyen düzeyde yüksek, 60°C'deki sonuçlar ise düşük çıktığı için, bu yöntem değerlendirme kriteri olarak önerilmemektedir.

Esneklik modülü tespiti için çalışmada dinamik üç eksenli esneklik modülü deneyi uygulansa da Bölüm 3.7.3'te yapılan hesaplamalarda KBST tabakasının yerleşeceği derinlik için çevresel gerilmenin olmayacağı ya da önemsiz düzeyde olacağı bulunmuş olup tek eksenli esneklik modülü deneyinin de kullanılması uygundur. Hesaplanan toplam gerilme için, her üretimin deneysel olarak elde edilen esneklik modülü sonuçlarına göre çıkarılan  $k-\theta$  modelinden esneklik modülü değerleri hesaplanmıştır. Model genel olarak zemin ve granüler tabakalarda uygulanmaktadır. KBST'nin malzeme yapısı (Şekil 5.1'den görüleceği üzere iri parçacıklar bitümle tam olarak sarılamamaktadır) ve deneysel sonuçları da bitümlü karışımlardan ziyade stabilize granüler bir katman izlenimi doğurmaktadır.



Şekil 5.1. Köpük bitümle stabilize malzeme

Bu durum Wirtgen (2012) tarafından KBSM davranışının; nem hassasiyeti düşük, kohezyonu yüksek bir bağlanmamış granüler malzemeye benzediği şeklinde yorumlanmıştır. Bu nedenlerden dolayı; basit ancak kullanışlı olan  $k-\theta$  modelinin kullanılması uygun görülmüştür.

Esneklik modülü sonuçlarında gradasyonun etkili olduğu sonucuna varılmıştır. Malzemenin No.4 elek üstü kısmının incelenmesi ve No.4 elek altı kısmının kabalaşması esneklik modülü sonuçlarına olumlu yansımıştır. Özellikle No.4 elek altında kalan malzemenin incelenmesi sonuçları olumsuz etkilemiştir.

160/220 bitüm sınıfı ile yapılan denemelerde esneklik modülü ve yarılanma süresi değerlerinin diğer bitüm sınıflarına göre düşük kalması nedeniyle 50/70, 70/100 ve 100/150 bitüm sınıfları KBSM üretimi için daha uygun bulunmuşlardır.

Kuru Esneklik modülü değerlerine göre üretimlere ait izafi mukavemet (tabaka) katsayısı değerleri de hesaplanmış olup sonuçlar 0,10-0,24 aralığında değişmiştir. Deneysel çalışmalar ışığında, KBST için en az 400 MPa esneklik modülü ve 0,21 tabaka katsayısı değerleri önerilmektedir.

Çalışmada bulunan tabaka katsayısı değerlerinin PMT için kullanılan 0,15 tabaka katsayısı (Sağlık ve Güngör, 2008) değerine yakın çıkması malzemenin tam olarak bitümlü bir malzeme davranışı sergileyemediğinin göstergesidir.

Wirtgen (2012) tarafından  $İÇM_{kuru}$  değerinin 500 kPa'yı aşmasının asfaltik davranış göstergesi olduğu belirtilmiştir. Çalışmada hiçbir üretime ait  $İÇM_{kuru}$  değerinin bu seviyeye ulaşamaması malzemenin sıcak karışım özelliklerini tam olarak yansıtamadığının göstergesidir.

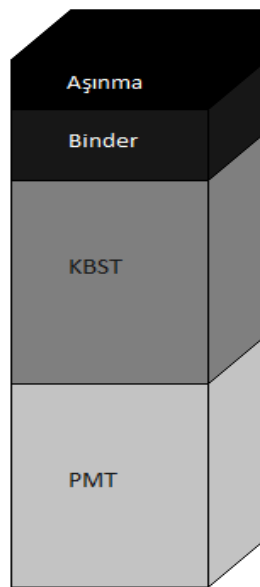
Esneklik modülü ve buna bağlı olarak da tabaka katsayısını önerilen sınır değerlerin üzerinde tutabilmek amacıyla deneysel veriler ışığında, KBST için Çizelge 4.20'de verilen değerler ideal gradasyon olarak düşünülmüştür.

Hacim özgül ağırlık için; Çizelge 4.12'deki üretimlere ait önerilen bitüm sınıfları, ideal filler tipi ve ideal gradasyona göre KBST için  $D_p$  değerinin 2,10-2,20 arasında olması uygun görülmektedir.

Son olarak yeniden yapım ve KBST arasında belli bir yol kesimi için ekonomik kıyaslama yapılmıştır. Analizde KBST tabaka katsayısı çalışmada önerildiği gibi 0,21 olarak kabul edilmiştir. İki yöntem için de öngörülen tabaka kalınlıklarına göre SN (Üstyapı Sayısı) değerleri hesaplanmış ve iki yöntem ekonomik açıdan 2019 yılı fiyatlarına göre değerlendirilmiştir. KBST ile yapımın yeniden yapıma kıyasla %36,03 daha ekonomik olabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Kaynak özetlerinde de vurgulandığı üzere KBST katmanının üzeri trafik yüküne bağlı olarak en azından aşınma tabakasıyla kaplanmalıdır.

Ekonomik analiz ve deneysel sonuçlara göre Şekil 5.2'deki üstyapı kesiti, uygulamada karşılaşılabilecek trafik yüküne göre tabaka kalınlıkları değişken olarak uygulanabilir görülmektedir. Ancak öncelikle deneme kesimi yapılarak periyodik olarak gerekli testlerin yapılması önerilir. Böylece içerisinde hidrolik bağlayıcı bulunan KBST tabakasının büzülme çatlak riski de kontrol edilmiş olacaktır.



Şekil 5.2. Köpük bitümle yerinde geri dönüşüm için önerilen üstyapı kesiti

Tez çalışmasında yapılan tüm öneriler için, sadece teknik ve ekonomik açıdan değil; bitümün gereksiz yere fazla ısıtılmasının sera gazı artışına etkisi, ikame agrega artışının doğa tahribatına etkisi, kazınan malzemenin tamamının kullanılmamasının depo alanlarına etkisi vb. gibi çevresel kazanım ya da kayıplar da etkili olmuştur.

Tez çalışması ile KBST'nin üstyapılar da kullanımının teknik, ekonomik ve çevresel açıdan faydaları ortaya koyulmuştur. Yapılan tüm deneysel çalışmalar ve literatür bilgisi KBST'nin sürdürülebilir ulaştırmaya katkı sağlayacak etkili bir yöntem olacağını göstermektedir.

Tez çalışmasında izafi mukavemet katsayısı 0,21 olarak belirlenmiş olan KBST tabakasının, yapımdan sonra trafik altında belli periyotlarla en az 1 yıl takip edilmesi gerekmektedir. Bu bağlamda Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından bir deneme yolu yapılması planlanmaktadır. Bu sayede uzun vadeli küre bağlı olarak esneklik modülü ve izafi mukavemet katsayısındaki değişim gözlemlenebilecektir. Ayrıca yapılacak deneme yolu için KBST tabakasında meydana gelebilecek çatlakların yüzeye yansıma durumu da takip edilebilecektir. Yansıma çatlaklarıyla karşılaşılması durumunda ise geotekstil kullanımı düşünülmeli önerilmektedir. İlave olarak, sonraki araştırmalarda, üretimde kullanılabilcek suyun farklı sıcaklıklarda karışıma ilave edilmesi ve KBST tabakasının kalıcı deformasyon dayanımının araştırılması önerilmektedir. Ayrıca uçucu kül geç dayanım kazanan bir ürün olduğu için uçucu küle yapılabilecek karışımlarda uzun vadeli dayanımına bakılması araştırılmalıdır. Bitümün köpürtülmesi safhasında ölçüm çubuğunun yanı sıra kullanılabilcek bir sensör sistemi de maksimum köpürme ve yarılanma süresi değerlerinin daha doğru elde edilebilmesine yardımcı olacaktır.

## KAYNAKLAR

- Abreu, L.P.F., Oliveira, J.R.M., Silva, H.M.R.D., Palha, D., Fonseca, P.V., 2017. Suitability of Different Foamed Bitumens for Warm Mix Asphalts with Increasing Recycling Rates. *Construction and Building Materials*, 142, 342–353.
- 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.
- Alberta, 2019. Cold In-Place Recycling. Erişim Tarihi: 28.09.2018. [https://www.transportation.alberta.ca/images/3\\_56\\_\(CIPR\)\\_May\\_25-10.pdf](https://www.transportation.alberta.ca/images/3_56_(CIPR)_May_25-10.pdf)
- Almeida, M.D., Gomes, J.C., Sangiorgi, C., Zoorob, S.E., Afonso, M.L., 2016. Performance of Warm Mix Recycled Asphalt containing up to 100% RAP. *Construction and Building Materials*, 112, 1–6.
- Anonim, 1983. 2872 Sayılı Çevre Kanunu, Çevre ve Orman Bakanlığı, Ankara.
- Anonim, 2013. Karayolu Teknik şartnamesi, Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Arapoğlu, A.S., 2014. Bozulmuş Asfalt Kaplamaların Geri Dönüşümü ve Maliyet Analizi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek lisans tezi, 131s, Trabzon.
- Arguelles, G.M., Giustozzi, F., Crispino, M., Flintsch, G.W., 2015. Laboratory Investigation on Mechanical Performance of Cold Foamed Bitumen Mixes: Bitumen Source, Foaming Additive, Fiber-Reinforcement and Cement Effect. *Construction and Building Materials*, 93, 241-248.
- ARRA, 2001. Asphalt Recycling and Reclaiming Association Basic Manual. 269s, USA.
- Asphalt Academy, 2009. Technical Guideline: Bitumen Stabilised Materials, TG2 Second edition, ISBN 978-0-7988-5582-2
- AASHTO, 1986. Guide For Design Of Pavement Structures. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington DC.
- AASHTO, 1993. Guide For Design Of Pavement Structures. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington DC.
- AASHTO T 307-99, 2012. Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington DC.

- ASTM C131, 2006. Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C136, 2014. Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. ASTM International. West Conshohocken, PA.
- ASTM D6931, 2017 Standard Test Method for Indirect Tensile (IDT) Strength of Asphalt Mixtures, ASTM International. West Conshohocken, PA.
- ASTM D5/D5M-19a, 2019. Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D36/D36M-14e1, 2014. Standard Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus), ASTM International. West Conshohocken, PA.
- Austroroads, 2011. Review of Foamed Bitumen Stabilisation Mix Design Methods, Rapor No: AP-T178/11, 37s.
- 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
- Bocci, M., Grilli, A., Cardone, F., Graziani, A., 2011. A Study on the Mechanical Behaviour of Cement–Bitumen Treated Materials. *Construction and Building Materials*, 25(2), 773–778.
- Bocci, M., Grilli, A., Cardone, F., & Ferrotti, G., 2014. Full-Depth Reclamation for the Rehabilitation of Local Roads: A Case Study. *International Journal of Pavement Engineering*, 15(3), 191–201.
- Brown, S.F., Needham, D., 2000. A Study of Cement Modified Bitumen Emulsion Mixtures, *Asphalt Paving Technologists Proc*, 69, 92–121.
- Buchanan, S., 2007. Resilient Modulus: What, Why and How?. Erişim Tarihi: 17.07.2017. <https://www.vulcaninnovations.com/public/pdf/2-Resilient-Modulus-Buchanan.pdf>
- Buczyński, P., Iwański, M., 2017. Inactive Mineral Filler as a Stiffness Modulus Regulator in Foamed Bitumen-Modified Recycled Base Layers. *Materials Science and Engineering*, 245, 032042
- Caltrans, 2018. Full Depth Reclamation Using Foamed Asphalt. Erişim Tarihi: 13.07.2018. <https://dot.ca.gov/-/media/dot-media/programs/maintenance/documents/fdr-fa-design-guide-06-05-12-a11y.pdf>
- 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



- Ceylan, H., 2009. Asfalt Endüstrisi Çevre Kanunu İlişkisi. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 25(1-2), 71 – 98.
- Chappat, M., Bilal, J., 2003. The Environmental Road of the Future. Erişim Tarihi: 23.07.2018.  
[https://www.colas.com/sites/default/files/publications/route-future-english\\_1.pdf](https://www.colas.com/sites/default/files/publications/route-future-english_1.pdf)
- Çetin, A., 2008. Bitümlü Sıcak Karışımların Deformasyon Direncinin Üç Eksenli Kayma Mukavemeti Deneyi ile İncelenmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 191s, İstanbul.
- De Bock, L.D., Gonçaves, A., 2005. Use of Recycled Materials-Recycled Asphalt Pavement. Rapor No: RILEM TC 198-URM, 51s.
- 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
- Dolzycki, B., Jaczewski, M., Szydłowski, C., 2017. The Long-Term Properties of Mineral Cement-Emulsion Mixtures, Construction and Building Materials 156, 799–808.
- 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.
- EAPA, 2016. Asphalt the 100% recyclable construction product. Erişim Tarihi: 11.08.2015. [https://eapa.org/wp-content/uploads/2018/07/EAPApaper\\_Aspphalt\\_the-100-\\_recyclable\\_construction-product.pdf](https://eapa.org/wp-content/uploads/2018/07/EAPApaper_Aspphalt_the-100-_recyclable_construction-product.pdf)
- El-Badawy, S.M., Kamel, M.A., 2011. Assesment and Improvement of the Accuracy of the Odemark Transformation Method. International Journal of Advanced Engineering Sciences and Technologies, 6(1), 105-110.
- Environmental Science, 2017. What is Sustainability and Why Is It Important?. Erişim Tarihi: 04.10.2017. <http://www.environmentalscience.org/sustainability>
- Fedrico, W., Nunez, W.P., Lopez, M.A.C., Kleinert, T.R., Ceratti, J.A.P, 2018. A Study on the Resilient Modulus of Cement-Treated Mixtures of RAP and Aggregates Using Indirect Tensile, Triaxial and Flexural Tests. Construction and Building Materials, 171, 161–169.
- Fu, P., Harvey, J.T., 2007. Temperature Sensitivity of Foamed Asphalt Mix Stiffness: Field and Lab Study. International Journal of Pavement Engineering, 8:2, 137-145.
- 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.

- 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
- Fu, P., Jones, D., Harvey, J.T., 2011. The Effects of Asphalt Binder and Granular Material Characteristics on Foamed Asphalt Mix Strength. *Construction and Building Materials*, 25, 1093-1101.
- Godenzoni, C., Graziani, A., Perraton, D., 2016. Complex Modulus Characterisation of Cold-Recycled Mixtures with Foamed Bitumen and Different Contents of Reclaimed Asphalt. *Road Materials and Pavement Design*, 18(1), 130–150.
- Godenzoni, C., Graziani, A., Bocci, E., Bocci, M., 2017. The Evolution of the Mechanical Behaviour of Cold Recycled Mixtures Stabilised with Cement and Bitumen: Field and Laboratory Study. *Road Materials and Pavement Design*, 19(4), 856-877.
- Gong, H., Huang, B., Shu, X., 2018. Field Performance Evaluation of Asphalt Mixtures Containing High Percentage of RAP Using LTPP Data. *Construction and Building Materials*, 176, 118–128.
- 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.
- 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.
- Grilli, A., Graziani, A., Bocci, M., 2012. Compactability and Thermal Sensitivity of Cement Bitumen Treated Materials, *Road Materials and Pavement Design*, 13(4), 599–617.
- Grilli, A., Graziani, A., Bocci, E., Bocci, M., 2016. Volumetric Properties and Influence of Water Content on the Compactability of Cold Recycled Mixtures. *Materials and Structures*, 49(10), 4349–4362.
- Guatimosim, F.V., Vasconcelos, K.L., Bernucci, L.L.B., Jenkins, K.J., 2018. Laboratory and Field Evaluation of Cold Recycling Mixture with Foamed Asphalt. *Road Materials and Pavement Design*, 19:2, 385-399.
- Güngör, A.G., Sağlık, A., 2017. Mekanistik Ampirik Üstyapı Tasarımında Esneklik Modülünün Şartnamelere Uyarlanması. Erişim Tarihi: 13.12.2017. [https://www.kgm.gov.tr/SiteCollectionDocuments/KGMdocuments/Baskanliklar/BaskanliklarTeknikArastirma/Yeni%20Klas%C3%B6r/Yay%C4%B1mlar/KGM-Esneklik%20Mod%C3%BCI%C3%BC-asfalt\\_semp\\_09.pdf](https://www.kgm.gov.tr/SiteCollectionDocuments/KGMdocuments/Baskanliklar/BaskanliklarTeknikArastirma/Yeni%20Klas%C3%B6r/Yay%C4%B1mlar/KGM-Esneklik%20Mod%C3%BCI%C3%BC-asfalt_semp_09.pdf)

- Hailesilassie, B.W., Hugener, M., Partl, M.N., 2015. Influence of Foaming Water Content on Foam Asphalt Mixtures. *Construction and Building Materials*, 85, 65–77.
- Hanks, A. J. , Magni, E. R., 1989. The Use of Recovered Bituminous and Concrete Materials in Granular Base and Earth, Repor no: MI-137
- Hasan, M.R.M., You, Z., Yang, X., 2017a. A Comprehensive Review of Theory, Development, and Implementation of Warm Mix Asphalt Using Foaming Techniques. *Construction and Building Materials*, 152, 115–133.
- Hasan, M.M., Islam, M.R., Tarefder, R.A., 2018. Characterization of Subgrade Soil Mixed with Recycled Asphalt Pavement. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 5(3):207e214.
- Hashemian, L., Kavussi, A., Aboalmaali, H.H., 2014. Application of Foam Bitumen in Cold Recycling and Hydrated Lime in Airport Pavement Strengthening. *Case Studies in Construction Materials*, 1, 164–171.
- He, G.P., Wong, W.G., 2006. Decay Properties of the Foamed Bitumens. *Construction and Building Materials*, 20, 866–877
- 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
- Hicks, R.G., Monismith, C.L., 1971. Factors Influencing the Resilient Properties of Granular Materials. *Highway Research Record*, 345, 15-31.
- Huang, Y.H., 2003. *Pavement Analysis and Design 2nd Edition*, Pearson Prentice Hall, 775, United States of America
- 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.
- Iwanski, M., Kowalska, A.C., 2013. Laboratory Study on Mechanical Parameters of Foamed Bitumen Mixtures in the Cold Recycling Technology. *Procedia Engineering*, 57, 433 – 442.
- Iwanski, M., Kowalska, A.C., Maciejewski, K., 2015. Application of Synthetic Wax for Improvement of Foamed Bitumen Parameters. *Construction and Building Materials*, 83, 62–69.
- Jacobson, T., 2002. Cold Recycling Of Asphalt Pavement - Mix In Plant, Erişim Tarihi: 19.11.2018 <https://www.piarc.org/ressources/documents/actes-seminaires0102/c78-pologne02/9117,2.5-TC7-8-2002-Jacobson.pdf>
- 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,

- Jenkins, K.J., 2000. Mix Design Considerations for Cold and Half-cold Bituminous Mixes with Emphasis on Foamed Bitumen. Doktora Tezi. University of Stellenbosch, 368s, Güney Afrika.
- Jenkins, K.J., Long, F.M., and Ebels, L.J., 2007. Foamed Bitumen Mixes = Shear Performance?. International Journal of Pavement Engineering, 8 (2), 85–98.
- Jones, D., Fu, P., Harvey, J.T., Halles, F., 2008. Full Depth Pavement Reclamation with Foamed Asphalt. Rapor no: UCPRC-RR-2008-07, 271s.
- Jones, D., Fu, P., Harvey, J.T., 2009. Full Depth Pavement Reclamation with Foamed Asphalt in California: Guidelines for Project Selection, Design, and Construction. Rapor No: UCPRC-GL-2008-01, 98s.
- Jooste, F., Long, F., 2007. A Knowledge Based Structural Design Method for Pavements Incorporating Bituminous Stabilized Materials. Rapor No: CSIR/BE/IE/ER/2007/0004/B, 70s.
- Kahraman, S., Fener, M., 2007. Predicting The Los Angeles Abrasion Loss of Rock Aggregates From The Uniaxial Compressive Strength. Materials Letters, 61, 4861–4865.
- Kandhal, P.S., Foo, K.Y., 1997. Designing Recycled Hot Mix Asphalt Mixtures Using Superpave technology. Rapor No: 96-5, 18s.
- Kar, S.S., Swamy, A.K., Tiwari, D., Jain, P.K., 2018. Impact of Recycled Asphalt Pavement on Properties of Foamed Bituminous Mixtures. The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering, 13(1), 14–22.
- Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM), 2017. Stratejik Plan 2017-2021. Erişim Tarihi: 10.04.2019  
[https://www.kgm.gov.tr/SiteCollectionDocuments/KGMdocuments/Kurumsal/StratejikPlan/strateji\(2017-2021\).pdf](https://www.kgm.gov.tr/SiteCollectionDocuments/KGMdocuments/Kurumsal/StratejikPlan/strateji(2017-2021).pdf)
- Khosla, N.P., Nair, H., Beth, V., Glen, M., 2012. Effect of Reclaimed Asphalt and Virgin Binder on Rheological Properties of Binder Blends. International Journal of Pavement Research and Technology, 5(5), 317–25.
- 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.
- 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
- Kim, W., Labuz, J.F., 2007. Resilient Modulus And Strength Of Base Course With Recycled Bituminous Material. Rapor no: MN/RC-2007-05, 82s.

- Köfteci, S., 2017. Bitümlü Sıcak Karışımlardan Geri Dönüşüm Yolu İle Elde Edilen Agregaların Performanslarının Değerlendirilmesi: Deneysel Bir Çalışma. Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 6(2), 535-545.
- Kök B.V., Kuloğlu, N., 2007. AASHTO-86 Yöntemine Göre Üstyapı Tabakalarının Ekonomik Analizi. İMO Teknik Dergi, 4257-4270, Yazı 281.
- Kök, E., 2008. Karayolu ve Havaalanı Üstyapı Tasarım Yöntemleri, Karşılaştırması ve Türkiye Uygulamaları. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 202s, İstanbul.
- Leek, C., Jameson, G., 2011. Review of Foamed Bitumen Stabilisation Mix Design Methods. Rapor no: TT1358, 37s.
- Locander, R., 2009. Analysis of Using Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) as a Base Course Material. Rapor No: CDOT-2009-5, 61s.
- Maccarrone, S., Holleran, G., Ky, A., 1995. Cold Asphalt Systems as an Alternative to Hot Mix. 9th AAPA International Asphalt Conference, 13-17 November, Australia.
- Mallick, R.B., Hendrix, G., 2004. Use of Foamed Asphalt in Recycling Incinerator Ash for Construction of Stabilized Base Course. Resources, Conservation and Recycling, 42, 239-248.
- McDaniel, R., Anderson, R. M., 2001. Recommended Use of Reclaimed Asphalt Pavement in the Superpave Mix Design Method: Technician's Manual. National Cooperative Highway Research Program, NCHRP Report 452.
- Milton, L.J., Earland, M., 1999. Design Guide and Specification for Structural Maintenance of High Way Pavements by Cold in Situ Recycling. Transport Research Laboratory, Rapor No:386, 60s.
- Mohammadinia, A., Arulrajah, A., Horpibulsuk, S., Chinkulkijniwat, A., 2017. Effect of Fly Ash on Properties of Crushed Brick and Reclaimed Asphaltin Pavement Base/Subbase Applications. Journal of Hazardous Materials, 321, 547-556.
- Muthen, K.M., 1998. Foamed Asphalt Mixes Mix Design Procedure. Rapor No: CR-98/077, 31s.
- Newcomb, D. E., Arambula, E., Yin, F., Zhang, J., Bhasin, A., Li, W., Arega, Z., 2015. Properties of Foamed Asphalt for Warm Mix Asphalt Applications. National Cooperative Highway Research Program, NCHRP Report 807.
- Orhan, F., 2012. Bitümlü Karışımlar Laboratuvarı Çalışmaları, 39s.
- Öcal, A., 2014. Backcalculation of Pavement Layer Properties Using Artificial Neural Network Based Gravitational Search Algorithm. Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 181s, Ankara

- Papavasiliou, V., Loizos, A., 2013. Field Performance and Fatigue Characteristics of Recycled Pavement Materials Treated with Foamed Asphalt. *Construction and Building Materials*, 48, 677–684.
- Patel, A., Kulkarni, M.P., Rao, K.V.K., Singh, D.N., Gumaste, S.D., 2008. A Methodology for Determination of Resilient Modulus of Asphaltic Concrete. The 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG), 1-6 October, Goa, India.
- Pettinari, M., Simone, A., 2015. Effect of Crumb Rubber Gradation on a Rubberized Cold Recycled Mixture for Road Pavements. *Materials and Design*, 85, 598–606.
- Porosity and Indirect Tensile Strength. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (english edition)*, 4(2): 131 -144.
- Ramanujam, J., Jones, J., Janosevic, M., 2009. Design, Construction and Performance of Insitu Foamed Bitumen Stabilized Pavements. *Queensland Roads*.
- Roadex, 2019. Stresses and Strains in Road Structures. Erişim Tarihi: 11.03.2019. <https://www.roadex.org/e-learning/lessons/permanent-deformation/stresses-and-strains-in-road-structures/>
- 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.
- Romeo, E., Betti, G., Marradi, A., Tebaldi, G., 2018. Effect of Active Fillers on Cracking Performance of Bitumen-Stabilised Materials. *Road Materials and Pavement Design*,19:7,1563-1574.
- Sağlık, A., Gungör, A.G., 2008. Karayolları Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi. 148s, Ankara.
- Sağlık, A., Demir, B., Gungör, A.G., 2013. Kazınmış Asfalt Kaplamaların Yerinde Soğuk Geri Dönüşüm Olarak Kullanımı KGM Uygulamaları. 6.Ulusal Asfalt Sempozyumu, 27-28 Kasım, Ankara
- Sakr, H.A., Manke, P.G. 1985. Innovations in Oklahoma Foamix Design Procedures. In: *Asphalt Materials, Mixes, Construction and Quality*. Washington, DC: Transportation Research Board. (Transportation Research Record;1034), 26-34.
- Salta, İ., 2010. Bitümlü Karışımların Geri Dönüşüm Yöntemlerinin İncelenmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 131s, İstanbul.

- Saltan, M, 1999. Esnek Üstyapıların Analitik Değerlendirilmesi. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 202s, Isparta.
- Sangiorgi, C., Tataranni, P., Simone, A., Vignali, V., Lantieri, C., Dondi G., 2017. A Laboratory and Field Evaluation of Cold Recycled Mixture for Base Layer Entirely Made with Reclaimed Asphalt Pavement. *Construction and Building Materials*, 138, 232–239.
- Schwartz, C.W., Khosravifar, S., 2013. Design and Evaluation of Foamed Asphalt Base Materials. Rapor no: SP909B4E, 86s.
- 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.
- Seferoğlu, A.G., Seferoğlu, M.T., Akpınar, M.V., 2015. Yol Aşınma Tabakasının Geri Dönüşüm Malzemesi Olarak Ulaşım Üstyapısında Kullanılabilirliğinin Araştırılması. 2nd International Sustainable Buildings Symposium, 28-30 May, Ankara.
- Seferoğlu, A.G., Seferoğlu, M.T., Akpınar, M.V., 2017. Türkiye’de Geri Dönüşüm Asfalt Kaplamaların (RAP) Bağlayıcısız Temel Tabakalarında Kullanılabilirliği ve Şartname Gereksinimleri. Erişim Tarihi: 09.09.2018 [https://www.researchgate.net/publication/324029775\\_TURKIYE'DE\\_GERI\\_DONUSUM\\_ASFALT\\_KAPLAMALARIN\\_RAP\\_BAGLAYICISIZ\\_TEMEL\\_TABAKALARINDA\\_KULLANILABILIRLIGI\\_VE\\_SARTNAME\\_GEREKSINIMLER\\_I](https://www.researchgate.net/publication/324029775_TURKIYE'DE_GERI_DONUSUM_ASFALT_KAPLAMALARIN_RAP_BAGLAYICISIZ_TEMEL_TABAKALARINDA_KULLANILABILIRLIGI_VE_SARTNAME_GEREKSINIMLER_I)
- Seren, S.I., 2015. Elektrik Ark Fırını Cürufunun Yapay Agrega Olarak Esnek Üstyapılarda Çimento Bağlayıcı Granüler Temel Tabakasında Kullanılabilirliğinin İncelenmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 131s, İstanbul.
- Shu, X., Huang, B., Vukosavljevic, D., 2008. Laboratory Evaluation of Fatigue Characteristics of Recycled Asphalt Mixture. *Construction and Building Materials*, 22(7), 1323–1330.
- Sönmez, İ., 2017. İnşaat Atıklarının Asfaltta Geri Dönüşüm Malzemesi Olarak Kullanılması. Erişim Tarihi: 22.11.2017. <https://docplayer.biz.tr/2790327-Insaat-atiklarinin-asfaltta-geri-donusum-malzemesi-olarak-kullanilmasi-dr-ibrahim-sonmez.html>
- Stimilli, A., Ferrotti, G., Graziani, A., Canestrari, F., 2013. Performance Evaluation of a Cold-Recycled Mixture Containing High Percentage of Reclaimed Asphalt. *Road Materials and Pavement Design*, 14(1), 149–161.
- Sunarjono, S., 2008. The Influence of Foamed Bitumen Characteristics of Cold-Mix Asphalt Properties. The University of Nottingham, Nottingham Transportation Engineering Centre, School of Civil Engineering, Doctor of Philosophy, 311s, Nottingham.

- Tabakovic, A., McNally, C., Fallon, E., 2016. Specification Development for Cold in Situ Recycling of Asphalt. *Construction and Building Materials*, 102, 318–328.
- Temren Z., 2004. Asfalt Üstyapılarının Ömür Döngü Envanteri. Asfalt Müteahhitleri Derneği, 51s, Ankara.
- The University of Memphis, 2018. Stresses in Pavements. Erişim Tarihi: 13.09.2017. [http://www.ce.memphis.edu/4155/Powerpoints/02%20-%20Stresses%20in%20Flexible%20Pavements%20\(Updated\).pdf](http://www.ce.memphis.edu/4155/Powerpoints/02%20-%20Stresses%20in%20Flexible%20Pavements%20(Updated).pdf)
- Thenoux,G., Gonzalez, A., Dowling, R., 2007. Energy Consumption Comparison for Different Asphalt Pavements Rehabilitation Techniques Used in Chile. *Resources, Conservation and Recycling*, 49, 325-339.
- 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.
- Tia, M., Wood, L. E., 1983. Use of Asphalt Emulsion and Foamed Asphalt in Cold-Recycled Asphalt Paving Mixtures. *Transportation Research Record* 898, 315–321.
- Titi, H.H., Elias, M.B., Helwany, S., 2006. Determination of Typical Resilient Modulus Values for Selected Soils in Wisconsin. Final Report, 91s.
- Turk, J., Pranjic, A.M., Mladenovic, A., Cotic, Z., Jurjavcic, P., 2016. Environmental Comparison of Two Alternative Road Pavement Rehabilitation Techniques: Cold-In-Place-Recycling Versus Traditional Reconstruction. *Journal of Cleaner Production*, 121, 45-55.
- Türkiye Asfalt Müteahhitleri Derneği (ASMUD), 2018. Asfalt %100 Geri Kazanılabilen Yapı Malzemesi. Erişim Tarihi: 17.04.2018. [http://www.asmud.org.tr/usr\\_img/kitaplik/Asfalt-100Geri-Kazanilabilen-Yapi-Malzemesi.pdf](http://www.asmud.org.tr/usr_img/kitaplik/Asfalt-100Geri-Kazanilabilen-Yapi-Malzemesi.pdf)
- TS EN ISO 2592, 2017. Petrol ve ilgili ürünler – Parlama ve Yanma Noktasının Tayini - Cleveland Açık Kap Yöntemi. TSE, Ankara.
- TS 1087, 1972. Bitümlü Maddelerde Özgül Ağırlık Tayini (hidrometre, Piknometre ve Su İçinde Tartma Metotları ile). TSE, Ankara
- TS EN 933-9, 2010 Agregaların Geometrik Özellikleri için Deneyler - Bölüm 9: İnce Malzeme Tayini - Metilen mavisi deneyi. TSE, Ankara.
- TS EN 1097-6, 2013. Agregaların Mekanik ve Fiziksel Özellikleri için Deneyler bölüm 6: Tane Yoğunluğu ve Su Emme Oranının Tayini. TSE, Ankara.
- TS EN 1367-2, 2010. Agregaların Termal ve Bozunma Özellikleri için Deneyler Bölüm 2: Magnezyum Sülfat Deneyi. TSE, Ankara.



- TS EN 1426, 2015. Bitüm ve Bitümlü Bağlayıcılar-İğne Batma Derinliği Tayini. TSE, Ankara.
- TS EN 1427, 2015. Bitüm ve Bitümlü Bağlayıcılar-Yumuşama Noktası Tayini-Halka ve Bilye Yöntemi. TSE, Ankara.
- TS EN 1744-1+A1, 2012. Agregaların Kimyasal Özellikleri için Deneyler-Bölüm 1: Kimyasal analiz, TSE, Ankara.
- TS 1900-1, 2006. İnşaat Mühendisliğinde Zemin Lâboratuvar Deneyleri - Bölüm 1: Fiziksel özelliklerin tayini. TSE, Ankara.
- Uherek, E., Halenka, T., Borken-Kleefeld, J., Balkanski, Y., Berntsen, T., Borrego, C., Gauss, M., Hoor, P., Juda-Rezler, K., Lelieveld, J., Melas, D., Rypdal, K., Schmid, S., 2010. Transport impacts on atmosphere and climate: land transport. *Atmospheric Environment*, 44(37), 4772-4816.
- Uz, V.E., 2012. Sathi Kaplamalardaki Kalıcı Deformasyona Etki Eden Parametrelerin İncelenmesi. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 207s, Isparta.
- Wahhab, H.A.A., Baig, M.G., Mahmoud, I.A., Kattan, H.M., 2012. Study of Road Bases Construction in Saudi Arabia Using Foam Asphalt. *Construction and Building Materials*, 26, 113-121.
- Walubita, L.F., Van de Ven, F.C. M., 2000. Stresses and Strains in Asphalt-Surfacing Pavements, 17 - 20 July, South Africa.
- Wang, Y., Leng, Z., Li, X., Hu, C., 2018. Cold Recycling of Reclaimed Asphalt Pavement Towards Improved Engineering Performance. *Journal of Cleaner Production*, 171, 1031-1038.
- Wirtgen, 2012. Cold Recycling - Wirtgen Cold Recycling Technology, Wirtgen Cold Recycling Manual, 368s, Germany.
- White, G., 2018. Foamed Bitumen Base for Airport Pavements. 28th ARRB International Conference - Next Generation Connectivity, 29th April-2nd May, Brisbane-Queensland.
- Wirtgen, 2017. BSM Cold Recycling Laboratory Handbook, 106s, Germany.
- Wozuk, A., Zofka, A., Bandura, L., Franus, W., 2017. Effect of Zeolite Properties on Asphalt Foaming. *Construction and Building Materials*, 139, 247-255.
- Wu, M., 2011. Evaluation of High Percentage of Recycled Asphalt Pavement as Base Course Materials, Washington State University, Department of Civil and Environmental Engineering, Master Thesis, 145s, Washington .
- Xiao, F., Putman, B., Amirkhanian, S., 2015. Rheological Characteristics Investigation of High Percentage RAP Binders with WMA Technology at Various Aging States, *Construction and Building Materials*, 98, 315-324.

- Xiao, F., Yao, S., Wang, J., Li, X., Amir Khanian, S., 2018. A Literature Review on Cold Recycling Technology of Asphalt Pavement. *Construction and Building Materials*, 180, 579–604
- Yan, J., Ni, F., Yang, M., Li, J., 2010. An Experimental Study on Fatigue Properties of Emulsion and Foam Cold Recycled Mixes. *Construction and Building Materials*, 24, 2151–2156.
- Yan, J., Zhu, H., Zhang, Z., Gao, L., Charmot, S., 2014. The Theoretical Analysis of the RAP Aged Asphalt Influence on the Performance of Asphalt Emulsion Cold Recycled Mixes. *Construction and Building Materials*, 71, 444–450.
- Yılmaz, A., Karaşahin, M., Çağlar, M.F., 2008. Granüler Yol Malzemeleri için Düşük Maliyetli Dinamik Üç Eksenli Test Cihazı Geliştirilmesi. *Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 12-1, 26-34
- 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.
- Yu, X., Liu, S., Dong, F., 2016. Comparative Assessment of Rheological Property Characteristics for Unfoamed and Foamed Asphalt Binder. *Construction and Building Materials*, 122, 354–361.
- Zaumanis, M., Mallick, R.B., Frank, R., 2016. 100% Hot Mix Asphalt Recycling: Challenges and Benefits. *Transportation Research Procedia*, 14, 3493 – 3502.
- Zhang, Z., Cong, C., Xi, W., Li, S., 2018. Application Research on the Performances of Pavement Structure with Foamed Asphalt Cold Recycling Mixture. *Construction and Building Materials*, 169, 396–402.
- Zou, J., Isola, M., Roque, R., Chun, S., Koh, C., Lopp, G., 2013. Effect of Hydrated Lime on Fracture Performance of Asphalt Mixture. *Construction and Building Materials*, 44, 302–308.

## EKLER



## Ek A. Üretimlere Ait Sonuçlar

Çizelge A.1. Tüm üretimler için İÇM briketlerine ait deneysel veriler

Üretim Kodu	Gradasyon Tipi	Bitüm Sınıfı	Maksimum Kuru Yoğunluk (t/m <sup>3</sup> )	Optimum su %	Bitüm Yüzdesi	2. briket yaş ağı. (g)	2. briket kuru ağı. (g)	% Su 2. briket	5. briket yaş ağı. (g)	5. briket kuru ağı. (g)	% Su 5. briket
B2,5İKA070Ç1	İK	70/100	2,193	5,200	2,5	247,90	239,40	3,551	341,78	330,60	3,382
B2,5İKA2070Ç1	İK	70/100	2,130	5,900	2,5	300,49	288,87	4,023	331,37	319,33	3,770
B2,5İKA7070Ç1	İK	70/100	2,180	6,000	2,5	366,57	352,64	3,950	373,28	360,31	3,600
B1,3İK70Ç1	İK	70/100	2,053	6,000	1,3	258,01	247,32	4,322	273,88	263,71	3,857
B1,9İK70Ç1	İK	70/100	2,053	6,000	1,9	314,67	301,40	4,403	266,40	256,37	3,912
B2,2İK70Ç1	İK	70/100	2,053	6,000	2,2	335,04	321,23	4,299	219,71	280,75	3,904
B2,5İK70Ç1	İK	70/100	2,053	6,000	2,5	283,30	272,85	3,830	310,71	300,86	3,274
B2,8İK70Ç1	İK	70/100	2,053	6,000	2,8	385,29	368,10	4,670	442,18	424,13	4,256
B3,1İK70Ç1	İK	70/100	2,053	6,000	3,1	415,47	397,75	4,455	344,52	330,71	4,176
B3,7İK70Ç1	İK	70/100	2,053	6,000	3,7	313,06	300,06	4,332	338,04	324,63	4,131
B2,5KK70Ç1	KK	70/100	2,160	5,200	2,5	382,75	368,34	3,912	350,65	339,78	3,199
B2,5NN70Ç1	NN	70/100	2,118	3,900	2,5	357,28	347,02	2,957	394,34	384,71	2,503
B2,5KN70Ç1	KN	70/100	2,108	4,400	2,5	345,55	334,13	3,418	426,69	414,41	2,963
B1,9İN70Ç1	İN	70/100	2,191	6,000	1,9	276,21	265,86	3,893	285,01	274,85	3,697
B2,2İN70Ç1	İN	70/100	2,191	6,000	2,2	259,50	249,40	4,050	266,07	256,37	3,784
B2,5İN70Ç1	İN	70/100	2,191	6,000	2,5	371,04	357,52	3,782	350,39	338,13	3,626
B2,8İN70Ç1	İN	70/100	2,191	6,000	2,8	294,33	282,36	4,239	308,87	297,25	3,909
B3,1İN70Ç1	İN	70/100	2,191	6,000	3,1	297,16	287,04	3,526	258,80	250,67	3,243
B1,9İİ70Ç1	İİ	70/100	2,153	5,900	1,9	308,70	297,17	3,880	257,83	249,17	3,476
B2,2İİ70Ç1	İİ	70/100	2,153	5,900	2,2	289,96	279,47	3,754	317,19	305,90	3,691
B2,5İİ70Ç1	İİ	70/100	2,153	5,900	2,5	338,75	327,57	3,413	304,64	294,98	3,275
B2,8İİ70Ç1	İİ	70/100	2,153	5,900	2,8	372,86	359,29	3,777	305,85	295,69	3,436
B3,1İİ70Ç1	İİ	70/100	2,153	5,900	3,1	328,68	316,79	3,753	348,57	336,37	3,627

Çizelge A.1. Tüm üretimler için İÇM briketlerine ait deneysel veriler (Devam)

Üretim Kodu	Gradasyon Tipi	Bitüm Sınıfı	Maksimum Kuru Yoğunluk (t/m <sup>3</sup> )	Optimum su %	Bitüm Yüzdesi	2. briket yaş ağı. (g)	2. briket kuru ağı. (g)	% Su 2. briket	5. briket yaş ağı. (g)	5. briket kuru ağı. (g)	% Su 5. briket
B1,9W70Ç1	WİRTGEN	70/100	2,049	4,100	1,9	343,73	332,67	3,325	304,74	295,95	2,970
B2,2W70Ç1	WİRTGEN	70/100	2,049	4,100	2,2	315,92	305,55	3,394	312,64	303,00	3,182
B2,5W70Ç1	WİRTGEN	70/100	2,049	4,100	2,5	302,07	291,31	3,694	349,45	338,14	3,345
B2,8W70Ç1	WİRTGEN	70/100	2,049	4,100	2,8	266,26	257,78	3,290	257,93	250,33	3,036
B3,1W70Ç1	WİRTGEN	70/100	2,049	4,100	3,1	249,68	241,90	3,216	299,07	290,25	3,039
B2,5KİB70Ç1	Kİ (BSK)	70/100	2,152	4,800	2,5	288,48	277,06	4,122	318,03	307,14	3,546
B1,9KİS70Ç1	Kİ (SATHİ)	70/100	2,303	4,700	1,9	359,19	348,02	3,210	382,97	371,70	3,032
B2,2KİS70Ç1	Kİ (SATHİ)	70/100	2,303	4,700	2,2	258,24	249,05	3,690	307,56	297,42	3,409
B2,5KİS70Ç1	Kİ (SATHİ)	70/100	2,303	4,700	2,5	384,31	370,56	3,711	418,79	405,98	3,155
B2,8KİS70Ç1	Kİ (SATHİ)	70/100	2,303	4,700	2,8	384,60	371,07	3,646	367,74	355,43	3,463
B3,1KİS70Ç1	Kİ (SATHİ)	70/100	2,303	4,700	3,1	313,21	300,97	4,067	332,90	322,90	3,097
B2,5W070Ç1	WİRTG ORTA	70/100	2,131	5,000	2,5	316,94	306,49	3,410	306,23	296,38	3,323
B1,9İK50Ç1	İK	50/70	2,053	6,000	1,9	369,41	356,26	3,691	358,32	346,73	3,343
B2,2İK50Ç1	İK	50/70	2,053	6,000	2,2	395,40	380,56	3,900	343,34	331,53	3,562
B2,5İK50Ç1	İK	50/70	2,053	6,000	2,5	292,83	280,65	4,340	368,19	353,81	4,064
B2,8İK50Ç1	İK	50/70	2,053	6,000	2,8	371,41	357,36	3,932	361,34	349,83	3,290
B3,1İK50Ç1	İK	50/70	2,053	6,000	3,1	282,97	271,29	4,305	288,18	277,59	3,815
B1,9İK100Ç1	İK	100/150	2,053	6,000	1,9	372,41	357,36	4,211	363,84	349,83	4,005
B2,2İK100Ç1	İK	100/150	2,053	6,000	2,2	292,60	281,32	4,010	324,53	313,42	3,545
B2,5İK100Ç1	İK	100/150	2,053	6,000	2,5	424,19	406,17	4,437	382,68	367,81	4,043
B2,8İK100Ç1	İK	100/150	2,053	6,000	2,8	284,32	272,38	4,384	326,45	315,20	3,569
B3,1İK100Ç1	İK	100/150	2,053	6,000	3,1	324,41	310,03	4,638	300,79	288,18	4,376

Çizelge A.1. Tüm üretimler için İÇM briketlerine ait deneysel veriler (Devam)

Üretim Kodu	Gradasyon Tipi	Bitüm Sınıfı	Maksimum Kuru Yoğunluk (t/m <sup>3</sup> )	Optimum su %	Bitüm Yüzdesi	2. briket yaş ağı. (g)	2. briket kuru ağı. (g)	% Su 2. briket	5. briket yaş ağı. (g)	5. briket kuru ağı. (g)	% Su 5. briket
B1,9İK160Ç1	İK	160/220	2,053	6,000	1,9	332,30	318,07	4,474	380,19	364,64	4,179
B2,2İK160Ç1	İK	160/220	2,053	6,000	2,2	365,76	350,34	4,401	357,39	343,07	4,174
B2,5İK160Ç1	İK	160/220	2,053	6,000	2,5	300,46	288,41	4,178	316,03	303,94	3,978
B2,8İK160Ç1	İK	160/220	2,053	6,000	2,8	382,93	367,55	4,184	251,99	242,83	3,772
B3,1İK160Ç1	İK	160/220	2,053	6,000	3,1	301,35	288,91	4,306	284,73	273,71	4,026
B2,5İK70K1-7	İK	70/100	2,102	5,000	2,5	411,04	395,93	3,816	345,34	332,78	3,774
B1,9İK70K1	İK	70/100	2,102	5,000	1,9	370,07	356,66	3,760	338,98	326,78	3,733
B3,1İK70K1	İK	70/100	2,102	5,000	3,1	324,01	311,05	4,167	343,90	331,53	3,731
B2,5W70K1	WİRTGEN	70/100	2,082	5,100	2,5	313,60	301,55	3,996	280,08	270,22	3,649
B2,5İK160K1	İK	160/220	2,102	5,000	2,5	353,85	340,77	3,838	306,12	295,05	3,752
B2,5İK100K1	İK	100/150	2,102	5,000	2,5	336,08	324,03	3,719	271,79	262,17	3,669
B2,5İK70UK1	İK	70/100	2,141	4,700	2,5	342,87	330,50	3,743	240,00	232,11	3,399
B1,9K70UK1	İK	70/100	2,141	4,700	1,9	382,64	369,13	3,660	437,24	422,36	3,523
B3,1İK70UK1-7	İK	70/100	2,141	4,700	3,1	308,02	296,51	3,882	316,12	305,44	3,497
B2,5W70UK1	WİRTGEN	70/100	2,134	5,600	2,5	309,02	299,37	3,223	313,68	304,58	2,988
B2,5İK160UK1	İK	160/220	2,141	4,700	2,5	300,40	289,98	3,593	368,71	356,56	3,408
B2,5İK100UK1	İK	100/150	2,141	4,700	2,5	295,61	284,79	3,799	326,29	315,20	3,518
B2,5İK70-7	İK	70/100	2,037	4,700	2,5	316,98	306,44	3,439	333,64	323,29	3,201
B1,9İK70	İK	70/100	2,037	4,700	1,9	265,39	255,18	4,001	293,67	283,46	3,602
B3,1İK70	İK	70/100	2,037	4,700	3,1	344,83	333,53	3,388	319,18	308,95	3,311
B2,5W70	WİRTGEN	70/100	2,056	5,300	2,5	346,47	333,57	3,867	332,54	320,90	3,627
B2,5İK160	İK	160/220	2,037	4,700	2,5	382,68	368,86	3,747	321,05	309,80	3,631
B2,5İK100	İK	100/150	2,037	4,700	2,5	362,94	350,17	3,647	352,52	341,30	3,287
B2,5İK70K1UK1	İK	70/100	2,127	4,600	2,5						

Çizelge A.1. Tüm üretimler için İÇM briketlerine ait deneysel veriler (Devam)

Üretim Kodu	Ort. Çap (mm)	Ortalama Yükseklik (mm)	Ortalama Havadaki Ağırlık (g)	Ortalama Sudaki Ağırlık (g)	Ortalama DYKA (gr)	Ortalama Hacim (cm <sup>3</sup> )	Ort. Dp (g/cm <sup>3</sup> )	Ortalama Etüv öncesi Ağırlık (g)	Ortalama Etüv Sonrası Ağırlık (g)	Ortalama Su Banyosu Sonrası Ağırlık (g)	Hacim yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> )	Nem içeriği kuru numune %	Kuru yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	Nem içeriği yaş numune %
B2,5İKA070Ç1	101,48	63,13	1107,97	656,10	1154,40	499,670	2,217	1128,26	1106,08	1156,83	2166,560	2,005	2123,130	4,634
B2,5İKA2070Ç1	101,56	62,81	1098,33	638,90	1131,63	492,730	2,229	1111,66	1093,83	1132,63	2150,060	1,629	2115,030	3,639
B2,5İKA7070Ç1	101,52	63,94	1102,37	627,53	1135,60	508,070	2,170	1134,44	1105,60	1149,27	2135,925	2,609	2080,195	3,693
B1,3İK70Ç1	101,51	63,72	1105,20	632,43	1138,30	505,867	2,185	1128,60	1104,96	1144,00	2142,789	2,140	2096,909	3,535
B1,9İK70Ç1	101,48	63,01	1103,50	621,57	1125,67	504,100	2,189	1123,96	1103,46	1136,37	2165,352	1,858	2125,119	2,932
B2,2İK70Ç1	101,51	63,92	1106,43	622,33	1132,53	510,200	2,169	1135,18	1105,37	1147,98	2136,704	2,697	2079,074	3,875
B2,5İK70Ç1	101,51	64,17	1105,90	623,83	1133,73	509,900	2,169	1132,57	1106,06	1145,17	2129,903	2,397	2078,846	3,395
B2,8İK70Ç1	101,51	63,78	1091,70	607,57	1114,97	507,400	2,152	1118,07	1091,08	1129,17	2113,858	2,474	2061,580	3,514
B3,1İK70Ç1	101,54	63,88	1105,85	615,35	1123,40	508,050	2,177	1130,49	1104,74	1140,37	2135,710	2,331	2085,930	3,372
B3,7İK70Ç1	101,54	64,95	1103,70	608,97	1128,13	519,167	2,126	1123,47	1103,60	1135,73	2098,160	1,800	2060,382	2,841
B2,5KK70Ç1	101,48	63,49	1103,73	625,50	1128,37	502,870	2,195	1129,69	1103,76	1135,83	2149,650	2,350	2099,100	2,971
B2,5NN70Ç1	101,54	65,17	1120,43	628,63	1143,67	515,030	2,176	1135,89	1118,04	1152,83	2118,520	1,596	2084,700	3,301
B2,5KN70Ç1	101,54	63,41	1111,83	628,40	1134,83	506,430	2,195	1129,87	1110,80	1143,27	2163,070	1,717	2125,950	2,963
B1,9İN70Ç1	101,53	63,49	1104,13	626,77	1132,60	505,833	2,183	1130,66	1106,94	1144,17	2153,398	2,142	2107,267	3,289
B2,2İN70Ç1	101,48	64,59	1105,77	625,13	1138,37	513,233	2,155	1135,50	1107,44	1147,63	2119,887	2,533	2066,185	3,627
B2,5İN70Ç1	101,49	64,86	1105,07	625,90	1139,90	514,000	2,150	1133,97	1107,69	1151,43	2111,285	2,373	2061,198	3,761
B2,8İN70Ç1	101,48	64,56	1107,93	618,87	1135,03	516,167	2,147	1137,38	1108,14	1143,30	2122,362	2,638	2066,368	3,208
B3,1İN70Ç1	101,48	66,46	1109,97	605,80	1137,97	532,167	2,086	1136,96	1111,01	1140,47	2067,052	2,335	2018,771	2,609
B1,9İİ70Ç1	101,50	63,93	1104,00	636,40	1149,33	512,933	2,152	1132,76	1104,00	1150,00	2134,273	2,605	2078,676	3,966
B2,2İİ70Ç1	101,54	64,19	1104,37	627,90	1141,73	513,833	2,149	1128,26	1104,93	1148,70	2125,568	2,111	2080,696	3,858
B2,5İİ70Ç1	101,47	65,76	1110,37	630,63	1151,63	521,000	2,131	1128,79	1109,53	1161,57	2087,177	1,736	2050,988	4,784
B2,8İİ70Ç1	101,54	64,49	1104,23	624,20	1139,40	515,200	2,143	1132,24	1105,17	1147,00	2116,229	2,450	2064,361	3,638
B3,1İİ70Ç1	101,49	64,28	1105,57	619,90	1133,90	514,000	2,151	1129,92	1105,54	1141,97	2126,259	2,205	2079,377	3,342

Çizelge A.1. Tüm üretimler için İÇM briketlerine ait deneysel veriler (Devam)

Üretim Kodu	Ortalama Çap (mm)	Ortalama Yükseklik (mm)	Ortalama Havadaki Ağırlık (g)	Ortalama Sudaki Ağırlık (g)	Ort. DYKA (g)	Ort. Hacim (cm <sup>3</sup> )	Ort. Dp (g/cm <sup>3</sup> )	Ortalama Etüv öncesi Ağırlık (g)	Ortalama Etüv Sonrası Ağırlık (g)	Ortalama Su Banyosu Sonrası Ağırlık (g)	Hacim yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> )	Nem içeriği kuru numune %	Kuru yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	Nem içeriği yaş numune %
B1,9W70Ç1	101,53	66,10	1113,73	632,30	1155,87	523,567	2,127	1133,67	1113,36	1162,23	2080,250	1,824	2042,300	4,474
B2,2W70Ç1	101,49	65,85	1113,37	630,37	1150,33	519,967	2,141	1131,78	1114,41	1165,87	2092,090	1,558	2059,510	4,453
B2,5W70Ç1	101,43	66,33	1112,47	627,70	1153,53	525,833	2,116	1132,34	1112,51	1165,13	2069,914	1,783	2033,010	4,656
B2,8W70Ç1	101,50	66,69	1115,87	626,63	1155,67	529,033	2,109	1135,86	1116,34	1160,20	2068,680	1,748	2032,530	3,961
B3,1W70Ç1	101,51	66,91	1114,90	620,47	1153,30	532,833	2,092	1131,92	1114,59	1164,73	2058,390	1,555	2026,370	4,454
B2,5KİB70Ç1	101,52	63,98	1106,47	623,63	1135,70	512,067	2,161	1133,19	1106,89	1144,03	2137,136	2,376	2086,359	3,320
B1,9KİS70Ç1	101,54	62,03	1106,40	654,97	1146,87	491,900	2,249	1116,73	1103,90	1148,53	2197,426	1,162	2171,890	4,003
B2,2KİS70Ç1	101,56	61,46	1106,63	651,90	1142,33	490,433	2,256	1128,00	1105,92	1145,07	2221,560	1,997	2177,199	3,607
B2,5KİS70Ç1	101,52	62,91	1100,80	647,63	1139,07	491,433	2,240	1113,27	1100,30	1144,50	2160,679	1,178	2135,220	4,194
B2,8KİS70Ç1	101,56	61,83	1104,50	644,23	1136,80	492,567	2,242	1134,58	1105,32	1143,10	2207,258	2,647	2148,859	3,329
B3,1KİS70Ç1	101,52	62,93	1098,20	635,53	1133,57	498,033	2,205	1127,88	1098,26	1137,07	2156,387	2,698	2098,246	3,580
B2,5W070Ç1	101,51	65,32	1113,20	625,90	1146,30	520,400	2,139	1136,84	1112,16	1150,87	2103,851	2,220	2057,144	3,688
B1,9İK50Ç1	101,50	64,47	1099,47	614,20	1129,07	514,870	2,136	1127,82	1100,20	1139,83	2109,212	2,511	2056,256	3,624
B2,2İK50Ç1	101,53	63,71	1093,70	609,03	1115,30	506,267	2,160	1113,36	1093,26	1122,03	2119,291	1,840	2080,343	2,910
B2,5İK50Ç1	101,44	63,59	1104,23	623,87	1131,50	507,630	2,175	1127,46	1103,28	1134,43	2146,580	2,191	2099,540	2,834
B2,8İK50Ç1	101,47	64,71	1105,87	610,37	1128,57	518,200	2,134	1128,54	1105,58	1135,43	2113,082	2,077	2069,190	2,807
B3,1İK50Ç1	101,46	64,51	1106,60	615,33	1127,83	512,500	2,159	1129,52	1106,76	1138,60	2122,236	2,057	2078,584	2,786
B1,9İK100Ç1	101,53	63,80	1105,03	623,37	1132,93	509,567	2,169	1136,01	1105,30	1141,83	2139,803	2,799	2080,350	3,386
B2,2İK100Ç1	101,56	63,48	1097,60	619,03	1124,03	505,000	2,173	1130,79	1099,54	1134,60	2138,402	2,841	2077,620	3,196
B2,5İK100Ç1	101,54	64,06	1103,80	617,57	1128,40	510,833	2,161	1136,91	1106,01	1138,73	2131,906	2,794	2072,340	2,867
B2,8İK100Ç1	101,53	63,54	1102,40	614,97	1124,30	509,333	2,164	1129,63	1102,07	1134,97	2142,125	2,502	2088,520	2,949
B3,1İK100Ç1	101,51	63,59	1100,30	608,50	1117,13	508,633	2,163	1126,79	1102,18	1129,83	2141,589	2,223	2093,760	2,511



Çizelge A.1. Tüm üretimler için İÇM briketlerine ait deneysel veriler (Devam)

Üretim Kodu	Ortalama Çap (mm)	Ortalama Yükseklik (mm)	Ortalama Havadaki Ağırlık (g)	Ortalama Sudaki Ağırlık (g)	Ortalama DYKA (g)	Ortalama Hacim (cm <sup>3</sup> )	Ortalama Dp (g/cm <sup>3</sup> )	Ortalama Etüv öncesi Ağırlık (g)	Ortalama Etüv Sonrası Ağırlık (g)	Ortalama Su Banyosu Sonrası Ağırlık (g)	Hacim yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> )	Nem içeriği kuru numune %	Kuru yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	Nem içeriği yaş numune %
B1,9İK160Ç1	101,57	63,08	1101,00	619,10	1123,03	503,933	2,185	1130,02	1102,32	1135,90	2156,866	2,513	2102,620	2,902
B2,2İK160Ç1	101,54	62,99	1103,90	621,63	1126,27	604,630	2,188	1130,68	1102,80	1135,70	2162,010	2,528	2107,350	2,928
B2,5İK160Ç1	101,52	63,31	1103,10	613,33	1121,10	507,767	2,172	1124,86	1102,80	1129,17	2152,010	2,000	2108,970	2,409
B2,8İK160Ç1	101,47	64,43	1102,33	612,27	1126,87	514,600	2,142	1121,27	1103,01	1138,47	2117,170	1,655	2082,120	3,256
B3,1İK160Ç1	101,46	64,35	1107,97	616,23	1130,20	513,967	2,156	1134,80	1110,20	1138,77	2134,120	2,177	2087,650	2,595
B2,5İK70K1-7	101,57	65,78	1106,37	618,17	1143,30	525,133	2,107	1129,44	1108,10	1158,50	2079,300	1,926	2039,230	4,282
B1,9İK70K1	101,54	65,38	1108,20	620,13	1142,17	522,033	2,123	1137,87	1108,73	1159,07	2094,022	2,628	2038,999	4,430
B3,1İK70K1	101,52	65,43	1107,73	606,97	1126,83	519,867	2,131	1126,02	1107,69	1149,03	2091,370	1,655	2056,760	3,728
B2,5W70K1	101,54	65,04	1104,70	616,47	1135,63	519,167	2,128	1130,14	1102,18	1146,33	2092,680	2,538	2039,570	4,086
B2,5İK160K1	101,56	64,70	1103,93	608,03	1123,00	514,967	2,144	1127,26	1104,12	1146,30	2106,785	2,095	2062,650	3,672
B2,5İK100K1	101,57	65,75	1106,30	596,47	1119,83	523,367	2,114	1126,40	1106,72	1150,27	2077,650	1,778	2040,710	3,850
B2,5İK70UK1	101,53	65,73	1107,97	626,23	1147,53	521,300	2,125	1134,49	1109,39	1161,30	2084,722	2,263	2037,554	4,571
B1,9K70UK1	101,52	65,19	1100,33	626,77	1143,63	516,867	2,129	1126,77	1101,40	1154,13	2087,126	2,303	2039,060	4,531
B3,1İK70UK1-7	101,56	65,99	1105,37	611,87	1134,30	522,433	2,116	1128,44	1107,12	1153,80	2071,050	1,926	2031,160	4,124
B2,5W70UK1	101,56	65,03	1107,13	615,93	1134,40	518,467	2,135	1137,08	1105,28	1144,23	2098,326	2,877	2037,960	3,735
B2,5İK160UK1	101,56	65,21	1106,40	615,97	1134,93	518,967	2,132	1132,18	1108,04	1153,93	2097,700	2,178	2052,000	4,002
B2,5İK100UK1	101,58	65,15	1105,20	617,57	1134,40	516,833	2,138	1126,79	1105,13	1150,23	2093,248	1,960	2052,230	4,037
B2,5İK70-7	101,53	65,71	1104,23	624,93	1140,33	515,400	2,142	1128,91	1105,08	1156,60	2077,177	2,157	2032,368	4,885
B1,9İK70	101,56	65,45	1107,37	626,37	1146,23	519,867	2,130	1135,60	1107,76	1163,77	2089,515	2,514	2036,993	4,979
B3,1İK70	101,51	65,62	1104,13	614,90	1136,20	521,300	2,118	1131,19	1105,69	1153,90	2081,956	2,307	2033,932	4,241
B2,5W70	101,56	65,28	1103,07	616,93	1136,03	519,100	2,125	1130,10	1103,09	1153,30	2086,272	2,449	2035,186	4,510
B2,5İK160	101,58	65,01	1104,57	607,33	1123,07	515,730	2,142	1126,07	1106,41	1153,77	2100,304	1,776	2062,992	4,140
B2,5İK100	101,52	66,54	1110,53	599,50	1131,47	531,967	2,088	1129,11	1110,26	1157,47	2061,232	1,698	2026,207	4,345
B2,5İK70K1UK1	101,56	65,57	1112,90	601,00	1121,90	520,900	2,137	1133,54	1113,14		2095,620	1,833	2057,210	

Çizelge A.1. Tüm üretimler için İÇM briketlerine ait deneysel veriler (Devam)

Üretim Kodu	Ortalama Deplasman Kuru (mm)	Ortalama Deplasman Yaş (mm)	Merkez ısı kuru (°C)	Merkez ısı yaş (°C)	Ortalama Yük Kuru (kg)	Ortalama Yük Yaş (kg)	Ortalama Kuru İÇM (kPa)	Ortalama Yaş İÇM (kPa)	TSR (%)	Kırıldığı Anda Briket Yaş Ağırlığı (g)	Kırıldığı Anda Briket kuru Ağırlığı (g)	Kırıldığı Anda Briket Nemi %	CBR %
B2,5İKA070Ç1	0,93	1,27	37,30	24,70	140,33	197,33	140,05	196,05	139,986	1160,31	1108,98	4,629	
B2,5İKA2070Ç1	0,97	1,13	32,50	25,00	179,67	166,33	179,77	165,89	92,282	1126,52	1084,83	3,843	
B2,5İKA7070Ç1	0,87	1,03	38,00	24,30	161,33	235,00	158,38	230,12	145,296	1141,95	1098,44	3,961	
B1,3İK70Ç1	0,87	1,93	31,40	24,80	198,33	202,67	194,96	199,59	102,375	1133,61	1095,76	3,454	
B1,9İK70Ç1	0,83	0,93	34,00	24,70	226,33	241,33	225,12	239,88	106,557	1129,15	1093,16	3,292	
B2,2İK70Ç1	1,27	1,07	32,90	24,70	195,67	242,00	192,10	237,45	123,607	1136,28	1095,47	3,725	
B2,5İK70Ç1	1,43	1,10	32,20	25,30	249,00	250,33	244,26	243,52	99,696	1146,60	1107,40	3,540	64,623
B2,8İK70Ç1	1,07	1,03	31,10	24,50	147,00	167,67	144,37	165,17	114,405	1114,49	1077,26	3,456	
B3,1İK70Ç1	1,17	1,20	31,10	24,50	196,33	243,00	192,79	237,13	122,996	1133,03	1097,29	3,257	
B3,7İK70Ç1	1,43	1,23	32,00	24,40	230,33	259,67	222,03	250,84	112,974	1135,15	1103,52	2,866	
B2,5KK70Ç1	1,03	1,03	32,30	25,00	221,00	262,33	220,07	257,64	117,070	1129,67	1097,20	2,959	
B2,5NN70Ç1	1,17	1,10	32,70	24,80	282,33	255,33	271,80	244,79	90,064	1141,28	1106,78	3,117	
B2,5KN70Ç1	1,17	1,17	32,30	25,40	305,67	315,33	301,59	312,03	103,461	1134,38	1101,22	3,011	
B1,9İN70Ç1	0,93	0,93	31,30	24,50	233,33	240,00	229,67	237,27	103,308	1142,62	1104,67	3,435	
B2,2İN70Ç1	1,43	1,33	31,60	24,60	272,00	231,67	264,55	224,88	85,004	1142,81	1103,81	3,533	
B2,5İN70Ç1	1,17	1,27	32,20	25,30	230,67	244,00	222,75	235,95	105,929	1151,11	1108,12	3,880	
B2,8İN70Ç1	1,17	1,27	31,90	24,70	227,33	254,00	220,75	247,00	111,893	1139,94	1102,85	3,363	
B3,1İN70Ç1	1,47	1,83	33,50	24,70	157,33	216,67	147,63	205,30	139,064	1135,98	1102,59	3,028	
B1,9İİ70Ç1	1,07	1,10	31,80	24,90	279,00	261,00	272,97	257,42	94,303	1146,84	1102,37	4,034	
B2,2İİ70Ç1	0,93	1,13	32,10	25,00	305,33	299,00	298,95	291,78	97,602	1140,61	1094,70	4,194	
B2,5İİ70Ç1	1,10	1,20	32,30	24,80	307,00	264,00	296,12	248,10	83,785	1161,10	1107,88	4,804	
B2,8İİ70Ç1	1,13	1,33	32,20	24,80	304,67	287,67	296,07	279,74	94,484	1143,14	1103,90	3,555	
B3,1İİ70Ç1	1,13	1,07	32,40	25,10	293,67	285,33	285,68	278,23	97,389	1135,82	1099,50	3,303	

Çizelge A.1. Tüm üretimler için İÇM briketlerine ait deneysel veriler (Devam)

Üretim Kodu	Ortalama Deplasman Kuru (mm)	Ortalama Deplasman Yaş (mm)	Merkez ısı kuru (°C)	Merkez ısı yaş (°C)	Ortalama Yük Kuru (kg)	Ortalama Yük Yaş (kg)	Ortalama Kuru İÇM (kPa)	Ortalama Yaş İÇM (kPa)	TSR (%)	Kırıldığı Anda Briket Yaş Ağırlığı (g)	Kırıldığı Anda Briket kuru Ağırlığı (g)	Kırıldığı Anda Briket Nemi %	CBR %
B1,9W70Ç1	1,10	1,07	32,70	24,90	268,33	235,33	253,46	223,50	88,181	1153,45	1103,94	4,485	
B2,2W70Ç1	1,37	1,10	33,00	24,80	273,67	255,00	261,35	241,88	92,548	1157,15	1108,41	4,397	
B2,5W70Ç1	1,20	1,40	38,00	24,80	181,67	208,00	171,65	196,68	114,584	1158,82	1109,46	4,449	
B2,8W70Ç1	1,27	1,13	33,00	24,90	242,33	241,33	227,18	227,67	100,216	1155,83	1113,37	3,814	
B3,1W70Ç1	1,10	1,27	35,50	25,00	208,33	177,33	195,60	165,31	84,514	1152,97	1105,44	4,300	
B2,5KİB70Ç1	1,03	1,10	32,60	27,90	293,67	300,00	288,77	293,45	101,620	1138,88	1102,75	3,276	
B1,9KİS70Ç1	1,03	0,87	31,10	24,90	342,33	279,33	345,66	282,16	81,629	1146,36	1099,67	4,246	
B2,2KİS70Ç1	0,73	0,83	33,10	25,30	240,67	272,67	245,55	277,61	113,053	1143,34	1104,86	3,483	
B2,5KİS70Ç1	1,07	1,00	31,00	25,00	352,00	286,00	352,38	284,67	80,785	1139,65	1092,72	4,295	
B2,8KİS70Ç1	1,07	1,03	32,10	24,80	307,67	352,33	311,28	356,04	114,379	1134,68	1099,24	3,224	
B3,1KİS70Ç1	1,03	1,30	31,10	24,90	269,67	297,67	269,87	295,77	109,596	1134,57	1093,46	3,760	
B2,5W070Ç1	1,03	1,13	33,00	24,70	297,00	274,33	286,01	262,89	91,916	1152,85	1109,67	3,891	
B1,9İK50Ç1	1,07	1,00	31,90	25,00	194,00	224,67	188,80	218,54	115,755	1140,40	1099,00	3,767	
B2,2İK50Ç1	1,03	1,00	32,90	24,80	274,33	261,00	270,20	256,38	94,885	1140,80	1104,56	3,281	
B2,5İK50Ç1	1,07	1,17	31,20	25,10	203,67	216,33	201,25	214,03	106,352	1131,11	1100,45	2,786	
B2,8İK50Ç1	1,07	1,00	33,90	25,00	176,00	228,67	170,70	221,38	129,691	1136,49	1104,67	2,880	
B3,1İK50Ç1	1,27	1,20	37,40	25,00	155,00	251,00	150,94	243,39	161,253	1138,40	1106,59	2,875	
B1,9İK100Ç1	1,07	1,00	31,40	25,00	269,00	218,00	264,82	214,04	80,826	1138,40	1100,49	3,445	
B2,2İK100Ç1	1,10	1,10	31,70	25,40	215,00	209,00	212,55	205,96	96,895	1126,43	1091,35	3,214	
B2,5İK100Ç1	1,17	1,07	31,70	25,20	258,00	213,33	252,00	209,10	82,974	1133,04	1097,77	3,213	
B2,8İK100Ç1	1,23	1,20	31,40	25,00	246,67	219,00	244,15	215,72	88,354	1134,57	1101,22	3,028	
B3,1İK100Ç1	1,30	1,30	32,80	24,80	301,33	263,33	296,91	260,20	87,637	1115,24	1088,19	2,486	

Çizelge A.1. Tüm üretimler için İÇM briketlerine ait deneysel veriler (Devam)

Üretim Kodu	Ortalama Deplasman Kuru (mm)	Ortalama Deplasman Yaş (mm)	Merkez ısı kuru (°C)	Merkez ısı yaş (°C)	Ortalama Yük Kuru (kg)	Ortalama Yük Yaş (kg)	Ortalama Kuru İÇM (kPa)	Ortalama Yaş İÇM (kPa)	TSR (%)	Kırıldığı Anda Briket Yaş Ağırlığı (g)	Kırıldığı Anda Briket kuru Ağırlığı (g)	Kırıldığı Anda Briket Nemi %	CBR %
B1,9İK160Ç1	1,10	1,17	32,80	25,40	252,67	234,00	251,05	232,64	92,668	1127,77	1096,58	2,844	
B2,2İK160Ç1	1,20	1,20	32,00	24,90	274,00	196,67	273,39	195,65	71,566	1128,71	1098,73	2,729	
B2,5İK160Ç1	1,43	1,30	32,80	25,00	308,00	251,33	305,35	249,04	81,561	1125,28	1099,50	2,345	
B2,8İK160Ç1	1,10	1,17	35,20	25,10	191,00	228,00	186,09	221,51	119,036	1136,49	1109,18	2,462	
B3,1İK160Ç1	1,07	1,10	38,70	25,00	151,33	257,67	147,47	250,73	172,682	1133,52	1105,73	2,513	
B2,5İK70K1-7	1,13	1,20	36,20	25,00	142,67	197,67	135,28	189,62	140,164	1152,30	1109,56	3,852	53,40
B1,9İK70K1	1,17	1,17	31,80	24,80	215,67	173,00	206,92	166,24	80,342	1139,75	1091,06	4,463	
B3,1İK70K1	1,23	1,43	31,40	24,80	197,00	194,67	187,92	186,48	99,233	1152,11	1105,82	4,186	
B2,5W70K1	1,30	1,43	34,70	24,70	191,33	176,00	184,56	169,72	91,962	1141,28	1095,09	4,218	
B2,5İK160K1	1,07	1,23	35,30	25,00	154,00	175,00	148,85	169,68	113,997	1142,91	1102,21	3,693	
B2,5İK100K1	1,23	1,63	32,00	24,10	168,33	224,67	160,25	214,47	133,840	1142,18	1099,08	3,921	
B2,5İK70UK1	1,27	1,37	35,20	25,50	125,67	118,33	119,90	113,00	94,250	1153,05	1102,87	4,550	57,01
B1,9K70UK1	1,20	1,67	35,80	24,40	105,33	77,33	101,37	74,66	73,653	1146,92	1096,69	4,580	
B3,1İK70UK1-7	1,30	1,47	36,40	24,90	121,00	110,67	114,94	104,94	91,301	1146,55	1101,22	4,116	
B2,5W70UK1	1,37	1,50	35,00	25,00	139,33	106,33	134,08	102,66	76,567	1140,39	1100,14	3,659	
B2,5İK160UK1	1,17	1,40	31,40	24,90	128,00	112,33	123,29	107,93	87,539	1150,36	1107,61	3,860	
B2,5İK100UK1	1,23	1,47	32,10	24,30	164,33	115,00	158,28	110,44	69,776	1147,96	1105,86	3,807	
B2,5İK70-7	1,03		36,10	25,20	155,33	71,00	148,49	67,65	45,557	1153,70	1100,09	4,873	31,20
B1,9İK70	0,97		38,50	25,00	126,00	55,33	120,42	53,02	44,033	1159,50	1104,86	4,945	
B3,1İK70	1,20	1,70	36,10	24,70	170,67	81,00	163,46	77,04	47,132	1133,18	1086,93	4,255	
B2,5W70	1,03	1,50	38,30	24,90	125,67	70,33	120,81	67,38	55,771	1143,39	1096,53	4,273	
B2,5İK160	1,20	1,30	34,20	24,80	129,67	79,00	125,17	76,02	60,736	1145,69	1101,49	4,013	
B2,5İK100	1,57	1,57	32,00	24,20	141,67	111,33	132,85	105,04	79,067	1148,43	1101,89	4,224	
B2,5İK70K1UK1	0,63	1,53	37,30	24,80	206,33	270,67	197,34	258,51	131,001				

## Ek B. Üretimlere Ait Esneklik Modülü Sonuçları

Çizelge B.1. B2,5İK70Ç1-K numunesi için esneklik modülü çizelgesi (her 100 döngünün son 5 değeri)

B2,5İK70Ç1-K						
Sekans	Tekrarlı Yük Sayısı	Çevre Basıncı (kPa)	Son 5 Toplam (Hacimsel) Gerilme (kPa)	Tekrarlı Deviator Gerilme (kPa)	Esnek Birim Deformasyon (%)	Esneklik Modülü (kPa)
1	1000	103,4	383,171	72,971	0,01618	450940
2	100	20,68	79,432	17,392	0,00741	234840
3	100	20,68	95,866	33,826	0,01055	320840
4	100	20,68	109,467	47,427	0,01664	285210
5	100	34,47	131,895	28,485	0,0102	279540
6	100	34,47	155,941	52,531	0,01542	340680
7	100	34,47	174,377	70,967	0,01643	437480
8	100	68,95	254,438	47,588	0,01075	465080
9	100	68,95	303,471	96,621	0,01922	546000
10	100	68,95	366,7	159,85	0,03419	474420
11	100	103,4	360,472	50,272	0,00791	636010
12	100	103,4	382,055	71,855	0,01319	545470
13	100	103,4	473,47	163,27	0,03307	493780
14	100	137,9	482,827	69,127	0,00801	897980
15	100	137,9	513,97	100,27	0,01856	540560
16	100	137,9	632,39	218,69	0,03743	591960
Denklem (4.2) ile hesap			55,75			399266

Üretime ait model denklemi

$$MR = 98927 * B^{0,347}$$

(B.1.1.)

Çizelge B.2. B2,2İK50Ç1-K numunesi için esneklik modülü çizelgesi (her 100 döngünün son 5 değeri)

B2,2İK50Ç1-K						
Sekans	Tekrarlı Yük Sayısı	Çevre Basıncı (kPa)	Son 5 Toplam (Hacimsel) Gerilme (kPa)	Tekrarlı Deviator Gerilme (kPa)	Esnek Birim Deformasyon (%)	Esneklik Modülü (kPa)
1	1000	103	382,4	72,198	0,011209	651030
2	100	20,7	78,38	16,335	0,003043	540940
3	100	20,7	95,15	33,109	0,006087	549970
4	100	20,7	111,7	49,65	0,012579	394770
5	100	34,5	131,1	27,711	0,006391	435470

Çizelge B.2. B2,2İK70Ç1-K numunesi için esneklik modülü çizelgesi (her 100 döngünün son 5 değeri) (Devam)

Sekans	Tekrarlı Yük Sayısı	Çevre Basıncı (kPa)	Son 5 Toplam (Hacimsel) Gerilme (kPa)	Tekrarlı Deviator Gerilme (kPa)	Esnek Birim Deformasyon (%)	Esneklik Modülü (kPa)
6	100	34,5	153,6	50,235	0,013289	387100
7	100	34,5	176,3	72,906	0,018006	414600
8	100	69	258,2	51,377	0,007355	713640
9	100	69	301,4	94,598	0,015521	617840
10	100	69	368,2	161,31	0,032157	502550
11	100	103	361,3	51,082	0,009586	556310
12	100	103	378,3	68,109	0,010651	654230
13	100	103	468,1	157,87	0,025259	636580
14	100	138	481	67,301	0,008825	768340
15	100	138	506,2	92,536	0,011361	856600
16	100	138	625	211,31	0,02886	738670
Denklem (4.2) ile hesap			55,75			539735

Üretime ait model denklemi

$$MR = 298870 * B^{0,147}$$

(B.2.1.)

Çizelge B.3. B1,9İİ70Ç1-K numunesi için esneklik modülü çizelgesi (her 100 döngünün son 5 değeri)

B1,9İİ70Ç1-K						
Sekans	Tekrarlı Yük Sayısı	Çevre Basıncı (kPa)	Son 5 Bulk Stress (kPa)	Tekrarlı Deviator Gerilme (kPa)	Esnek Birim Deformasyon (%)	Esneklik Modülü (kPa)
1	1000	103,4	377,721	67,521	0,019477	358540
2	100	20,68	78,894	16,854	0,034642	48655
3	100	20,68	94,726	32,686	0,063147	51735
4	100	20,68	111,155	49,115	0,08303	59151
5	100	34,47	131,571	28,161	0,034135	82531
6	100	34,47	156,951	53,541	0,055945	95752
7	100	34,47	176,32	72,91	0,061118	122960
8	100	68,95	256,946	50,096	0,0211	237600
9	100	68,95	305,76	98,91	0,037584	263630
10	100	68,95	370,45	163,6	0,054981	297590
11	100	103,4	360,461	50,261	0,010804	466090

Çizelge B.3. B1,9İ70Ç1-K numunesi için esneklik modülü çizelgesi (her 100 döngünün son 5 değeri) (Devam)

Sekans	Tekrarlı Yük Sayısı	Çevre Basıncı (kPa)	Son 5 Bulk Stress (kPa)	Tekrarlı Deviator Gerilme (kPa)	Esnek Birim Deformasyon (%)	Esneklik Modülü (kPa)
12	100	103,4	378,789	68,589	0,016078	426760
13	100	103,4	470,21	160,01	0,036367	440230
14	100	137,9	482,31	68,61	0,010499	676420
15	100	137,9	514,5	100,8	0,017397	580750
16	100	137,9	634,75	221,05	0,033171	674780
Denklem (4.2) ile hesap			55,75			150538

Üretime ait model denklemi

$$M_R = 2393,4 * B^{1,03}$$

(B.3.1.)

Çizelge B.4. B1,9İK160Ç1-K numunesi için esneklik modülü çizelgesi (her 100 döngünün son 5 değeri)

B1,9İK160Ç1-K						
Sekans	Tekrarlı Yük Sayısı	Çevre Basıncı (kPa)	Son 5 Bulk Stress (kPa)	Tekrarlı Deviator Gerilme (kPa)	Esnek Birim Deformasyon (%)	Esneklik Modülü (kPa)
1	1000	103,4	381,055	70,855	0,015216	468690
2	100	20,68	79,855	17,815	0,0050213	355200
3	100	20,68	95,688	33,648	0,015064	223340
4	100	20,68	109,856	47,816	0,019781	241790
5	100	34,47	131,856	28,446	0,010753	264710
6	100	34,47	154,637	51,227	0,01897	270090
7	100	34,47	174,275	70,865	0,023332	304130
8	100	68,95	257,1	50,25	0,012325	422560
9	100	68,95	308,76	101,91	0,026983	379250
10	100	68,95	368	161,15	0,049098	328170
11	100	103,4	361,563	51,363	0,010753	479420
12	100	103,4	382,709	72,509	0,015825	459520
13	100	103,4	476,18	165,98	0,046004	360830
14	100	137,9	488,122	74,422	0,016991	441580
15	100	137,9	516,1	102,4	0,024955	410970
16	100	137,9	637,17	223,47	0,040221	555700
Denklem (4.2) ile hesap			55,75			334901

Üretime ait model denklemi

$$M_R = 159170 * B^{0,185}$$

(B.4.1.)

Çizelge B.5. B1,9KİS70Ç1-K numunesi için esneklik modülü çizelgesi (her 100 döngünün son 5 değeri)

B1,9KİS70Ç1-K						
Sekans	Tekrarlı Yük Sayısı	Çevre Basıncı (kPa)	Son 5 Bulk Stress (kPa)	Tekrarlı Deviator Gerilme (kPa)	Esnek Birim Deformasyon (%)	Esneklik Modülü (kPa)
1	1000	103,4	379,893	69,693	0,017549	396860
2	100	20,68	78,749	16,709	0,02744	61277
3	100	20,68	94,166	32,126	0,042352	76924
4	100	20,68	108,458	46,418	0,043823	110120
5	100	34,47	130,96	27,55	0,02039	137090
6	100	34,47	153,535	50,125	0,032157	158490
7	100	34,47	174,159	70,749	0,044533	165260
8	100	68,95	255,735	48,885	0,016332	357240
9	100	68,95	299,723	92,873	0,027592	338790
10	100	68,95	358,71	151,86	0,040932	390240
11	100	103,4	360,748	50,548	0,013187	393230
12	100	103,4	381,302	71,102	0,013745	560650
13	100	103,4	467,28	157,08	0,031802	507750
14	100	137,9	475,838	62,138	0,0073038	1037500
15	100	137,9	505,268	91,568	0,01055	95710
16	100	137,9	630,85	217,15	0,030077	728290
Denklem (4.2) ile hesap			55,75			209411

Üretime ait model denklemi

$$MR = 4341,3 \cdot B^{0,964}$$

(B.5.1.)

Çizelge B.6. B2,2İN70Ç1-K numunesi için esneklik modülü çizelgesi (her 100 döngünün son 5 değeri)

B2,2İN70Ç1-K						
Sekans	Tekrarlı Yük Sayısı	Çevre Basıncı (kPa)	Son 5 Bulk Stress (kPa)	Tekrarlı Deviator Gerilme (kPa)	Esnek Birim Deformasyon (%)	Esneklik Modülü (kPa)
1	1000	103,4	378,605	68,405	0,01689	405930
2	100	20,68	79,137	17,097	0,02739	62423
3	100	20,68	95,483	33,443	0,03895	85856
4	100	20,68	109,55	47,51	0,05097	94207
5	100	34,47	131,362	27,952	0,02374	117930
6	100	34,47	155,576	52,166	0,04058	128600
7	100	34,47	177,147	73,737	0,03987	185170
8	100	68,95	257,919	51,069	0,01309	390310



Çizelge B.6. B2,2İN70Ç1-K numunesi için esneklik modülü çizelgesi (her 100 döngünün son 5 değeri) (Devam)

Sekans	Tekrarlı Yük Sayısı	Çevre Basıncı (kPa)	Son 5 Bulk Stress (kPa)	Tekrarlı Deviator Gerilme (kPa)	Esnek Birim Deformasyon (%)	Esneklik Modülü (kPa)
9	100	68,95	304,38	97,53	0,02455	404000
10	100	68,95	366,33	159,48	0,04037	405990
11	100	103,4	359,543	49,343	0,01197	416860
12	100	103,4	380,794	70,594	0,01319	536010
13	100	103,4	471,23	161,03	0,03165	508880
14	100	137,9	483,571	69,871	0,01344	520050
15	100	137,9	512,51	98,81	0,01699	586580
16	100	137,9	636,75	223,05	0,03434	649770
Denklem (4.2) ile hesap			55,75			197908

Üretime ait model denklemi

$$MR = 4685 \cdot B^{0,931}$$

(B.6.1.)

Çizelge B.7. B1,9W70Ç1-K numunesi için esneklik modülü çizelgesi (her 100 döngünün son 5 değeri)

B1,9W70Ç1-K						
Sekans	Tekrarlı Yük Sayısı	Çevre Basıncı (kPa)	Son 5 Bulk Stress (kPa)	Tekrarlı Deviator Gerilme (kPa)	Esnek Birim Deformasyon (%)	Esneklik Modülü (kPa)
1	1000	103,4	378,884	68,684	0,013035	543200
2	100	20,68	78,437	16,397	0,0085718	193980
3	100	20,68	94,059	32,019	0,015216	214280
4	100	20,68	107,478	45,438	0,0176	281930
5	100	34,47	130,828	27,418	0,0091804	302160
6	100	34,47	153,11	49,7	0,011108	502710
7	100	34,47	167,596	64,186	0,0089776	808180
8	100	68,95	257,435	50,585	0,0055793	975200
9	100	68,95	297,153	90,303	0,018817	516300
10	100	68,95	362,69	155,84	0,027693	573850
11	100	103,4	358,177	47,977	0,0073545	679600
12	100	103,4	379,964	69,764	0,0097384	799320
13	100	103,4	466,7	156,5	0,029925	531420
14	100	137,9	482,918	69,218	0,010448	704030
15	100	137,9	509,211	95,511	0,013542	731740
16	100	137,9	630	216,3	0,032968	663620
Denklem (4.2) ile hesap			55,75			440875

Üretime ait model denklemi

$$MR = 70191 * B^{0,457}$$

(B.7.1.)

Çizelge B.8. B1,9İK100Ç1-K numunesi için esneklik modülü çizelgesi (her 100 döngünün son 5 değeri)

B1,9İK100Ç1-K						
Sekans	Tekrarlı Yük Sayısı	Çevre Basıncı (kPa)	Son 5 Bulk Stress (kPa)	Tekrarlı Deviator Gerilme (kPa)	Esnek Birim Deformasyon (%)	Esneklik Modülü (kPa)
1	1000	103,4	381,375	71,175	0,013187	562150
2	100	20,68	79,663	17,623	0,0096876	181900
3	100	20,68	95,396	33,356	0,016383	207820
4	100	20,68	111,759	49,719	0,025563	194500
5	100	34,47	130,983	27,573	0,013999	197450
6	100	34,47	155,286	51,876	0,013897	400910
7	100	34,47	175,778	72,368	0,011311	688470
8	100	68,95	258,205	51,355	0,0051735	1000400
9	100	68,95	303,075	96,225	0,021252	452920
10	100	68,95	369,65	162,8	0,034997	466430
11	100	103,4	360,537	50,337	0,0068473	763440
12	100	103,4	379,683	69,483	0,011767	595270
13	100	103,4	469,96	159,76	0,025208	638520
14	100	137,9	485,621	71,921	0,0048692	1477700
15	100	137,9	509,519	95,819	0,014912	647750
16	100	137,9	633,85	220,15	0,033729	652810
Denklem (4.2) ile hesap			55,75			403582

Üretime ait model denklemi

$$MR = 46956 * B^{0,535}$$

(B.8.1.)

Çizelge B.9. B2,5İK70K1UK1-K numunesi için esneklik modülü çizelgesi (her 100 döngünün son 5 değeri)

B2,5İK70K1UK1-K						
Sekans	Tekrarlı Yük Sayısı	Çevre Basıncı (kPa)	Son 5 Bulk Stress (kPa)	Tekrarlı Deviator Gerilme (kPa)	Esnek Birim Deformasyon (%)	Esneklik Modülü (kPa)
1	1000	103,4	371,82	61,616	0,0141	447860
2	100	20,68	78,398	16,358	0,0141	117380
3	100	20,68	93,913	31,873	0,022	149640

Çizelge B.9. B2,5İK70K1UK1-K numunesi için esneklik modülü çizelgesi (her 100 döngünün son 5 değeri) (Devam)

Sekans	Tekrarlı Yük Sayısı	Çevre Basıncı (kPa)	Son 5 Bulk Stress (kPa)	Tekrarlı Deviator Gerilme (kPa)	Esnek Birim Deformasyon (%)	Esneklik Modülü (kPa)
4	100	20,68	107,54	45,502	0,0215	228820
5	100	34,47	130,3	26,892	0,1004	276990
6	100	34,47	153	49,594	0,0167	306100
7	100	34,47	170,91	67,499	0,0167	485510
8	100	68,95	255,29	48,435	0,0072	754330
9	100	68,95	298,46	91,612	0,021	470800
10	100	68,95	363,29	156,44	0,0331	507320
11	100	103,4	358,39	48,186	0,0089	588700
12	100	103,4	376,1	65,9	0,0084	840050
13	100	103,4	467,53	157,33	0,0264	624940
14	100	137,9	478,12	64,416	0,0107	651020
15	100	137,9	505,21	91,51	0,0121	850990
16	100	137,9	627,78	214,08	0,0316	687950
Denklem (4.2) ile hesap			55,75			351439

Üretime ait model denklemi

$$MR = 25137 * B^{0,656}$$

(B.9.1.)

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Kemal Muhammet ERTEN  
Doğum Yeri ve Yılı : Antalya, 1984  
Medeni Hali : Evli  
Yabancı Dili : İngilizce  
E-posta : ertenkemal@windowlive.com



### Eğitim Durumu

Lise : Antalya Çağlayan Lisesi, 2001  
Lisans : SDÜ, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği  
Yüksek Lisans : SDÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği

### Mesleki Deneyim

Astepe Yapı Denetim Ltd. Şti.	2006-2007
MTG Mühendislik ve Ticaret Ltd.Şti.	2007-2007
OMS Mühendislik ve Mimarlık Ticaret Ltd.Şti.	2007-2011
Karayolları 15. Bölge Müdürlüğü	2011-2015
Afyon Kocatepe Üniversitesi Dazkırı MYO	2015-..... (halen)

### Yayımlar

Erten, K.M., Terzi, S., Akbulut, H., (2017). Asphalt Geri Dönüşümü Sürdürülebilirlik İlişkisi. 7. Ulusal Asphalt Sempozyumu ve Sergisi, 29-30 Kasım, Ankara, Türkiye.

Akbulut, H., Gürer, C., Terzi, S., Erten, K.M., (2018). Variables Which Affect The Bitumen Characteristics of the Foamed Asphalt Production. 3rd International Conference on Engineering Technology and Applied Sciences, 17-21 July, Skopje, Macedonia.

Terzi, S., Akbulut, H., Erten, K.M., Komut, M., Sağlık, A., Nedim, S.T., Çalışkan, K., (2018). Sürdürülebilir Ulaştırma için Köpük Asphalt Üretimi, 28-29 Kasım, Ankara, Türkiye.