

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**TAŞ MASTİK ASFALT KARIŞIMLARDA KATKI MADDESİ OLARAK DENİZ KABUĞUNUN
GRADASYON VE KATILMAYÖNTEMİ AÇISINDAN ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Kübra ÇEVİRİM

**ŞUBAT 2021
TRABZON**



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**TAŞ MASTİK ASFALT KARIŞIMLARDA KATKI MADDESİ OLARAK DENİZ
KABUĞUNUN GRADASYON VE KATILMA YÖNTEMİ AÇISINDAN ARAŞTIRILMASI**

Kübra ÇEVİRİM

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"İNŞAAT YÜKSEK MÜHENDİSİ"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 13 / 01 / 2021

Tezin Savunma Tarihi : 17 / 02 / 2021

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Erol İSKENDER

Trabzon 2021

ÖNSÖZ

Bu çalışma, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak hazırlamıştır.

Çalışma konumu öneren ve çalışmalarım boyunca yardımlarını benden esirgemeyen danışman hocam Doç. Dr. Erol İSKENDER'e teşekkürlerimi borç bilirim.

Çalışmam için laboratuvarlarını bana açan kıymetli hocalarım Doç. Dr. Tuba KÜTÜK ve Doç. Dr. Sezai KÜTÜK'e teşekkür ederim.

Akademik hayatımda desteğini benden esirgemeyen kıymetli hocam Prof. Dr. Şeref ORUÇ'a teşekkür eder, son olarak tüm eğitim hayatım boyunca bana daima destek olan anneme teşekkürlerimi sunarım.

Kübra ÇEVRİM
Batman 2021

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Taş Mastik Asfalt Karışımlarda Katkı Maddesi Olarak Deniz Kabuğunun Gradasyon ve Katılma Yöntemi Açısından Araştırılması” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Doç. Dr. Erol İSKENDER’in sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 17/02/2021

Kübra ÇEVİRİM

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET.....	VII
SUMMARY.....	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XII
SEMBOLLER DİZİNİ.....	XIV
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Çalışmanın Amacı.....	2
1.3. Konunun Özgeçmişi.....	2
1.4. Katkı Maddelerinin Asfalt Karışımlara Katılma Yöntemleri.....	8
1.4.1. Katkının Agregaya Katılması.....	8
1.4.2. Bitüm Modifikasyonu.....	9
1.5. Karayolu Yapısı.....	11
1.5.1. Rijit Üstyapı.....	12
1.5.2. Esnek Üstyapı.....	12
1.6. Yol Üstyapısında Oluşan Bozulmalar.....	12
1.6.1. Şekil Değiştirmeler.....	13
1.6.1.1. Tekerlek İzinde Oturma.....	13
1.6.1.2. Yerel Oturma.....	14
1.6.1.3. Ondülasyon.....	14
1.6.2. Çatlaklar.....	15
1.6.2.1. Timsah Sırtı Çatlaklar (Yorulma Çatlaması).....	15
1.6.2.2. Kenar Çatlakları.....	16
1.6.2.3. Enine Çatlaklar.....	17
1.6.2.4. Yansıma Çatlakları.....	18

1.6.3.	Ayrışma, Soyulma ve Sökülme.....	18
1.6.4.	Kusma ve Terleme.....	19
1.7.	Taş Mastik Asfalt Karışımlar.....	19
1.7.1.	Taş Mastik Asfalt Karışımların Tarihçesi.....	20
1.7.2.	Taş Mastik Asfalt Karışımların Özellikleri.....	21
1.7.3.	Taş Mastik Asfalt Karışımların Kullanım Alanları.....	23
1.7.4.	Taş Mastik Asfalt Karışımların Yapım Şartları.....	24
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	28
2.1.	Giriş.....	28
2.2.	Çalışmada Kullanılan Malzemeler.....	28
2.2.1.	Bitümlü Bağlayıcı ve Özellikleri.....	28
2.2.2.	Agrega Özellikleri.....	28
2.2.3.	Deniz Kabuklarının Özellikleri.....	31
2.2.4.	Selülozik Elyaf ve Özellikleri.....	36
2.3.	Karışım Tasarımları.....	36
2.4.	Metot.....	37
2.4.1.	Modifiye Lottman (AASHTO T 283) Testi.....	38
2.4.2.	Dolaylı Çekme Mukavemeti Testi (ITST).....	42
2.4.3.	Marshall Stabilite Testi.....	45
2.4.4.	Hamburg Tekerlek İzi Testi (HWTT).....	47
2.4.5.	Tekrarlı Yük Sünme Testi (RCT).....	49
3.	BULGULAR VE İRDELEME.....	52
3.1.	Modifiye Lottman (AASHTO T 283) Testine Ait Bulgular ve İrdeleme..	52
3.2.	Dolaylı Çekme Mukavemeti Testine Ait Bulgular ve İrdeleme.....	59
3.3.	Marshall Stabilite Testine Ait Bulgular ve İrdeleme.....	62
3.4.	Hamburg Tekerlek İzi Testine (HWTT) Ait Bulgular ve İrdeleme.....	68
3.5.	Tekrarlı Yük Sünme Testine (RCT) Ait Bulgular ve İrdeleme.....	73
4.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	79
5.	KAYNAKLAR.....	83
ÖZGEÇMİŞ		

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

TAŞ MASTİK ASFALT KARIŞIMLARDA KATKI MADDESİ OLARAK DENİZ KABUĞUNUN GRADASYON VE KATILMA YÖNTEMİ AÇISINDAN ARAŞTIRILMASI

Kübra ÇEVİRİM

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Erol İSKENDER
2021, 87 Sayfa

Bu tez çalışmasında, atık deniz kabuğu agregaların taş mastik asfalt karışımlarda bazalt agregası yerine kullanılabilirliği araştırılmıştır. Atık olarak elde edilen deniz kabukları kırılarak doğal bazalt agregası yerine aynı gradasyonla orantılı olarak %5 oranında ilave edilmiştir. Deniz kabuğu agregasının maksimum boyutu 0.425 mm, 0.180 mm ve 0.075 mm olarak değiştirilerek farklı seçenekler oluşturulmuştur. Ayrıca deniz kabuğu filleri bazalt agregasına kuru yöntem, nemli yöntem ve hamur yöntemi ile eklenerek katılma yöntemlerinin etkisi araştırılmıştır. Taş mastik asfalt karışımlar Marshall yöntemine göre tasarlanmıştır. Karışımlara Modifiye Lottman, dolaylı çekme mukavemeti, Marshall stabilite, Hamburg tekerlek izi ve tekrarlı yük sünme testleri yapılmıştır. Deniz kabuğu agregası kullanımının taş mastik asfalt karışımların stabilitesini, düşük sıcaklıkta çatlama direncini, su hasarı direncini ve deformasyon direncini artırdığı görülmüştür. Deniz kabuğu agrega boyutunun küçülmesi ile karışımın mekanik özelliklerinde iyileşmenin arttığı, en iyi özelliklerin filler boyutunda eklenme ile sağlandığı anlaşılmıştır. Filler katılma yöntemleri açısından değerlendirildiğinde ise nemli agrega yöntemi, hamur yöntemi ve kuru agrega yöntemine göre daha iyi sonuçlar vermiştir.

Anahtar Kelimeler: Taş mastik asfalt, Deniz kabuğu, Atık yönetimi, Modifiye Lottman, Dolaylı çekme mukavemeti, Marshall stabilitesi, Hamburg tekerlek izi, Tekrarlı yük sünme testi, Su hasarı.

Master Thesis

SUMMARY

INVESTIGATION OF SEASHELLS AS ADDITIVE IN STONE MASTIC ASPHALT MIXTURES IN TERMS OF GRADATION AND ADDING METHOD

Kübra ÇEVİRİM

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Erol İSKENDER
2021, 87 Pages

In this thesis study, the usability of waste seashell aggregates instead of basalt aggregate in stone mastic asphalt mixtures was investigated. The seashells obtained as waste were crushed and added by 5% in proportion to the same gradation instead of natural basalt aggregate. Different options were created by changing the maximum size of the seashell aggregate as 0.425 mm, 0.180 mm and 0.075 mm. In addition, the effects of the methods of adding seashell fillers to basalt aggregate by dry aggregate method, moist aggregate method and slurry method were investigated. Stone mastic asphalt mixtures are designed according to the Marshall method. Modified Lottman, indirect tensile strength, Marshall stability, Hamburg wheel track and repeated creep tests were performed on the mixtures. The use of seashell aggregates has been found to increase the stability, low temperature cracking resistance, water damage resistance and deformation resistance of stone mastic asphalt mixtures. It was found that with the reduction of the seashell aggregate size, the improvement in the mechanical properties of the mixture increased, and the best properties were achieved by adding fillers in size. When evaluated in terms of filler addition methods, the moist aggregate method gives better results than the slurry method and dry aggregate method.

Key Words: Stone mastic asphalt, Seashell, Waste management, Modified Lottman test, Indirect tensile strength test, Marshall stability test, Hamburg wheel tracking test, Repeated creep test, Water damage

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.	Deniz kabuğu agregası ilaveli bitümlü sıcak karışımların statik sünme eğrileri.....	6
Şekil 2.	İnce agrega olarak deniz kabuğu kullanılan bitümlü sıcak karışımların statik sünme eğrileri.....	7
Şekil 3.	Tekerlek izinde oturma.....	14
Şekil 4.	Ondülasyon.....	15
Şekil 5.	Timsah sırtı çatlak.....	16
Şekil 6.	Kenar çatlağı.....	17
Şekil 7.	Enine çatlaklar.....	17
Şekil 8.	Yansıma çatlağı.....	18
Şekil 9.	Asfalt kaplamanın kusması.....	19
Şekil 10.	TMA (sol), BSK (sağ) yüzey görüntüleri.....	20
Şekil 11.	Gradasyona göre hazırlanıp sınıflandırılan agregalar.....	30
Şekil 12.	TMA aşınma TİP-1 gradasyon eğrisi.....	31
Şekil 13.	Deniz kabuklarının yıkanmadan önce (a) ve yıkanıp kurutulduktan (b) sonraki görüntüsü	33
Şekil 14.	Deniz kabuklarının mini konkasörde kırılması	33
Şekil 15.	Yüksek enerjili bilyalı öğütücü.....	34
Şekil 16.	Deniz kabuğu filleri.....	34
Şekil 17.	(a) hamur kıvamındaki agrega harcı, (b) ıslak agrega karışımı.....	35
Şekil 18.	Deneysel akış diyagramı.....	38
Şekil 19.	Vakumlu piknometre.....	39
Şekil 20.	Donma-çözünme döngüsü uygulanmış numuneler.....	40
Şekil 21.	Dolaylı çekme mukavemeti testi, yükleme anı (solda) deformasyonun oluşması (sağda).....	43
Şekil 22.	Dolaylı çekme mukavemeti test cihazı.....	44
Şekil 23.	Marshall stabilite ve akma deney aleti.....	45
Şekil 24.	Şematik Hamburg tekerlek izi test eğrisi.....	47

Şekil 25.	Hamburg tekerlek izi test cihazı.....	48
Şekil 26.	Asfalt betonunun tekrarlı yük altında sünme davranışı.....	49
Şekil 27.	Tekrarlı yük sünme deney düzeneği.....	50
Şekil 28.	Farklı boyutlarda deniz kabuğu agregası içeren koşulsuz örneklerin dolaylı çekme mukavemeti değerleri (kPa).....	52
Şekil 29.	Deniz kabuğu filleri ile farklı katılma yöntemlerine göre hazırlanan koşulsuz örneklerin dolaylı çekme mukavemeti değerleri (kPa).....	53
Şekil 30.	Farklı boyutlarda deniz kabuğu agregası içeren koşullu örneklerin dolaylı çekme mukavemeti değerleri (kPa).....	53
Şekil 31.	Deniz kabuğu filleri ile farklı katılma yöntemlerine göre hazırlanan koşullu örneklerin dolaylı çekme mukavemeti değerleri (kPa).....	54
Şekil 32.	Farklı boyutlarda deniz kabuğu agregası içeren koşulsuz örneklerin ortalama çekme mukavemeti değerleri (kPa).....	54
Şekil 33.	Deniz kabuğu filleri ile farklı katılma yöntemlerine göre hazırlanan koşulsuz örneklerin ortalama çekme mukavemeti değerleri (kPa).....	55
Şekil 34.	Farklı boyutlarda deniz kabuğu agregası içeren koşullu örneklerin ortalama çekme mukavemeti değerleri (kPa).....	55
Şekil 35.	Deniz kabuğu filleri ile farklı katılma yöntemlerine göre hazırlanan koşullu örneklerin ortalama çekme mukavemeti değerleri (kPa).....	56
Şekil 36.	Farklı boyutlarda deniz kabuğu agregası içeren karışımların ITSIR değerleri.....	58
Şekil 37.	Deniz kabuğu filleri ile farklı katılma yöntemlerine göre hazırlanan karışımların ITSIR değerleri.....	58
Şekil 38.	Farklı boyutlarda deniz kabuğu agregası içeren karışımların dolaylı çekme mukavemeti değerleri (kPa).....	60
Şekil 39.	Deniz kabuğu filleri ile farklı katılma yöntemlerine göre hazırlanan karışımların dolaylı çekme mukavemeti değerleri (kPa).....	60
Şekil 40.	Farklı boyutlarda deniz kabuğu agregası içeren karışımların ortalama dolaylı çekme mukavemeti değerleri (kPa).....	61
Şekil 41.	Deniz kabuğu filleri ile farklı katılma yöntemlerine göre hazırlanan karışımların ortalama dolaylı çekme mukavemeti değerleri (kPa).....	61
Şekil 42.	Farklı boyutlarda deniz kabuğu agregası içeren karışımların düzeltilmiş stabilite değerleri (kN).....	63
Şekil 43.	Deniz kabuğu filleri ile farklı katılma yöntemlerine göre hazırlanan karışımların düzeltilmiş stabilite değerleri (kN).....	63
Şekil 44.	Farklı boyutlarda deniz kabuğu agregası içeren karışımların ortalama düzeltilmiş stabilite değerleri (kN).....	64
Şekil 45.	Deniz kabuğu filleri ile farklı katılma yöntemlerine göre hazırlanan karışımların ortalama düzeltilmiş stabilite değerleri (kN).....	64

Şekil 46.	Farklı boyutlarda deniz kabuğu agregası içeren karışımların akma değerleri (mm).....	65
Şekil 47.	Deniz kabuğu filleri ile farklı katılma yöntemlerine göre hazırlanan karışımların akma değerleri (mm).....	65
Şekil 48.	Farklı boyutlarda deniz kabuğu agregası içeren karışımların ortalama akma değerleri (mm).....	66
Şekil 49.	Deniz kabuğu filleri ile farklı katılma yöntemlerine göre hazırlanan karışımların ortalama akma değerleri (mm).....	66
Şekil 50.	Farklı boyutlarda deniz kabuğu agregası içeren karışımların Marshall oranları.....	67
Şekil 51.	Deniz kabuğu filleri ile farklı katılma yöntemlerine göre hazırlanan karışımların Marshall oranları.....	67
Şekil 52.	Bazalt (Kontrol) ve Bazalt/0.425DK karışım gruplarına ait Hamburg tekerlek izi eğrileri.....	68
Şekil 53.	Bazalt/0.180DK ve Bazalt/0.075DK karışım gruplarına ait Hamburg tekerlek izi eğrileri.....	69
Şekil 54.	Bazalt/0.075DK (Nemli agregası) ve Bazalt/0.075DK (Hamur yöntemi) karışım gruplarına ait Hamburg tekerlek izi eğrileri.....	69
Şekil 55.	Farklı boyutlarda deniz kabuğu agregası içeren karışımların Hamburg tekerlek izi eğrileri.....	71
Şekil 56.	Deniz kabuğu filleri ile farklı katılma yöntemlerine göre hazırlanan karışımların Hamburg tekerlek izi eğrileri.....	71
Şekil 57.	Karışımların Hamburg tekerlek izi eğrileri.....	72
Şekil 58.	Bazalt (Kontrol) ve Bazalt/0.425DK karışım gruplarına ait tekrarlı yük sünme eğrileri.....	74
Şekil 59.	Bazalt/0.180DK ve Bazalt/0.075DK karışım gruplarına ait tekrarlı yük sünme eğrileri.....	74
Şekil 60.	Bazalt/0.075DK (Nemli agregası) ve Bazalt/0.075DK (Hamur yöntemi) karışım gruplarına ait tekrarlı yük sünme eğrileri.....	75
Şekil 61.	Farklı boyutlarda deniz kabuğu agregası içeren karışımların tekrarlı yük sünme eğrileri.....	76
Şekil 62.	Deniz kabuğu filleri ile farklı katılma yöntemlerine göre hazırlanan karışımların tekrarlı yük sünme eğrileri.....	77
Şekil 63.	Karışımların tekrarlı yük sünme eğrileri.....	78

TABLolar DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1.	Kullanılan deniz kabuğu miktarı ve boyutları	6
Tablo 2.	Bitüm modifikasyonunda kullanılan katkı maddeleri.....	11
Tablo 3.	Yıllara göre farklı asfalt kullanım miktarları.....	21
Tablo 4.	TMA aşınma gradasyonu ve tolerans limitleri.....	24
Tablo 5.	TMA binder gradasyonu ve tolerans limitleri.....	25
Tablo 6.	TMA tasarım kriterleri.....	26
Tablo 7.	Sıkıştırılmış TMA tabakasının özellikleri	27
Tablo 8.	Bitümlü bağlayıcı özellikleri (AC 50-70).....	28
Tablo 9.	Bazalt agregası fillerin fiziksel özellikleri	29
Tablo 10.	Bazalt agregası, ince agrega fiziksel özellikleri.....	29
Tablo 11.	Bazalt agregası, kaba agrega fiziksel özellikleri.....	29
Tablo 12.	Bazalt agregasının kimyasal özellikleri.....	30
Tablo 13.	TMA aşınma TİP-1 agrega gradasyonu ve şartname limitleri.....	31
Tablo 14.	Yıllara göre avlanan kabuklu deniz canlısı miktarı (ton).....	32
Tablo 15.	1150 gr agrega içerisinde kullanılan deniz kabuğu agregası miktarı.....	35
Tablo 16.	Deniz kabuklarının kimyasal içeriği.....	35
Tablo 17.	Selülozik elyafın özellikleri.....	36
Tablo 18.	TMA Aşınma TİP-1 A tasarım sonuçları.....	37
Tablo 19.	Koşullu örneklerin dolaylı çekme mukavemeti değerleri (kPa).....	41
Tablo 20.	Koşulsuz örneklerin dolaylı çekme mukavemeti değerleri (kPa).....	42
Tablo 21.	Koşullu ve koşulsuz örneklerin ortalama dolaylı çekme mukavemeti değerleri ve dolaylı çekme mukavemeti oranları (ITSR).....	42
Tablo 22.	Karışımların dolaylı çekme mukavemeti değerleri (kPa).....	44
Tablo 23.	Karışımların düzeltilmiş stabilite (kN) ve akma (mm) değerleri.....	46
Tablo 24.	Hamburg tekerlek izi deneyinde uygulanan parametreler	48
Tablo 25.	Tekrarlı yük sünme deneyinde uygulanan parametreler	50
Tablo 26.	Karışımların ortalama deformasyon değerleri.....	51

Tablo 27. Koşullu ve koşulsuz örneklerin ortalama dolaylı çekme mukavemeti değerleri (kPa) ve dolaylı çekme mukavemeti oranları (ITSR).....	57
Tablo 28. Karışımların sünme eğimleri (mm/geçiş).....	71
Tablo 29. Karışımların soyulma büküm noktaları (geçiş).....	71



SEMBOLLER DİZİNİ

AASHTO	Amerika Devlet Karayolu ve Ulaştırma İdareleri Birliği
ASTM	Amerika Test ve Malzeme Kurumu
BSK	Bitümlü sıcak karışım
EAPA	Avrupa Asfalt Kaplama Derneği
EPDM	Etilen-propilen-dien-terpolimer
HWTT	Hamburg tekerlek izi testi
ITS	Dolaylı çekme mukavemeti
ITSR	Dolaylı çekme mukavemeti oranı
KGM	Karayolları Genel Müdürlüğü
LCPC	Fransız tekerlek izi deneyi
MQ	Marshall oranı
RCT	Tekrarlı yük sünme testi
SEM	Taramalı elektron mikroskopu
SBS	Stiren-bütadien-stiren
SEBS	Stiren-etilen-bütilen-stiren
TMA	Taş mastik asfalt
VMA	Agregalar arası boşluk

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Nüfus ve tüketim artışı nedeniyle doğal kaynakların giderek tükenmeye başlaması, kimyasal ve organik atıkların ise giderek çoğalması önemli bir sorun teşkil etmektedir. Atıkların fazla oluşu, çevre kirliliği ve depolama alanları yetersizliği başta olmak üzere çeşitli sorunlara neden olmaktadır. Bu sorunların etkilerini hafifletmek için atıkların yönetimi ve geri dönüşümü büyük önem kazanmıştır.

Asfalt kaplamaların ana bileşenlerini oluşturan bitüm ve agrega da kısıtlı rezervlere sahiptir. Hem bu kaynakları kısa vadede tüketmemek hem de daha dayanıklı ve uzun ömürlü asfalt kaplamalar üretebilmek için atıklardan elde edilen çeşitli katkı maddeleri doğrudan veya dönüştürülerek asfalt karışımlarda kullanılabilir. Katkı maddeleri, asfalt kaplamaların deformasyon, su hasarı, çatlama ve yorulma dirençlerini artırarak yolun hizmet ömrünün daha uzun olmasına ve ekonomik kazanç sağlanabilmesine yardımcı olabilmektedir (Ahmed,1993).

Diğer yandan, karışım tipinin gradasyon bağlamında değiştirilmesi suretiyle de kaplama performansı iyileştirilebilmektedir. Taş mastik asfalt (TMA) daha yüksek oranda kaba agrega içeren kesikli gradasyona sahip bir karışımdır. Özellikle yüksek deformasyon direnci ile bilinmektedir.

Günümüzde taş mastik asfalt karışımların kullanım oranları küresel anlamda artış göstermektedir. Ülkemizde de son yıllarda kaplama tabakası olarak TMA kullanımında artış görülmektedir. TMA karışımlarda kaba agrega olarak bazalt agregası gibi yüksek kalitede agrega kullanılma zorunluğu bulunmaktadır. Kaliteli bazalt agrega kaynağı bulmada yaşanan zorluklar, bazalt agregasından filler elde etme sorunu, daha yüksek sıcaklıkta karıştırma ve serme gereksinimi gibi sebepler bu tip kaplamalarda maliyet artışına yol açmaktadır. Performanstan ödün vermeden ve hatta performansı artırarak maliyeti düşürmek için arayışlar sürmektedir. Doğal veya kimyasal katkı uygulamaları da bu çerçevede araştırmalara konu olmaktadır.

1.2. Çalışmanın Amacı

Bu çalışmanın amacı, atık deniz kabuklarının taş mastik asfalt karışımlarda filler ve ince agregası olarak kullanılabilirliğinin araştırılması ve katılma yönteminin etkisinin değerlendirilmesidir. Bu amaçla farklı boyutlarda kırılan deniz kabukları üç farklı ekleme yöntemi ile filler ve ince agregası olarak kullanılmıştır. TMA karışımlarına Marshall stabilite, Modifiye Lottman, dolaylı çekme mukavemeti, tekrarlı yük sünme ve Hamburg tekerlek izi deneyleri yapılmış, elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.

1.3. Konunun Özgeçmişi

Asfalt karışımlara çeşitli katkı maddeleri eklenerek, karışım özelliklerinin iyileştirilmesi uzun zamandır üzerinde çalışılan konulardan bir tanesidir. Taş mastik asfalt karışımlar da kullanılmaya başlandığından beri benzer çalışmalar bu karışım tipi için de yürütülmüştür. Bu çalışmaların bazıları aşağıda verilmiştir.

Taş mastik asfalt karışımlarında süzülme sorunu nedeniyle kullanılması zorunlu olan fiber (selülozik elyaf) yerine ülkemizde çokça rezervi bulunan ve yüksek gözenekliliğe sahip diatomit kullanılması düşünülmüştür. Diatomitli ve fiberli karışımların karşılaştırıldığı çalışmada diatomit oranının artmasının bitüm oranını artırdığı ve işlenebilirlik oranını düşürdüğü görülmüştür. Karışım içindeki optimum bitüm oranının artması istenilen bir şey değildir bu sebeple %3 diatomit katkılı TMA tasarımının en uygun olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca dolaylı çekme mukavemeti deneyi sonuçlarına göre, koşullu briketlerin koşulsuz briketlere oranları (çekme mukavemeti oranları, ITS_R) diatomitli karışımlar için 0.86, fiberli karışımlar için ise 0.89 olarak hesaplanmıştır. Bu oranlar, 0.80 eşik değerini aştığından, diatomit katkısının sudan kaynaklanan bozulmalara karşı direncinin kabul edilebilir seviyelerde olduğunu göstermektedir (Kaşak, 2007).

Çevreye en fazla zararı veren atıklardan birisi olan plastiklerle yapılan çalışmada, evsel atıklar (pet şişeler, naylon poşetler, paketleme ambalajları vb.) katkı maddesi olarak kullanılmıştır. Bu atıklar Hindistan'daki Cochin Üniversitesi'nin kampüsünden toplanmış, parçalanmış atıklar sıcak halde, agregası ile karıştırılarak karışıma eklenmiştir. Bu şekilde eriyik plastiğin agregası üzerini ince bir tabaka halinde kaplaması sağlanmıştır. Yapılan Marshall tasarımına göre optimum bitüm içeriği %6.63, kullanılabilecek en uygun plastik

miktarı ise %10 olarak hesaplanmıştır. Agregaya yüzeyinin plastik ile kaplanması agreganın fiziksel özelliklerini iyileştirmiş, özellikle suya olan hassasiyetini azaltmıştır. Bu durum taş mastik asfalt karışımının su hasarına karşı direncini artırdığı gibi karışımın daha dayanıklı olmasını sağlamıştır (Bindu ve Beena, 2010).

Bazı endüstriyel atıklardan elde edilen filler türlerinin taş mastik asfalt karışımlarda kullanılabilirliği araştırılmış ve yapılan çalışmada kireçtaşı tozu, seramik tozu, uçucu kül ve çelik cürufu filler olarak kullanılmıştır. Filler parçacıklarının mikro yapısını ve geometrik özelliklerini belirlemek amacıyla taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Analiz sonucu çelik cürufundan elde edilen fillerin köşeli bir şekle ve pürüzlü bir yüzeye sahip olduğu gözlemlenmiş ve bu durumda filler ile bitümlü bağlayıcı arasındaki adezyonun yüksek olacağı tespit edilmiştir. Her bir filler türü ile mastik harç hazırlanıp mastik harcın özellikleri araştırılmıştır. Buna göre en düşük penetrasyon değeri seramik tozu ile hazırlanan harçtan, en yüksek penetrasyon değeri ise uçucu kül ile hazırlanan harçtan elde edilmiştir. Ayrıca seramik tozu ile hazırlanan harç en yüksek rijitlik değerini vermiştir. Son olarak her bir filler türü taş mastik asfalt karışımlara %50 oranında katılmış ve karışımların özellikleri araştırılmıştır. Seramik tozu katkılı karışım en yüksek Marshall stabilite değerini ve en düşük akma değerini vermiştir. Sonuçta kullanılan bu endüstriyel katkıları taş mastik asfalt karışımların özelliklerini iyileştirirken optimum bitüm oranında azalmaya neden olmuş ve bu azalma da maliyetin düşmesini sağlamıştır (Muniandy vd., 2013).

Polimer modifiye bitüm katkısı olarak kullanılan stiren-bütadien-stiren (SBS) ile yapılan çalışmada SBS katkılı TMA karışımlarına dolaylı çekme mukavemeti, tekrarlı yük sünme, Fransız (LCPC) tekerlek izi deneyleri uygulanmış ve karışımların Marshall oranları (MQ) belirlenmiştir. SBS katkılı karışımların MQ değeri daha yüksek çıkmış ve bu da karışımların plastik deformasyonlara karşı daha dayanıklı olduğunu göstermiştir. Yapılan deneylerin her biri katkılı karışımlar için daha iyi sonuçlar vermiştir. Buna göre SBS katkılı TMA karışımlarının su hasarına, yorulmaya ve tekerlek izi hasarına karşı daha dayanıklı olduğu tespit edilmiştir (Şengül vd., 2013).

Yumurta kabuklarının filler olarak bitümlü sıcak karışımlarda kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu amaçla yapılan çalışmada, karışımlarda, %1, %3 ve %5 oranlarında yumurta kabuğundan elde edilen filler kullanılmıştır. Marshall tasarımı sonucu optimum bitüm içeriği %5.38 olarak belirlenmiştir. Karışımın yoğunluğunun, kullanılan yumurta kabuğu filler miktarı arttıkça arttığı tespit edilmiştir. Marshall stabilitesi, %3 oranında

yumurta kabuğu filleri katılan karışımda 1115.16 kg olarak en yüksek değeri almıştır. Ayrıca stabilite ve akma değerlerinin artışının üniform olmadığı gözlemlenmiştir (Erfen ve Yunus, 2015).

Kalsiyum oksit içeriği yüksek olan sönmüş kireç farklı oranlarda, filler olarak, taş mastik asfalt karışımlara katılmıştır. Çalışmada kullanılan fillerin bağlayıcıya oranı 0.8 olarak belirlenmiş ve karışımlara %5, %10, %15 ve %20 oranlarında sönmüş kireç eklenmiştir. Yapılan laboratuvar testleri sonucu sönmüş kireç katkısının tekerlek izi direncini arttığı ve bitümün yaşlanma potansiyelini azalttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca sönmüş kireç kullanımı karışımın yük taşıma kapasitesini arttırmış ve asfalt mastiğin düktilitesinin artmasını sağlayarak deformasyon oluşumunun azalmasına katkı sağlamıştır. Karışıma katılan sönmüş kireç miktarı arttıkça karışımın çatlama direnci de artmış ve en iyi performansı %20 sönmüş katkılı karışım göstermiştir. %5 sönmüş kireç katkılı karışım en yüksek düşük sıcaklık çatlama direncini göstermiştir (Das ve Singh, 2017).

Yumurta kabuklarının, benzer şekilde tebeşirin, deniz kabuklarının, mağara sarkıtlarının, kireçtaşının ve mercanın, temel içeriğini kalsiyum karbonat oluşturur. Yumurta kabuğundan elde edilen tozun asfalt karışımlara katılmasının, karışımın fiziksel ve reolojik özelliklerine etkisinin araştırıldığı çalışmada, 40-50 penetrasyonlu bitüm, ağırlığının %3'ü, %5'i, %7'si, %10'u ve %15'i kadar yumurta kabuğu tozu ile modifiye edilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucu yumurta kabuğu tozu ile modifiye edilmiş bitümün rijitlik modülünün katkısız bitüme göre çok daha yüksek bir değer aldığı tespit edilmiştir. Bu, modifiye bitümün sıcaklık duyarlılığını ve kaplamanın düşük sıcaklıklarda esnekliğinin, yüksek sıcaklıklarda ise sertliğinin artacağını göstermektedir. Ayrıca yumurta kabuğu tozu miktarı arttıkça Marshall stabilite ve akma değerlerinin de arttığı gözlemlenmiştir. En yüksek stabilite değeri %5 oranında yumurta kabuğu katkısı ile hazırlanan karışımdan 11.65 kN olarak elde edilmiştir (Razzaq vd., 2018).

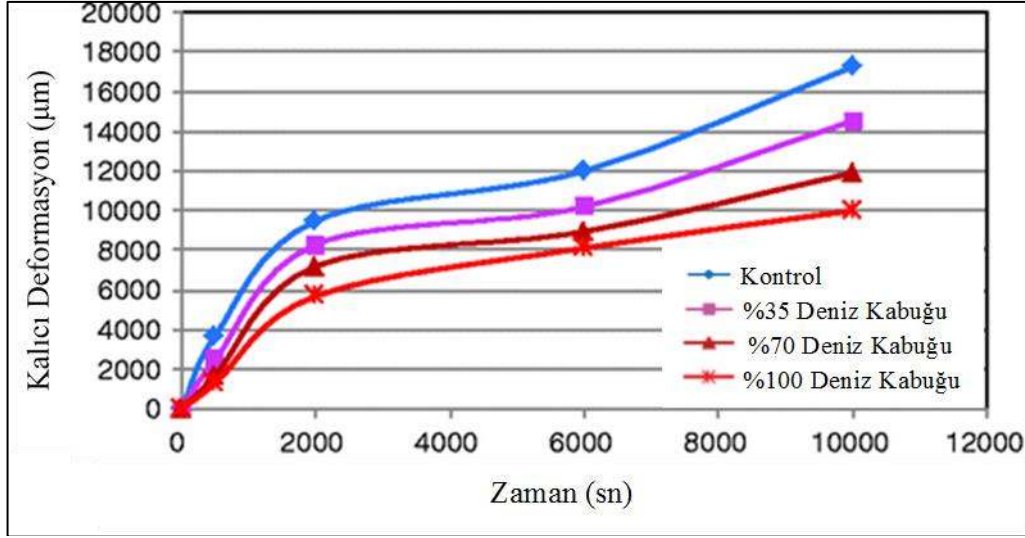
Kalsiyum karbonat içeriği yüksek olan istiridye kabukları, filler boyutunda öğütülüp, ağırlıkça %5, %10, %15 oranlarında bitüme katılarak mastik harç hazırlanmıştır. Numuneler taramalı elektron mikroskopu (SEM) ile analiz edilmiş ve %5 ile %10 oranlarında istiridye kabuğu filleri içeren numunelerin daha üniform bir yapıya sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumun mastik harcın penetrasyon ve düktilite değerlerini azalttığı, yumuşuma noktasını ise arttırdığı tespit edilmiştir (Nciri vd., 2018).

Dünyadaki bor rezervlerinin büyük bir kısmı Türkiye'de bulunmaktadır. Bor minerallerinden biri olan üleksitin TMA karışımlarda filler olarak kullanıldığı çalışmada

TMA karışımlarına farklı oranlarda (%3, %6 ve %10) üleksit mineralinden elde edilen filler katılmıştır. Karışımlara Marshall stabilite ve esneklik modülü deneyleri uygulanmıştır. Marshall stabilite deneyi sonuçlarına göre en yüksek stabilite değeri %6 oranında üleksit katkısıyla elde edilmiştir. Esneklik modülünün en yüksek değeri ise %3 oranında üleksit katkısı kullanıldığında gözlemlenmiştir. Bu da TMA karışımının bu oranda en yüksek rijitliğe ulaştığını ve buna bağlı olarak karışımın sıcak havalarda dayanımının daha yüksek, kismaya ve tekerlek izine karşı da daha dayanıklı olacağını gösterir (Kabadayı, 2019).

Özellikle beton teknolojisinde çoğunlukla kullanılan çelik fiberin, süzülme sorununu çözmek için, taş mastik asfalt karışımlara katılması düşünülmüştür. Yapılan çalışmada karışımlara ağırlıkça %0.2, %0.3, %0.4, %0.5 ve %0.6 oranlarında çelik fiber katılmıştır. Marshall Stabilite testine göre optimum çelik fiber içeriği %0.2 olarak belirlenmiştir. Ayrıca iki farklı sıcaklıkta esneklik modülü deneyi yapılmış ve bunun sonucunda 25°C sıcaklıkta %0.5, 40°C sıcaklıkta ise %0.4 oranlarında en yüksek değer elde edilmiştir. Bu sonuçlar çelik fiberin taş mastik asfalt karışımlarda kullanılan fiber türlerine alternatif olarak kullanılabileceğini göstermektedir (Jasni vd., 2020).

Deniz kabuklarının filler olarak asfalt betonunda kullanıldığı çalışmada yorulma, dolaylı çekme mukavemeti ve kalıcı deformasyon testleri yapılmıştır. Bunun için deniz kabuğu filleri farklı oranlarda karışıma katılmış, karışımlarda sırasıyla %35, %70 ve %100 oranlarında deniz kabuğu filleri kullanılmıştır. Deniz kabuğundan elde edilen mineral fillerin asfalt betonunda farklı sıcaklıklarda dahi olumlu sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Özellikle su hasarına karşı geleneksel asfalt betonundan daha dayanıklı olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca Şekil 1.'den deniz kabuğu filleri içeriği arttıkça asfalt betonunda kalıcı deformasyonların azaldığı görülmüştür (Arabani vd., 2015).



Şekil 1. Deniz kabuğu agregası ilaveli bitümlü sıcak karışımların statik sünme eğrileri

Çalışma ile elde edilen diğer sonuçlar ise şu şekilde sıralanmıştır.

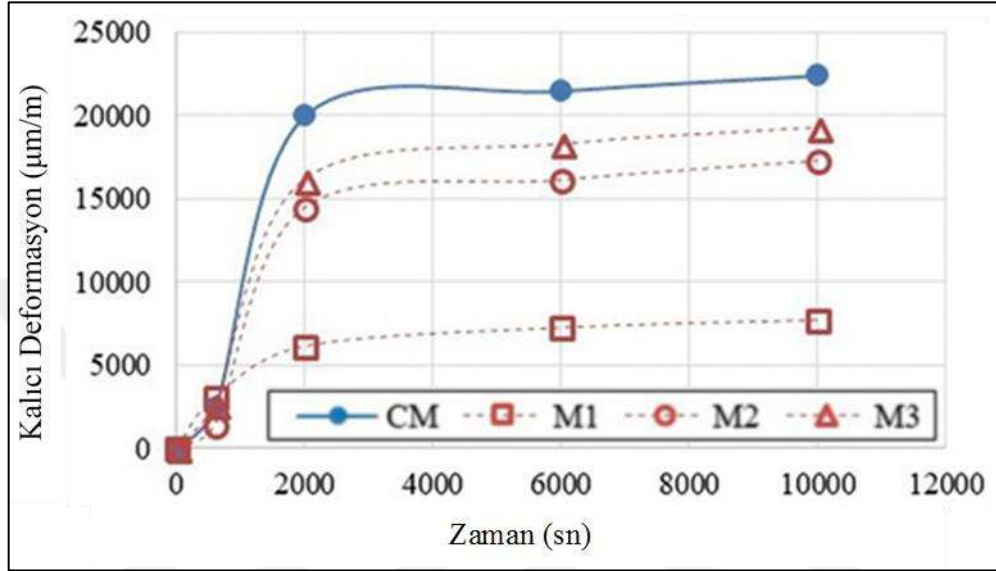
- Dolaylı çekme mukavemeti test sonuçlarına göre optimum deniz kabuğu filler içeriği BSK için %100 olarak gözlemlenmiştir.
- Deniz kabuğu partikülleri daha pürüzlü bir yapıya sahip olduğu için optimum asfalt içeriğini arttırmıştır.
- %100 deniz kabuğu filler kullanımı yorulma ömrünü uzatmıştır.
- Sıcaklık artırıldığında tüm karışım tiplerinde yorulma ömrünün azaldığı gözlemlenmektedir. Bu durum karışımdaki bitümün sıcaklık artışına karşı gösterdiği hassasiyetten kaynaklanmaktadır.

Peru'da atık deniz kabukları ile yapılan çalışmada ise deniz kabukları ince agregada boyutunda kullanılmıştır. Tablo 1.'de kullanılan deniz kabuklarının ince agregada boyutu ve oranları görülmektedir (Ruiz vd., 2018).

Tablo 1. Kullanılan deniz kabuğu miktarı ve boyutları

Karışım Tipi	Agrega Boyutu	Ağırlıkça Oran (%)
M1	2.36-0.30 mm	30
M2	0.30-0.15 mm	7
M3	0.15-0.074 mm	4

Çalışmada dolaylı çekme mukavemeti, kalıcı deformasyonlar ve su hasarı incelenmiştir. Kullanılan deniz kabuğu agregasının her bir durum için kontrol grubundan daha iyi sonuç verdiği gözlemlenmiştir. Şekil 2.'den agrega boyutu ve ağırlıkça oran arttıkça kalıcı deformasyonların azaldığı görülmektedir.



Şekil 2. İnce agrega olarak deniz kabuğu kullanılan bitümlü sıcak karışımların statik sünme eğrileri

Çalışma ile elde edilen diğer sonuçlar ise şu şekilde sıralanmaktadır.

- Deniz kabuğu parçacıklarının pürüzlü yapısından dolayı optimum asfalt içeriği artmıştır.
- Deniz kabukları ince agrega olarak kullanıldığında karışımın akışkanlığı artmıştır. Bununla birlikte karışımın daha işlenebilir olduğu gözlemlenmiştir.
- Agrega-bitüm adezyonu artmıştır.
- Deniz kabuğu içeren karışımların, kontrol grubunun içerdiğinden fazla hava boşluğu içermediği durumlarda, soyulmaya karşı daha dayanıklı olduğu gözlemlenmiştir.

1.4. Katkı Maddelerinin Asfalt Karışımlara Katılma Yöntemleri

1.4.1. Katkının Agregaya Katılması

Asfalt karışımlarda filler türü katkı maddeleri agregaya karışımına üç şekilde eklenebilir (Shidhore, 2005).

- *Katkının Kuru Halde Kuru Agregaya Katılması*

Katkının kuru agregaya katılması en kolay yöntemdir, belirlenen orana göre katkı karışım hazırlanmadan agregaya ile kuru halde karıştırılır. Bu yöntemin sakıncası katkının her zaman agregaya ile iyi karışmaması sonucu suyun, agregaya ile bağlayıcı arasına girebilmesi ve bunun agregadan bitümlü bağlayıcının soyulmasına neden olabilmektedir.

- *Katkının Kuru Halde Islak Agregaya Katılması*

Katkıyı ıslak agregaya katabilmek için ise öncelikle kuru agregaya toplam ağırlığının %3'ü kadar su ile ıslatılır. Ardından katkı eklenir ve agregaya yüzeyinde film halinde bir tabaka teşkil edecek şekilde karıştırılır. Bu yöntemin en önemli avantajı katkının agregaya yüzeyini, agregaya yüzeyindeki ıslaklık nedeniyle, düzgün bir şekilde kaplayabilmesidir.

- *Harç Halindeki Katkının Kuru Agregaya Katılması*

Harç hazırlamak için ise öncelikle katkı, ağırlığının 1/3'ü oranında su ile karıştırılır. Hazırlanan sulu harç doğrudan kuru agregaya katılır. Elde edilen agregaya karışımları 48 saat marine edilip ya da marine edilmeden doğrudan bitüm ile karıştırılır. Bu yöntemle katkının karışım hazırlanırken tozlaşması minimize edilmiş olunur. Ayrıca soyulma sorununun önüne geçilir. Yöntemin üretim aşamasında özel ekipmanlar gerektirmesi ve agregaya karışımı hazırlamanın nispeten zor olması dezavantajları olarak sayılabilir.

Sönmüş kireçle yapılan çalışmalar özellikle mekanik test sonuçlarının katılma yöntemine göre değiştiğini göstermiştir.

Sönmüş kireç kuru ve ıslak agregaya katılarak özellikle su hasarına karşı dayanımları test edilmiştir. Karışımlar için dolaylı çekme mukavemeti ve tekerlek izi testleri yapılmış, sönmüş kireç ıslak agregaya katıldığında karışımın daha ekonomik ve asfalt performansını iyileştirmede daha etkili olduğu görülmüştür. Ayrıca bu karışımların su hasarına karşı da daha dayanıklı olduğu gözlemlenmiştir (Atud vd., 2007; Diab vd., 2012).

Dolaylı çekme mukavemeti, esneklik modülü ve yorulma değerlerinin incelendiği çalışmada ise kuru agregaya ağırlığının %3'ü kadar katkı kullanılarak üç katılma yöntemi de uygulanmıştır. Tüm testlerde katkının ıslak agregaya katılmasının kuru agregaya

katılmasına göre daha iyi sonuç verdiği gözlemlenmiştir. Sönmüş kirecin ıslak agregaya katılması dolaylı çekme mukavemeti ve esneklik modülü testlerinde, kireç harcının kuru agregaya katılması ise yorulma testinde en iyi sonucu vermiştir. Bunun nedeninin katkının ıslak koşullarda agrega yüzeyini daha iyi kapladığı ve bu sayede agrega asfalt adezyonunun iyileştirildiği ifade edilmiştir (Diab vd., 2012).

Uygulamada ise sönmüş kireci karışıma katmanın dört farklı yolu vardır (URL-1, 2020).

- Sönmüş kireci karıştırma tamburuna katmak
- Sönmüş kireci agregaya değirmende eklemek
- Kuru sönmüş kireci nemli agregayla marine etmek
- Sönmüş kireç harcını marine ederek veya etmeyerek agregaya katmak

Sönmüş kirecin karışıma birçok faydası olmasına rağmen genelde soyulmayı önlemek amacıyla kullanılır. Sönmüş kirecin kaplamaya olan faydaları şu şekilde sıralanabilir (Little vd., 2006).

- Soyulmayı önler.
- Karışımda mineral filler özellikleri göstererek tabakalar arası geçişi sağlamlaştırır.
- Düşük sıcaklıklarda oluşan çatlakları önler.
- Kaplamanın oksidasyon sonucu bozulmasını ve zarar görmesini engeller.
- Kil kaynaklı sorunları hafifleterek kaplamanın su hasarı dayanımını artırır.

1.4.2. Bitüm Modifikasyonu

Modifiye bitüm, bitüme kimyasal katkıları eklenerek, bitümün kimyasal yapısının veya fiziksel ve mekanik özelliklerinin değiştirilmesi ile hazırlanır. Karışımın yapılacağı bölgenin iklim koşulları ve yolun trafiği dikkate alınarak, kaplamanın iyileştirilmek istenilen özelliklerine uygun modifiye bitüm tipi seçilir. Farklı modifiye edici katkıları kullanılarak, istenilen özellikleri sağlayan modifiye bitüm üretimi mümkündür. Modifiye bitümlerin ve karışımların kullanım amaçları şöyle sıralanabilir (Orhan, 2012).

- Düşük sıcaklıklar için daha yumuşak karışımlar elde etmek ve çatlakları azaltmak
- Yüksek sıcaklıklar için daha sert karışımlar elde etmek ve tekerlek izinde oturmayı azaltmak
- Yapım sıcaklıklarında viskoziteyi düşürmek

- İşlenebilirliği ve sıkışmayı iyileştirmek
- Karışım dayanımını ve stabilitesini artırmak
- Karışımın aşınma dayanımını iyileştirmek ve agreganın kopmasını azaltmak
- Karışımın yorulma dayanımını iyileştirmek
- Asfalt bağlayıcının ömrünü uzatmak
- Agreganın üzerinde daha kalın asfalt filmi oluşturmak.
- Yapışmayı iyileştirmek ve asfalt çimentosunun agreganın yüzeyinden soyulmasını azaltmak
- Kusmayı azaltmak
- Geliştirilmiş çatlak dolgusu sağlamak
- Yakıt döküntülerine karşı dayanım artışı sağlamak
- Yaşlanmaya ya da oksidasyona karşı dayanım artırmak
- Kaplama tabakalarının kalınlığı azaltmak
- Kaplamayı ömür-döngü maliyeti azaltmak

Bitüm modifikasyonunda kullanılan katkıların genel olarak gruplandırılması ve bitüm kıvamına etkileri ise Tablo 2.'de verilmiştir (İlcalı vd., 2001; Çavdar, 2019).

Tablo 2. Bitüm modifikasyonunda kullanılan katkı maddeleri

Katkı Tipleri	Katkı Maddeleri	Bitüm Kıvamına Etkileri		
Filler	- Mineral filler (taş tozu, Kireç, Portland çimentosu, uçucu kül) - Karbon siyahı - Sülfür	Sertleştirme		
Genleştirici	- Sülfür - Odun özü (Lignin)	Sertleştirme		
Elastomerler	- Doğal kauçuk - Yapay kauçuk - Stiren-bütadien - SBS (Stiren-bütadien-stiren) - Dönüştürülmüş kauçuk - SEBS (Stiren-etilen-bütülen-stiren) - EPDM (Etilen-propilen-dien-terpolimer)	Elastiklik Sertleştirme		
Termoplastikler	<table><tr><td> - Polietilen - Polipropilen - Etilen Vinil Asetat - Polvinil Klorür - Asetaller - Akrilikler - Floroplastikler </td><td> - Polikarbonat - Polifenilen eter - Polistiren - Poliamidler - Polisülfon - Poliüretan - Polisülfid </td></tr></table>	- Polietilen - Polipropilen - Etilen Vinil Asetat - Polvinil Klorür - Asetaller - Akrilikler - Floroplastikler	- Polikarbonat - Polifenilen eter - Polistiren - Poliamidler - Polisülfon - Poliüretan - Polisülfid	Sertleştirme
- Polietilen - Polipropilen - Etilen Vinil Asetat - Polvinil Klorür - Asetaller - Akrilikler - Floroplastikler	- Polikarbonat - Polifenilen eter - Polistiren - Poliamidler - Polisülfon - Poliüretan - Polisülfid			
Termoset	<table><tr><td> - Alkitler - Epokisler - Kazein - Alil - Poliester </td><td> - Aminoplastlar - Fenolikler - Dialilftatat - Melamin </td></tr></table>	- Alkitler - Epokisler - Kazein - Alil - Poliester	- Aminoplastlar - Fenolikler - Dialilftatat - Melamin	Sertleştirme
- Alkitler - Epokisler - Kazein - Alil - Poliester	- Aminoplastlar - Fenolikler - Dialilftatat - Melamin			
Fiber	- Doğal fiber (Asbest, Taş yünü) - Yapay fiber (Fiberglas, Polyester)	Sertleştirme		
Oksidan	Marganez tuzu	Sertleştirme		
Antioksidan	- Kurşun karışımlar - Kalsiyum tuzu - Karbon	Yumuşatma		
Hidrokarbon	- Yeniden kullanma yağlar - Gençleştirme yağları - Doğal asfaltlar	Sertleştirme Yumuşatma		
Soyulma Önleyici	- Kireç - Aminler	Yumuşatma		

1.5. Karayolu Yapısı

Karayolu, her türlü kara taşıtları ve yayaların trafik akışını sağlamak için oluşturulmuş ve kamu yararına açık olan arazi şeritleri, köprüler, tüneller, her türlü sanat yapıları, koruma yapıları ve diğer alanlardır (KTSŞ, 2013).

Yol gövdesini altyapı ve üstü yapı oluşturur. Altyapı yarma ve dolgulardan oluşurken, üstü yapı trafik yüklerini altyapıya dağıtan tabakalı bir yapıdan oluşur. Taban zeminine,

trafiğe, çevre şartlarına ve ekonomik olanaklara göre en uygun üstyapı tipi seçilir. Bu bağlamda kullanılabilecek, rijit üstyapı ve esnek üstyapı olmak üzere, iki tip üstyapı vardır (Sağlık ve Güngör, 2008).

1.5.1. Rijit Üstyapı

Yüklerin büyük bir bölümünün beton plakalar tarafından taşındığı, kalan kısmının ise altyapıya aktarıldığı üstyapı tipidir. Üstyapı tabanının dayanımına bağlı olarak plakanın altına temel tabakası yapılıp yapılmayacağına karar verilir (Orhan, 2012).

Beton yolların davranışları, tesviye yüzeyindeki toprağın özelliğine, kaplama altına serilen temel ve alttemel malzemesinin özelliklerine, dökülen beton kaplamanın kalınlığına ve dayanımına bağlıdır. Beton yolların ilk yapım maliyetleri esnek üstyapılara oranla fazla olmasına rağmen uzun vadede bakım masrafları da dikkate alındığında esnek üstyapılardan daha ekonomiktirler (Umar ve Ağar, 1991).

1.5.2. Esnek Üstyapı

Yüklerin büyük bir kısmının üstyapıyı oluşturan bitümlü bağlayıcı tabakalar tarafından taşındığı, kalan kısmın ise tabana aktarıldığı üstyapı tipidir. Dayanımı, agrega kenetlenmesine, dane sürtünmesine ve kohezyona bağlıdır. Esnek üstyapı belirli özelliklere sahip malzemelerden oluşmuş bir seri tabakayı içerir ve bu tabakaların kalınlıkları tabanın taşıma gücü ve trafik yüklerine bağlı olarak hesaplanır (Orhan, 2012).

Esnek üstyapılar genel olarak yüzeyin geçirimsizliğini sağlar, trafikteki araçların konforlu ve gürültüsüz bir şekilde ilerleyişine imkân verir, yapımlarından kısa bir süre sonrasında kullanıma açılabilir ve imalatları nispeten kolaydır (Umar ve Ağar, 1991).

1.6. Yol Üstyapısında Oluşan Bozulmalar

Bozulma, üstyapının fiziksel koşullarının herhangi bir şekilde değişmesidir. Bir esnek yol üstyapısı ilk inşa edildiğinde servis yeteneği en üst seviyededir. Yolun kullanıma açılması ile üstyapıda bozulmalar başlar. Bu bozulmalar üstyapının tasarım hataları, yanlış malzeme seçimi, yapım aşamasında yetersiz sıkıştırma, trafik yükleri, çevresel etkiler ve

yetersiz bakım onarım çalışması gibi etkenlerle ortaya çıkabilir (İyınam, 1997; İncegöl, 2010).

Yol üstyapısında oluşan bozulmalar şu şekilde sıralanabilir.

- Şekil değiştirmeler
- Çatlaklar
- Ayrışma, soyulma ve sökölme
- Kusma ve terleme

1.6.1. Şekil Değiştirmeler

Genel olarak temel veya alttemel ile ilgili sorunlara bağılı olarak oluşan şekil değiştirmeler tekerlek izinde oturma, yerel oturma ve ondölasyon şeklinde göröllebilir.

1.6.1.1. Tekerlek İzinde Oturma

Kalıcı deformasyon, asfalt kaplama tabakası yüzey enkesitinin, mevcut durumunu koruyamaması ve kalıcı olarak bozulmasıdır. Kalıcı deformasyonun en yaygın görölün şekli tekerlek izi oturmasıdır. Tekerlek izi, asfalt karışımların tekrarlı ağır yüklere karşı koyacak yeterli kayma mukavemetine sahip olmadığında oluşur. Tekerlek izi oluşumunun nedenleri şu şekilde sıralanabilir (Hanlı, 2009).

- Yüksek bitüm yüzdesi
- Fazla miktarda filler malzemesi
- Yuvarlak agregaların karışımda kullanımı
- Karışımın yetersiz sıkışması
- Ağır trafik veya tek çizgide akan trafik nedeniyle kaplama tabakasının fazla sıkışması
- Alt tabakaların kalınlığının yetersiz olması
- Ağır ve fazla tekerrür eden yük
- Bölgenin yüksek sıcaklığa sahip olması



Şekil 3. Tekerlek izinde oturma (URL-2, 2020)

1.6.1.2. Yerel Oturma

Yerel oturmaların diğer oturmalarından farkı deformasyonun belli bir bölgede, lokal olarak görülmesidir. Yerel oturmaların başlıca nedenleri şu şekilde sıralanabilir (Doğan, 2006).

- Taban, alt temel veya temel tabakalarının yetersiz sıkışması
- Üstyapı tabanının taşıma gücünün zayıf olması
- Dolgu şevinde eğim hataları yapılması
- Uygun olmayan bakım teknikleri ve yetersiz drenaj sistemi

1.6.1.3. Ondülasyon

Ondülasyonlar genel olarak bitümlü tabakalardaki stabilite yetersizliğinden oluşurlar. Ondülasyon oluşumuna neden olan faktörler şu şekilde sıralanabilir (Uluçaylı ve Yavuz, 2002; Kabadayı, 2019).

- Yüksek bitüm yüzdesi
- İnce agrega oranının yüksek olması
- Filler malzemenin fazla olması
- Yuvarlak agrega kullanımı
- Yüksek penetrasyonlu bitüm kullanılması



Şekil 4. Ondülasyon (Hanlı, 2009)

1.6.2. Çatlaklar

Çatlaklar genel olarak dingil yüklerinden ve bunların fazla tekrarından oluşurlar. Dingil yükünün kaplama tabakasında meydana getirdiği gerilmeler, kaplama malzemesinin mukavemetini aştığı zaman çatlamlar oluşur. Ayrıca araçların ani hızlanma ya da yavaşlamalarıyla ortaya çıkan yatay kuvvetler, sıcaklık değişimleri, tabaka kalınlıklarının yetersiz olması ve kaplamanın don tesirine duyarsız olması gibi etkenler de çatlaklara neden olabilir (Hanlı, 2009).

Çatlaklar; timsah sırtı çatlaklar (yorulma çatlama), kenar çatlakları, derz çatlakları, enine çatlaklar ve yansıma çatlakları olarak sınıflandırılabilir.

1.6.2.1. Timsah Sırtı Çatlaklar (Yorulma Çatlama)

Yorulma çatlakları, asfalt kaplamalara uygulanan yüklerden dolayı, kaplamanın gerilme dayanımının aşılmasıyla oluşur. Yorulma çatlağı ilk olarak tekerlek izinin boyuna oluşturduğu çatlaklar ile oluşmaya başlar ardından bu çatlakların birleşip daha fazla çatlak oluşturmasıyla daha geniş bir alana yayılır. Yorulma çatlama ilerleyip büyüdüğünde, çatlak bölgesi timsah derisine benzetildiği için, timsah sırtı çatlağı diye adlandırılır (Hanlı, 2009).

Timsah sırtı çatlakların oluşum nedenleri şu şekilde sıralanabilir (Doğan, 2006).

- Taban zemini, alt temel ve temel tabakalarının yetersiz sıkışması veya yetersiz drenajı nedeni ile kaplamanın taşıma gücünün azalması

- Kaplamaya etkiyen aşırı trafik yükleri
- Uygun olmayan malzeme kullanımı ve yapım teknikleri
- Donma etkisi ve nem değişiklikleri



Şekil 5. Timsah sırtı çatlak (URL-3, 2020)

1.6.2.2. Kenar Çatlakları

Kenar çatlakları, genel olarak banketlerin yeterli yanıl desteği sağlamaması sonucu banket ile kaplama arasında oluşan çatlaklardır.

Kenar çatlaklarının oluşum nedenleri şu şekilde sıralanabilir (Hanlı, 2009).

- Don etkisi
- Kaplama kenarındaki banketlerin yetersiz taşıma gücü.
- Üstyapı kenarında ve bankette yetersiz drenaj
- Üstyapı genişliğinin az olması nedeniyle trafiğin banket kenarına seyretnesi ile oluşan trafik yükleri
- Kaplama kenarına yakın yoğun bitki örtüsü ve ağaçların kaplamaya ve bankete zarar vermesi



Şekil 6. Kenar çatlağı

1.6.2.3. Enine Çatlaklar

Enine çatlaklar genel olarak düşük sıcaklık çatlaklarıdır ve asfalt kaplama tabakasının soğuk havada büzülmesi sonucu oluşurlar. Kaplama büzüldüğünde kaplama içinde çekme gerilmeleri oluşur ve bu gerilmeler kaplamanın çatlamasına neden olur (Hanlı, 2009).

Enine çatlakların oluşum nedenleri şu şekilde sıralanabilir (Doğan, 2006).

- Asfalt kaplamada düşük sıcaklıklarda meydana gelen büzülme
- Tabanda oluşan don etkisi ve su içeriği değişikliği
- Alt tabakalarda daha önce oluşan çatlakların yüzeye yansması
- Karışım içindeki bitümün sıcaklığa olan yüksek hassasiyeti



Şekil 7. Enine çatlaklar (Hanlı, 2009)

1.6.2.4. Yansıma Çatlakları

Genellikle asfalt takviye tabakası üzerinde görülen çatlaklardır. Altta kalmış olan esas kaplamada daha önce bulunan çatlakların takviye tabakasına yansımasıyla oluşurlar. Takviye tabakası çok ince olursa bu çatlakların oluşma ihtimali artar (Hanlı, 2009).



Şekil 8. Yansıma çatlağı

1.6.3. Ayrışma, Soyulma ve Sökülme

Yol yüzeyindeki agrega eksikliği, sadece bazı bölgelerde oluşan çukurlar ve kopmalar şeklinde görülebilen bozulma tipidir (Hanlı, 2009).

Ayrışma, soyulma ve sökülmelerin başlıca oluşum nedenleri şu şekilde sıralanabilir.

- Su ve trafik etkisi
- Bitümlü sıcak karışım içinde kil toprakları veya kille kaplı agrega taneciklerinin bulunması
- Zayıf sıkıştırma
- Yüksek boşluk yüzdesi (Özellikle soğuk hava koşullarında yapılan kaplamalarda su ve tuzlar bu boşluklardan tabakalar arasına sızar, donma ve erime olayları sırasında asfaltın bozulmasına neden olur.)
- Yetersiz bitüm yüzdesi
- Yaşlanma nedeniyle oluşan asfalt sertleşmesi
- Donma-çözülme olaylarının tekrarlaması ile absorpsiyonu ve kırılabilirliği yüksek agregaların kullanıldığı karışımlarda ayrışma meydana gelmesi

1.6.4. Kusma ve Terleme

Bitümlü bağlayıcının terlemesi veya kusması kaplamada kullanılan bitümün kaplama yüzeyine çıkmasıdır. Bu kesimlerde, özellikle sıcak iklim koşullarında, tekerlek izleri de görülebilmektedir (Hanlı, 2009).

Kusma ve terlemenin başlıca oluşum nedenleri şu şekilde sıralanabilir.

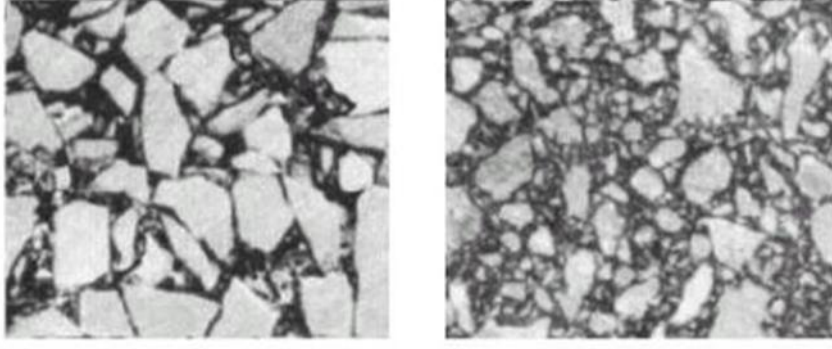
- Yapım sırasında aşırı dozda bitüm kullanılması
- Özellikle sıcak havalarda trafik etkisiyle fazla bitümün agregaya üzerine çıkması
- Terlemiş yüzey üzerine herhangi bir tedbir almadan yeniden yüzeysel kaplama yapımı
- Fazla agregaya soyulması



Şekil 9. Asfalt kaplamanın kusması

1.7. Taş Mastik Asfalt Karışımlar

Taş mastik asfaltlar, bitümlü kaplamalarda oluşan tekerlek izini azaltmak amacıyla ortaya çıkmıştır. İri agregadan oluşmuş bir iskelet ile boşlukları dolduran ince agregaya, filler-bitüm (mastik) harcının karışımıdır. Kaba agregaya yüksek dane teması ve iç kenetlenme ile trafik yüklerini taşır. Mastik harç ise boşlukları doldurarak yüksek bitüm oranı nedeniyle durabiliteyi artırır. TMA karışımına, bitüm oranı yüksek olduğundan, bitümün karışımdan süzülmesini önlemek için elyaf ilave edilir (Orhan, 2012).



Şekil 10. TMA (sol), BSK (sağ) yüzey görüntüleri (URL-4, 2020).

1.7.1. Taş Mastik Asfalt Karışımların Tarihçesi

Taş mastik asfalt karışımları ilk olarak 1960'lı yılların ortalarında Almanya'da, Splittmastixasphalt ismiyle, kullanılmaya başlanmıştır. TMA karışımlardan önce, Almanya'da, düşük kaba agrega içerikli asfalt betonu veya Gussasphalt isimli mastik asfalt karışımları kullanılmaktaydı. Ancak bu karışımlar çivili tekerleklerin aşınma tabakasında oluşturduğu deformasyonları önleyemiyordu. TMA karışımlar bu deformasyonların önüne geçebilmek için Dr. Zichner tarafından geliştirilmiştir. Taş mastik asfalt uygulamaları 1980'li yıllara kadar sadece Almanya'da görülmüş, 1990'larda Avrupa'ya yayılmış ve son yıllarda ise global çapta kullanılmaktadır (Blazejowski, 2011).

TMA karışımların ilk uygulamalarında ağırlık olarak %7'den fazla bitüm oranları ve stabilize edici katkı malzemesi olarak asbest fiberleri ile lastik tozu kullanılmıştır. Ancak ilerleyen yıllarda Almanya'da hazırlanan mevzuatlarda ağırlıkça bitüm oranı minimum %6 ve stabilize edici katkı malzemesi olarak organik veya madensel fiberler, termoplastik maddeler ve silisik asit kullanım şartları getirilmiştir (Drüschner ve Schäfer, 2000).

Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) tarafından, 1997 yılında Türkiye için geçerli ilk TMA şartnamesi yayınlanmıştır. Bu yıllarda, maliyetin yüksekliği, modifiye bitüm imalatındaki zorluklar, yeni birim fiyat belirlemede karşılaşılan zorluklar, önerilen malzemelerin çokluğu ve yaratılan spekülasyonlar nedeni ile TMA karışımlar yaygın olarak uygulanamamıştır. Türkiye'de TMA karışımlar ilk olarak, Ankara-Polatlı-Sivrihisar Yolu (1999) ve Bala Ayrımı-Kulu Ayrımı Devlet Yolu (1999) kesimlerinde kullanılmıştır (Tuğlu ve Kazankıran, 2004; Arslan, 2014).

Türkiye'de yaygın olarak kullanılan geleneksel bitümlü sıcak karışım yol kaplamalarının yanı sıra artan ağır trafik hacmi ve görülen yoğun bozulmalar nedeniyle

kullanılmaya başlanılan polimer modifiye bitümlü sıcak karışımların ve taş mastik asfalt karışımların yıllara göre kullanım miktarları Tablo 3.'te verilmiştir (Yardım ve Arslan, 2013).

Tablo 3. Yıllara göre farklı asfalt kullanım miktarları

Yıl	Kullanım Miktarı (ton)	
	Polimer Modifiye Bitümlü BSK	Taş Mastik Asfalt
2000	73,332	92,926
2001	104,976	14,284
2002	286,667	37,000
2003	166,448	1,473
2004	352,850	2,329
2005	367,687	2,092
2006	559,679	20,710
Toplam	1,902,639	170,814

1.7.2. Taş Mastik Asfalt Karışımların Özellikleri

Taş mastik asfaltların özellikleri şu şekilde sıralanabilir (Taşdemir, 1998).

- Taş mastik asfaltların en önemli özelliği %70-80 oranında kaba agrega, %6-7 oranında bitümlü bağlayıcı içermesidir. Bu özellik yol yüzeyine uygulanan yüklerin yol yüzeyinde deformasyona sebep olmadan altyapıya geçmesini sağlar.
- Açık gradasyonlu bir yapısı olmasına rağmen yüksek bitüm ve filler içeriğinden dolayı düşük boşluk oranına sahiptir.
- Mastik harcın fazla olması agregalar arası temasın azalmasına bu sebeple tekerlek izi oluşumuna neden olur. Bu yüzden TMA karışımlar genelde %3 hava boşluğuna göre tasarlanır.
- Yüksek bitümlü bağlayıcı oranından dolayı bitümlü bağlayıcı filmi kalınlığı artacağı için kaplamanın yaşlanmaya karşı direnci de artar.
- Yüksek hızdaki taşıtların lastiklerinin yolu kavrama derecesi yolun makro dokusuna bağlıdır. Pürüzlü bir yüzey yapısı, yol ile temas sonucunda lastiklerde deformasyon meydana getirerek kavramayı artırır. TMA karışımlar yüzeye makro

doku kazandırdığı için yüksek hızlarda kaymaya ve savrulmaya karşı direnç kazanılmış olur.

- TMA karışımlar BSK'ya göre daha uzun ömürlü ve dayanıklı olduğu için daha ince serilebilir. Geleneksel asfalt kaplamalarda aşınma ve binder tabakaları toplam 100 cm inşa edilirken, TMA karışımlar 25-40 cm kalınlığında serilebilir.

TMA karışımların olumlu özellikleri şu şekilde sıralanabilir (Blazejowski, 2011).

- Servis ömrü uzundur.
- Yüksek kaba agrega içeriği ve agregaların oluşturduğu güçlü iskeletten dolayı deformasyonlara karşı dayanımı yüksektir.
- İçerdiği bağlayıcı miktarı yüksek olduğu için yorulma ömrü uzundur.
- Aşınma mukavemeti yüksektir.
- Makrodokusu yüksektir, bu sayede ıslak yüzeylerde görülebilen su sıçratma ve kayma az olur.
- Gürültü kirliliğine neden olmaz.

TMA karışımların olumsuz özellikleri ise şu şekilde sıralanabilir (Blazejowski, 2011; Arslan, 2014).

- Yüksek oranda bağlayıcı ve stabilize edici katkı maddesi kullanımı nedeniyle maliyeti daha yüksektir.
- Bağlayıcının yüzeyde toplanmaması için TMA karışımının 40°C'a kadar soğumadan trafiğe açılmaması gerekir. Bu yüzden yolun trafiğe açılması gecikecektir.
- Yüzeyde biriken kalın bağlayıcı filmi trafikle yok oluncaya kadar tabakanın başlangıç kayma direnci daha düşük olabilmektedir. Bu nedenle trafiğe açılmadan önce, ince temiz bir mıcırın yüzeye serilmesi gerekebilir.
- Polimer kullanıldığında asfaltın sıcaklığı daha yüksek olması gerektiğinden, taşıma mesafesine sınırlamalar getirilebilir.
- TMA diğer asfalt karışımlarına göre daha sert ve işlenebilirliği düşüktür.
- Yüksek yoğunluklu bağlayıcı ve mastik içindeki elyaftan dolayı, karışım sıcaklığı yüksektir.

1.7.3. Taş Mastik Asfalt Karışımların Kullanım Alanları

- Havaalanı Pistleri

Avrupa Asfalt Kaplama Derneği'nin (EAPA) raporuna göre havaalanı pistlerinin çoğu asfalt kaplamalardan oluşmaktadır. TMA kaplamaların yüksek performans özelliklerinin havaalanı yöneticilerinin dikkatini çekmesiyle havaalanı pistlerinde TMA uygulamaları şans bulmuştur. Çeşitli havaalanlarında, çok sayıda deneme kesimi açılmıştır. Ardından daha büyük uygulamalar Oslo havaalanı Gardermoen (1998), Johannesburg havaalanı (1999) ve Frankfurt havaalanı Fraport (2005) gibi yüksek kapasiteli havaalanlarının pistlerinde görülmüştür. TMA uygulamalarının karayolu üstyapılarında hızla yaygınlaşmasına rağmen havaalanı pistlerinde beklenen başarıya ulaşamamıştır. Bu duruma havaalanı pistinin eşsiz uygulamalar gerektirmesi ve TMA kaplamalara özel bazı sorunlar sebep olmuştur (Blazejowski, 2011).

- Köprü Döşemeleri

Köprülerde kullanılan kaplama, toprak zeminlerde uygulanan kaplama gibi değildir ve olmamalıdır. Temel fark imalat şeklinin farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Özellikle dikkate alınması gereken bazı hususlar vardır. Bunlar (Blazejowski, 2011);

- Çelik yapının altındaki havanın, sıcaklığının değişmesi ile köprü kaplamasında oluşan ısınma ve soğuma
- Geçen araçların köprü güvertesinde neden olduğu yapısal bozulmalar
- Geleneksel yol kaplamalarından daha yüksek olan, köprü güvertesinde oluşabilen, genlik titreşimleri
- Buzlanma önleyici katkıların daha fazla kullanılmasından kaynaklanan kaplamada oluşan bozulmalar
- İnce TMA Kaplamaları

İnce TMA kaplama teknolojileri göz önüne alındığında, sadece agrega gradasyonu değil bağlayıcı miktarı ve türü de, standart finişerle yaklaşık 4 cm'lik (genellikle 3 cm'den az) sıkıştırma kalınlığı elde edilmesine olanak sağlamalıdır. Bu zorluklara rağmen ince TMA, ne kaplamayı gerçekten güçlendirebilmekte ne de yorulma ve yansıma çatlaklarına çare olabilmektedir. Birçok ülke 4 cm'den az kalınlık elde edebilmek için kendi teknolojilerini geliştirmiş ve genellikle, TMA gibi, kesikli gradasyon kullanılan karışımlar tercih etmişlerdir (Blazejowski, 2011).

- Tipik Olmayan TMA'lar

Özel kullanım amaçları ve farklı tekniklerle üretilen TMA türleri şu şekilde sıralanabilir (Blazejowski, 2011);

- Orta tabakalarda (binder tabakası) kullanılan TMA
- Sessiz TMA
- Kjellbase: %5 oranında modifiye bitümle üretilen özel tip bir TMA'dır.
- Renkli TMA

1.7.4. Taş Mastik Asfalt Karışımların Yapım Şartları

Karayolları Teknik Şartnamesi'ne (2013) göre taş mastik asfalt kaplamaların imalatında kullanılacak olan malzemelerin özellikleri şu şekilde sıralanabilir:

Agrega sağlam, dayanıklı ve temiz daneleri içeren kırmataş, kırma çakıl veya bunların birleşiminden oluşmalı ve organik maddeler, kil topakları veya başka zararlı maddeler içermemelidir. Ayrıca mineral agregası, filler dahil en az dört ayrı dane grubunun belli oranlarda karıştırılmasından oluşmalı ve bitümlü bağlayıcı ile karıştırıldığında uniform halde kalmalıdır. Agregası karışımının tasarım gradasyonu ve toleransları aşınma tabakası için Tablo 4.'te, binder tabakası için Tablo 5.'te verilmektedir. Herhangi bir agregası kaynağından agregası üretilmesi durumunda tüm malzeme bir elek veya çubuk ızgaradan geçirilmeli ve kalan malzeme kırılmalıdır.

Tablo 4. TMA aşınma gradasyonu ve tolerans limitleri

Elek Boyutu		TMA TİP-1		TMA TİP-2	Tolerans Limitleri
		A	B		
in, No	mm	Geçen %	Geçen %	Geçen %	%
3/4"	19.0	100	100		
1/2"	12.5	90-100	90-100	100	±4
3/8"	9.5	50-75	50-67	90-100	±4
No.4	4.75	25-40	25-35	25-45	±3
No.10	2.00	20-30	20-30	20-30	±3
No.40	0.425	12-22	12-22	12-22	±3
No.80	0.180	9-17	9-17	9-17	±3
No.200	0.075	8-12	8-12	8-12	±2

Tablo 5. TMA binder gradasyonu ve tolerans limitleri

Elek Boyutu		TMA Binder	Tolerans Limitleri
in, No	mm	Geçen %	%
1''	25.0	100	
3/4''	19.0	92-100	±4
1/2''	12.5	73-83	±4
3/8''	9.5	56-66	±4
No.4	4.75	32-42	±3
No.10	2.00	25-30	±3
No.40	0.425	14-20	±3
No.80	0.180	9-15	±3
No.200	0.075	7-11	±2

Kaba ve ince agregası, No.4 elek üzerinde kalan kırmataş, kırma çakıl veya bunların karışımlarından oluşmalıdır. Agregalar temiz, sert, dayanıklı olmalı ve bitümlü malzemelerin agregaya yapışmasını önleyecek kil toprakları, organik malzemeler ve diğer zararlı ve gevrek malzemeleri içermemelidir. TMA aşınma karışımlarında kullanılan kaba agregası granit, bazalt veya diğer yüksek kaliteli magmatik kayaların kırılmasından elde edilmelidir. Kaba agregası çakıldan üretildiğinde ise, agreganın tüm yüzeyleri kırılmış olmalıdır. Gradasyon ayarlaması için gerek görüldüğü takdirde, agregaya mineral filler ilave edilebilir. Bu ilave mineral filler, taş tozu veya sönmüş kireçten oluşmalıdır. Benzer şekilde ilave mineral filler de tümüyle kuru olmalı ve toprak, kil, organik madde ve diğer zararlı maddeleri içermemelidir.

TMA üretiminde TS EN 12591 standardına uygun 40/60 veya 50/70 penetrasyonlu bitüm veya TS EN 14023 standardına uygun polimer modifiye bitüm kullanılmalıdır. Karışımdaki bitümün drenajını önlemek için ise elyaf kullanılmalıdır. Kullanılacak olan elyaf stabilizör, selüloz veya mineral elyaf olmalı ve elyaf dozajının tolerans limitleri gerekli olan elyaf ağırlığının $\pm \%10$ 'u olmalıdır. Küçük peletler halindeki granül elyaflar da stabilizör olarak kullanılabilir.

İdare tarafından başka bir karışım tasarımı yöntemi belirtilmedikçe, karışım tasarımı için Marshall Karışım Dizaynı Yöntemi kullanılmalıdır. Karışım tasarımı için hazırlanacak olan Marshall numuneleri, bitüm kullanıldığında 135 ± 5 °C'de, modifiye bitüm kullanıldığında 145 ± 5 °C'de hazırlanmalıdır. Ayrıca karışım tekerlek izi oturmasına karşı

dayanıklı tasarlanmalıdır. Kullanılan modifiye bitüm tipi, karışımın tekerlek izine karşı dayanıklılığı ile ilgili laboratuvar sonuçları ve karışımın diğer özellikleri ile kullanılan elyafın tipi ve oranı karışım tasarımında tanımlanmalıdır. Tasarım sonucu elde edilen değerler Tablo 6.'da verilen tasarım kriterlerine uygun olmalıdır.

Tablo 6. TMA tasarım kriterleri

Özellikler	Şartname Limitleri		Deney Standardı
	TMA Aşınma	TMA Binder	
Briket Yapımında Uygulanacak Darbe Sayısı	50	50	TS EN 12697-30
Hava Boşlukları, (%)	2-4	3-4	TS EN 12697-8
Sıcak İklim Bölgelerinde Hava Boşlukları, (%)	3-4		
Agregalar Arası Boşluk (VMA), (%) min.	TİP-1 16 TİP-2 17	13	TS EN 12697-8
Bitümlü bağlayıcı, (%) min.	TİP-1 5.8 TİP-2 6.5	5.2	TS EN 12697-1
İmdirekt Çekme Mukavemeti Oranı, min. %	80	80	AASHTO T 283
Tekerlek İzinde Oturma* (30000 devirde, 60 °C'de), (%) maks.	6	6	TS EN 12697-22
Elyaf Miktarı, %	0.3-1.0	0.2-0.8	
Schellenberger Bitüm Süzülme Deneyi, (%) maks.	0.3	0.3	TS EN 12697-18
Not: Tabakalar arası yapışma dayanımı TS EN 12697-48'e göre yapılabilir.			

Bitümlü bağlayıcı ve agrega en az 165°C'lik, en fazla 180°C'lik karışım sıcaklığında plentte karıştırılmalıdır. Karışım sericiye verildiğinde sıcaklığı 145°C'nin altında olmamalıdır. Ayrıca silindirme işlemi karışım sıcaklığı 145°C'ye düşmeden başlamalı ve 115°C'nin altına düşmeden tamamlanmalıdır. Karışımı sermek için gereken çevre sıcaklığı ise gölgede en az 10°C olmalıdır.

Plentteki karışımdan günde iki kez olmak üzere numune alınıp bitüm süzülme deneyine tabi tutulmalıdır. Bitüm süzülme miktarı en fazla %0.3 olmalıdır.

Karışım serildikten hemen sonra finişer ile sıkıştırılmalıdır. Bunun için kullanılacak olan finişer ise statik ağırlığı en az 10 ton olan ve en az iki adet çelik bandajlı silindir olmalıdır. Lastik tekerlekli silindirler kullanılmamalıdır. Silindirler, sericinin arkasında en fazla 100 m uzaklıkta çalıştırılmalıdır ve sıkıştırma esnasında vibrasyon uygulanmamalıdır. Gereken yoğunluk sağlandığında kusmaya veya fillerin yüzeye çıkmasına neden olmamak

için sıkıştırma işlemi sonlandırılmalıdır. Silindiraj tamamlandıktan sonra serilen tabaka üzerinden en az 24 saat süre ile trafik geçmemelidir.

Bütün bu işlemlerden sonra elde edilecek olan tabaka kalınlıkları, hava boşlukları ve sıkışma miktarı Tablo 7.'de verilen şekilde olmalıdır.

Tablo 7. Sıkıştırılmış TMA tabakasının özellikleri

Özellik	Aşınma/Tip I	Aşınma/Tip II	Binder
Tabaka Kalınlığı, mm	35-50	25-40	60-100
Hava Boşluğu, %	≤ 5	≤ 5	≤ 5.5
Sıkışma, %	98-100	98-100	98-100

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Giriş

Bu bölümde deniz kabuklarının taş mastik asfalt karışımlarda kullanılabilirliğini belirlemek amacıyla yapılan deneysel çalışmalarda kullanılan malzemelerin özellikleri ve bu amaçla yapılan deneyler tanıtılmıştır.

2.2. Çalışmada Kullanılan Malzemeler

2.2.1. Bitümlü Bağlayıcı ve Özellikleri

Çalışmada TÜPRAŞ Kırıkkale tesislerinden temin edilen 50-70 penetrasyon dereceli bitüm kullanılmıştır. Kullanılan bitümün özellikleri Tablo 8’de verilmiştir.

Tablo 8. Bitümlü bağlayıcı özellikleri (AC 50-70)

Test	Yöntem	Değer	Şartname Limitleri
Özgül ağırlık (25°C)	ASTM D-70	1.025	
Yumuşama noktası (°C)	TS EN 1427	52	46-54
Parlama noktası (°C)	TS EN ISO 2592	240	En az 230
Penetrasyon (25°C), 0.1mm	TS EN 1426	63	50-70
Düktilite (25°C)	ASTM D-113	100+	

2.2.2. Agregat Özellikleri

Agregalar Trabzon ili, Zigana bölgesinde bulunan bazalt taş ocağından temin edilmiştir. Kullanılan bazalt agregasının boyutlarına göre fiziksel özellikleri Tablo 9 - Tablo 11’de, kimyasal özellikleri ise Tablo 12’de verilmiştir.

Tablo 9. Bazalt agregası fillerin fiziksel özellikleri

Özellik	Değer
Zahiri Özgöl Ağırlık (gr/cm ³)	2.821

Tablo 10. Bazalt agregası, ince agrega fiziksel özellikleri

Deney/Özellik	Değer	Deney Standardı	Şartname Limitleri
Hacim Özgöl Ağırlık (gr/cm ³)	2.656	ASTM C 128	
Zahiri Özgöl Ağırlık (gr/cm ³)	2.754		
Plastisite İndeksi	Plastik değil	TS-1900-1	N.P.
Organik Madde (%)		TS EN 1744-1	Negatif
Su Emme (%)	0.81	TS EN 1097-6	≤ 2.0

Tablo 11. Bazalt agregası, kaba agrega fiziksel özellikleri

Deney/Özellik	Değer	Deney Standardı	Şartname Limitleri
Hacim Özgöl Ağırlık (gr/cm ³)	2.684	ASTM C 127	
Zahiri Özgöl Ağırlık (gr/cm ³)	2.744	ASTM C 127	
Parçalanma Direnci (Los Angeles), % Kayıp	12	TS EN 1097-2 AASHTO T 96	≤ 25
Yassılık İndeksi (%)	14	BS 812	≤ 25
Soyulma Mukavemeti, Katkısız (%)	35-40	TS EN 12697-11 (Kısım 403 EK-A)	≥ 60
Cilalanma Değeri (%)		TS EN 1097-8	≥ 50 ≥ 40 (binder için)
Su Emme (%)	0.81	TS EN 1097-6	≤ 2.0
Donma Kaybı (NaSO ₄ ile kayıp) (%)	0.92	ASTM C-88	≤ 8
Kil Topakları ve Ufalanabilir Daneler (%)		ASTM C 142	Bulunmayacak

Tablo 12. Bazalt agregasının kimyasal özellikleri

Bileşim (%)	Formül	Numune 1	Numune 2
Silisyum dioksit	SiO ₂	57.28	59.41
Alüminyum oksit	Al ₂ O ₃	13.58	13.44
Demir oksit	Fe ₂ O ₃	6.75	6.72
Kalsiyum oksit	CaO	5.25	4.49
Magnezyum oksit	MgO	3.41	3.75
Sülfür trioksit	SO ₃	0.00	0.00
Sodyum oksit	Na ₂ O	1.95	1.68
Potasyum oksit	K ₂ O	1.78	2.63
Klor	Cl ⁻	0.0216	0.0260
Kalsiyum karbonat + Magnezyum karbonat	CaCO ₃ +MgCO ₃	5.30	2.80
Isıtma kaybı		4.68	3.01

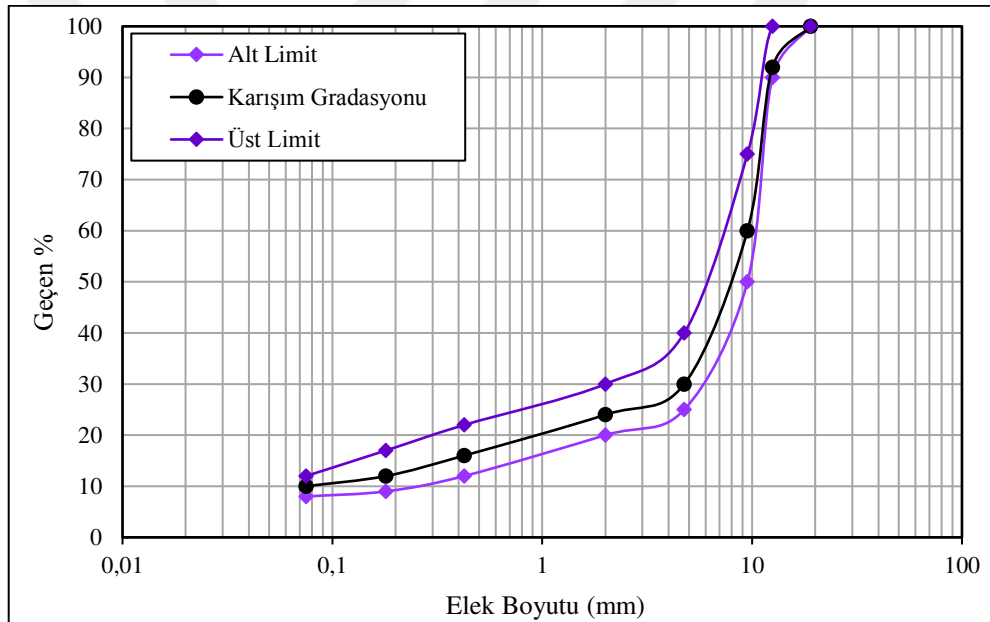
Çalışmada, Karayolları Teknik Şartnamesinin (KGM, 2013) öngördüğü Taş Mastik Asfalt Aşınma TİP-1 A karışımı kriterlerine göre belirlenen gradasyon kullanılmıştır. Belirlenen agrega gradasyonu tolerans limitleri arasında yer almaktadır. Agrega gradasyonu Tablo 13'te, gradasyon eğrisi ise Şekil 12'de gösterilmiştir.



Şekil 11. Gradasyona göre hazırlanan agrega karışımlarından bir görüntü

Tablo 13. TMA aşınma TİP-1 agrega gradasyonu ve şartname limitleri

Elek Boyutu		Şartname Limitleri		Agrega Gradasyonu (% Geçen)
Inch	mm	Alt Limit	Üst Limit	
3/4	19.0	100	100	100
1/2	12.5	90	100	92
3/8	9.5	50	75	60
No. 4	4.75	25	40	30
No. 10	2.00	20	30	24
No. 40	0.425	12	22	16
No. 80	0.18	9	17	12
No. 200	0.075	8	12	10



Şekil 12. TMA aşınma TİP-1 gradasyon eğrisi

2.2.3. Deniz Kabuklarının Özellikleri

Deniz kabukları kemiksiz, yumuşak vücutlu deniz canlıları olan yumuşakçaların vücutlarını çevreleyen koruyucu, sert tabakalı dış iskeletleridir. Deniz kabuğunun %95'i kalsiyum karbonat kristallerinden %5'i ise yaklaşık 30 farklı proteinin birleşimi olan, organik malzemelerden oluşmaktadır. Proteinlerden oluşan kemik yapı kalsiyum karbonat

kristallerini bir arada tutar ve bu da kompozit bir yapı teşkil eder. Deniz kabuklarının bu yapısı özellikle betonarme gibi kompozit malzemelere ilham olmuştur (Ekici, 2012).

Deniz kabukları genel olarak kireçtaşı elde edilmesinde, hayvan yemi karışımında, yol yapım malzemelerinde ve bazı kimyasal işlemlerde kullanılmaktadır. Eczacılıkta içerdiği kalsiyumdan, matematikte ise yapısını oluşturan kristallerin diziliminden yararlanılmaktadır. Ayrıca bazı ülkeler deniz kabuklarını suların filtreleme işlemlerinde kullanarak kadmiyum, çinko, kurşun gibi ağır metaller ve radyoaktif maddeleri atık sulardan uzaklaştırabilmektedir (Yıldız, 2019).

Tablo 14. Yıllara göre avlanan kabuklu deniz canlısı miktarı (ton)

Yıl	Avlanan kabuklu deniz canlısı (kum midyesi) miktarı (ton)
2015	37409
2016	20937
2017	34941
2018	44533
2019	36627

Tablo 14'te Türkiye'de yıllara göre avlanan kabuklu deniz canlısı miktarları verilmiştir. Kabuklu deniz canlılarının ağırlığının %70'i kabuk ve %30'u canlı kısımdan oluşur. Buna göre 2019 yılında yaklaşık 25700 ton, 2015-2019 yılları arasında ise yaklaşık 122000 ton deniz kabuğunun atık halinde biriktiği tespit edilmiştir (TOB, 2020).

Çalışmada kullanılan deniz kabukları Trabzon ili, Yomra ilçesinde bulunan Yomra Limanı'ndan atık halde temin edilmiştir. Kumla karışık, ıslak halde bulunan atık deniz kabukları ilk olarak yıkanıp, kumlardan ve istiridye kabuğu, taş, yosun gibi diğer maddelerden ayrıştırılarak etüvde kurutulmuştur. Ardından laboratuvarında bulunan mini konkasör yardımıyla kırılmış ve ASTM eleklerinden elenip boyutlarına göre sıralanmıştır.



Şekil 13. Deniz kabuklarının yıkanmadan önce (a) ve yıkanıp kurutulduktan (b) sonraki görüntüsü



Şekil 14. Deniz kabuklarının mini konkasörde kırılması

Çalışmada kullanılacak olan deniz kabuğu filleri elde etmek için 0.425 mm'den küçük agregalar yüksek enerjili bilyeli öğütücü (Şekil 15) ile öğütülüp filler boyutuna getirilmiştir.

Bilyeli öğütme, oda sıcaklığı ve hava atmosferinde gerçekleştirilir. Öğütme işlemi için zirkonyum oksit veya çelik toplar kullanılır. İşlem sırasında aşırı ısınmayı önlemek için öğütücü bir süre çalıştırılır ve bir müddet aradan sonra zıt yönde tekrar çalışmasına devam ettirilir (Kütük ve Kütük-Sert, 2017). Bu çalışma için 22 mm çapında ve 32 gr

ağırlığında 5 adet çelik bilye ile çelik hazne tercih edilmiştir. Öğütücü 5 dakikalık ara ile toplam 13 dakika, 400 rpm hızla çalıştırılarak deniz kabuğu filleri elde edilmiştir. Elde edilen fillerden bir görüntü Şekil 16’da sunulmuştur.



Şekil 15. Yüksek enerjili bilyalı öğütücü



Şekil 16. Deniz kabuğu filleri

Çalışmada kontrol grubu hariç deniz kabuğu agregası içeren 5 tip karışım hazırlanmıştır. Her karışım toplam %5 oranında deniz kabuğu agregası içermektedir. İlk tip karışım 0.425 mm’den küçük deniz kabuğu agregası, ikinci tip karışım 0.18 mm’den küçük deniz kabuğu agregası ve üçüncü tip karışım ise deniz kabuğu filleri kullanılarak hazırlanmıştır. Diğer iki grup karışım, deniz kabuğu fillерinin farklı katılma yöntemlerine göre karışıma eklenmesiyle hazırlanmıştır. Bir grup karışım kuru deniz kabuğu fillерinin ıslak agregaya eklenmesiyle, diğer grup karışım ise bazalt agregası ve deniz kabuğu

fillerinin hamur kıvamında karıştırılarak eklenmesiyle hazırlanmıştır. Hazırlanan hamur kıvamındaki agrega harcı ve ıslak agrega Şekil 17’de görülmektedir.



Şekil 17. (a) hamur kıvamındaki agrega harcı, (b) ıslak agrega karışımı

Deniz kabuğu agregalarının karışımlarda kullanılma oranları Tablo 15’te ve kimyasal içeriği Tablo 16’da verilmiştir.

Tablo 15. 1150 gr agrega içerisinde kullanılan deniz kabuğu agregası miktarı

Karışım Grubu	No. 40 (0.425 mm)		No. 80 (0.18 mm)		No. 200 (0.075 mm)		Toplam katılma oranı (%)
	gr	%	gr	%	gr	%	
1. Grup	14.4	1.25	7.2	0.63	35.9	3.12	5
2. Grup			9.5	0.83	48	4.17	5
3. Grup					57.5	5	5

Tablo 16. Deniz kabuklarının kimyasal analiz sonucu

Bileşik/Element	Formül	Değerler (%)
Kalsiyum oksit	CaO	59.22
Silisyum dioksit	SiO ₂	0.77
Stronsiyum oksit	SrO	0.17
Fosfor pentoksit	P ₂ O ₅	0.36
Demir oksit	Fe ₂ O ₃	0.105
Mangan oksit	MnO	0.014

2.2.4. Selülozik Elyaf ve Özellikleri

Taş mastik asfalt karışımlara, bitüm oranı yüksek olduğu için, agregaların arasından bitüm süzülmesini önlemek amacıyla elyaf katılır. Karayolları Teknik Şartnamesi'nin öngördüğü şekilde tüm karışımlarda %3 oranında VIATOP Premium® marka selülozik elyaf kullanılmıştır. Kullanılan selülozik elyafın özellikleri Tablo 17'de verilmiştir.

Tablo 17. Selülozik elyafın özellikleri

Özellik	Değer
Selüloz İçeriği (%)	66.7
Bitüm İçeriği (%)	33.3
Parlama Sıcaklığı (°C)	~500
Yoğunluk (gram/litre)	480-530
Ortalama Partikül Kalınlığı (mm)	4±1
Ortalama Partikül Boyutu, (mm)	2-8

2.3. Karışım Tasarımları

Bitümlü sıcak karışımların tasarımında kullanılan Marshall tasarım metodu, bitüm mühendisi Bruce Marshall tarafından formüle edilmiş, American Society for Testing and Materials (ASTM) tarafından ise standart haline getirilmiştir. ASTM D 1559'da metot, Marshall aleti kullanılarak bitümlü karışımın plastik akmaya karşı direnci olarak tanımlanmış ve aynı şekliyle Türk standardı olan TS 3720'de yer almıştır. Marshall tasarım metodu, yalnızca maksimum boyutu 25 mm veya daha küçük agrega içeren ve penetrasyon veya viskozite değerine göre sınıflandırılmış asfalt çimentolu sıcak karışım kaplama asfaltlarına uygulanır. Metot sıcak karışım asfalt kaplamaların laboratuvar tasarımı için geliştirilmiştir (Yıldız, 2003).

Marshall yöntemi, eksik yönleri olduğu halde belki de dünyanın en yaygın olarak kullanılan karışım tasarımı yöntemidir. Bu yaygın kullanımın nedeni yöntemin şu avantajları gösterilebilir (Kaya ve Topal, 2016):

- Yöntem numunenin belirli bir kısmına değil, tamamına gerilme uygulayacak şekilde tasarlanmıştır.
- Tasarım minimum çaba ile hızlı bir şekilde yapılmaya müsaittir.

- Numuneler küçük, hafif ve taşınabilir.
- Laboratuvarda üretilen numunelerin özellikleri gerçeğe oldukça yakın sonuçlar vermektedir.

Çalışmada, tanıtılan malzemeler kullanılarak ve Karayolları Teknik Şartnamesi (KGM, 2013) esas alınarak taş mastik asfalt tasarımı yapılmıştır. Sadece bazalt agregası içeren kontrol grubundan elde edilen sonuçlarla optimum bitüm içeriği, tüm karışım türleri için, %6.65 olarak belirlenmiştir. Tasarım sonuçları Tablo 18’de verilmiştir.

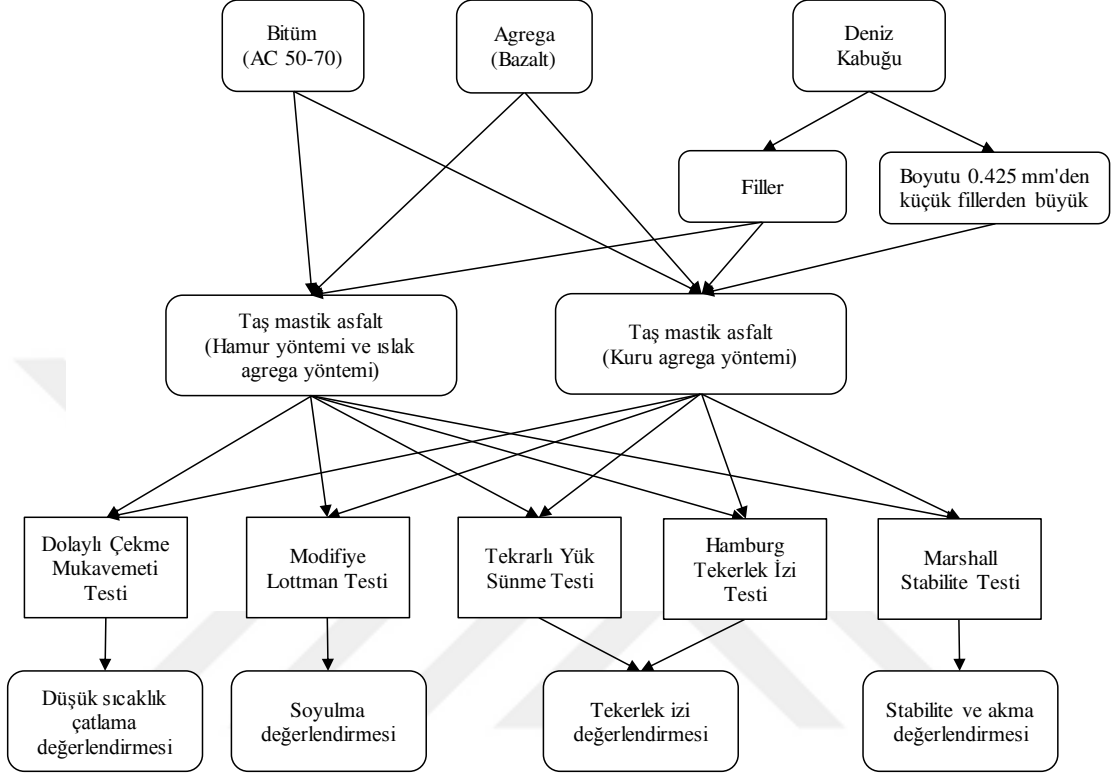
Tablo 18. TMA Aşınma TİP-1 A tasarım sonuçları

Tasarım Parametreleri	Şartname Limitleri	TMA Aşınma TİP-1 A
Darbe sayısı, her bir yüze	50	50
Yoğunluk (gr/cm ³)		2.381
Marshall stabilitesi (kg)		3337.8
Hava boşluğu (V _h , %)	2-4	2.983
Asfaltla dolu boşluk (V _f , %)		85.128
Akma (mm)		3.287
Bitüm içeriği (W _a , %)	En az 5.8	6.65
VMA (%)	En az 16	19.928
Elyaf miktarı (%)	0.3-1.0	0.3
Schellenberg bitüm süzülme değeri (%)	En fazla 0.3	0.19

2.4. Metot

Çalışmada kullanılmak üzere belirlenen malzemelerle ve karışım tasarımı sonucu elde edilen optimum bitüm içeriğinde üretilen numunelerin özelliklerini belirlemek üzere laboratuvar testleri yapılmıştır. Asfalt karışımlara uygulanan laboratuvar testleri genel olarak kaplamanın farklı sıcaklıklardaki davranışlarını incelemek üzere yapılmaktadır. Çalışmada hazırlanan taş mastik asfalt karışımlara kaplamanın su hasarını belirlemek amacıyla modifiye Lottman testi, kaplamanın düşük sıcaklıklarda göstereceği çatlama direncinin tespiti için dolaylı çekme mukavemeti testi yapılmıştır. Ayrıca karışımların stabilite ve akma değerlerini belirlemek amacıyla Marshall stabilite ve tekerlek izi potansiyelini öngörmek amacıyla tekrarlı yük sünme ve Hamburg tekerlek izi testi yapılmıştır. Tekrarlı yük sünme testi hariç bütün testler koşullu numunelere yapılmış,

koşullama yöntemi olarak AASHTO T 283 (modifiye Lottman) koşullaması kullanılmıştır. Yapılan çalışmanın deneysel akış diyagramı Şekil 18’de verilmiştir.



Şekil 18. Deneysel akış diyagramı

2.4.1. Modifiye Lottman (AASHTO T 283) Testi

Bitümlü sıcak karışımların neme duyarlılığını belirlemek amacıyla birçok laboratuvar testi geliştirilmiştir. Laboratuvar testleri saha koşullarını tam olarak yansıtamaz ancak faydalı bilgiler sağlayabilir. Su hasarının değerlendirilmesi için geliştirilmiş olan bu testler hem agrega yüzeyinden bitümün sıyrılmasını hem de sıkıştırılmış bitümlü sıcak karışım numunelerinin dayanım kaybını inceler (Liang, 2008).

Bu testlerden biri olan Lottman prosedüründe örnekler vakumlandıktan ve bir donma-çözünme döngüsünden sonra koşullu olarak test edilir. Koşullandırılmış örneklerden elde edilen test değerlerinin koşulsuz örneklerden elde edilen değerlere bölünmesiyle indirekt çekme mukavemeti oranı (ITSR) elde edilir. Değerler 0.70 ila 0.75 arasındayken soyulma ve soyulmama konusunda farklılaşma olduğunu belirten Lottman,

0.70'den daha büyük bir oran önermektedir. Lottman prosedürünün vakumlandıktan sonra dondurma, ardından sıcak suda çözülme sırasında gelişen iç su basınçları nedeniyle çok şiddetli olduğu iddia edilmiştir (Hicks, 1991).

Çalışmada kullanılmak üzere her karışım grubundan 6 adet Marshall briketi üretilmiştir. Her gruptan üç tane numune koşullandırılarak, üç tane numune ise koşullandırılmadan test edilmiştir. Koşullandırılacak numuneler vakumlu piknometre ile %70-80 oranında suya doygunluğa ulaştırılmıştır. Suyu doymun hale gelen numuneler herhangi bir su kaybı yaşanmaması için streç filmle sarılmış, -18°C 'deki soğutucuya yerleştirilmiş ve 16 saat süre ile bekletilmiştir. Donma sürecini tamamlayan numuneler vakit kaybetmeden 60°C 'deki su banyosuna alınmıştır. Numuneler su banyosunda 24 saat süre ile bekletilmiş ve herhangi bir deformasyona uğramamaları için su boşaltılıp sıcaklığın düşmesi beklenmeden bir işleme tabi tutulmamıştır. Çalışmada kullanılan vakumlu piknometre Şekil 19'da, donma-çözünme döngüsündeki numunelerden bir örnek ise Şekil 20'de verilmiştir.



Şekil 19. Vakumlu piknometre



Şekil 20. Donma-çözünme döngüsü uygulanmış numuneler

Koşullandırılmış numuneler 25°C'deki su banyosunda 2 saat bekletilmiş ardından dolaylı çekme mukavemeti testine tabi tutulmuştur. Koşullandırmadan test edilmek üzere ayrılan numuneler de aynı şekilde 25°C'de su banyosunda 2 saat bekletilmiş ve test edilmiştir. Dolaylı çekme mukavemeti testine göre maksimum yük kN cinsinden elde edilmiş ve Formül 1 kullanılarak elde edilen değerler kPa cinsine çevrilmiştir.

$$ITS = \frac{2000 \times P_{\max}}{\pi \times h \times D} \quad (1)$$

Formül 1'de; ITS: kPa cinsinden dolaylı çekme mukavemetini, $P_{\max}$: N cinsinden maksimum yükü, h: mm cinsinden ortalama kalınlığı ve D: mm cinsinden çapı ifade etmektedir. Koşullandırılmış numunelerden elde edilen sonuçlar ile koşullandırılmamış numunelerden elde edilen sonuçlar kullanılarak dolaylı çekme mukavemeti oranları (ITSR) elde edilir. Karayolları Teknik Şartnamesi'ne göre (KGM, 2013) bu oran 0.80 veya üzerinde olmalıdır. Bu oranın altında kalanlar su hasarına karşı dirençsiz kabul edilir.

$$ITSR = \frac{\text{Koşullu numunelerin ortalama ITS değerleri}}{\text{Koşulsuz numunelerin ortalama ITS değerleri}} \quad (2)$$

Koşullu ve koşulsuz örneklerin ortalama yükseklikleri ve dolaylı çekme mukavemeti değerleri Tablo 19 ile Tablo 20'de, örneklerin ortalama dolaylı çekme mukavemeti değerleri ve bu değerler kullanılarak Formül 2 ile elde edilen ITSR değerleri Tablo 21'de verilmiştir.

Tablo 19. Koşullu örneklerin dolaylı çekme mukavemeti değerleri (kPa)

Karışım	Örnek No.	Ortalama Yükseklik (mm)	ITS (kPa)	Ortalama ITS (kPa)
Kontrol (Bazalt)	1	63.58	840.09	825.90
	2	63.49	808.65	
	3	64.74	828.95	
Bazalt/0.425DK	1	66.54	939.38	961.06
	2	64.63	1034.94	
	3	63.39	908.87	
Bazalt/0.180DK	1	64.67	944.20	856.57
	2	65.05	865.48	
	3	65.58	760.02	
Bazalt/0.075DK	1	65.02	874.51	920.62
	2	65.26	935.61	
	3	64.88	951.72	
Bazalt/0.075DK (Nemli agregası)	1	63.97	921.26	966.65
	2	64.57	1053.38	
	3	64.09	925.31	
Bazalt/0.075DK (Hamur yöntemi)	1	64.03	851.85	833.66
	2	66.76	755.04	
	3	64.37	894.10	

Tablo 20. Koşulsuz örneklerin dolaylı çekme mukavemeti değerleri (kPa)

Karışım	Örnek No.	Ortalama Yükseklik (mm)	ITS (kPa)	Ortalama ITS (kPa)
Kontrol (Bazalt)	1	62.18	1087.87	1104.61
	2	60.28	1100.32	
	3	60.65	1125.65	
Bazalt/0.425DK	1	62.01	1167.75	1268.14
	2	64.31	1271.24	
	3	60.15	1365.42	
Bazalt/0.180DK	1	65.42	1037.83	1154.95
	2	64.31	1159.13	
	3	62.45	1267.88	
Bazalt/0.075DK	1	63.62	1160.74	1207.71
	2	64.49	1264.71	
	3	64.17	1197.68	
Bazalt/0.075DK (Nemli agregası)	1	64.27	1260.33	1190.12
	2	64.78	1134.21	
	3	65.47	1175.82	
Bazalt/0.075DK (Hamur yöntemi)	1	65.63	1092.72	1063.51
	2	65.22	1162.06	
	3	65.25	935.76	

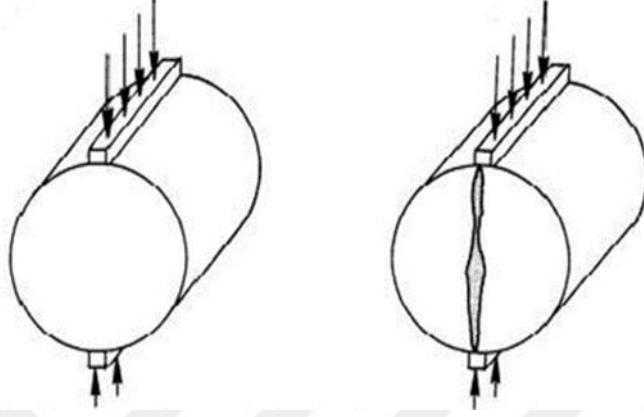
Tablo 21. Koşullu ve koşulsuz örneklerin ortalama dolaylı çekme mukavemeti değerleri ve dolaylı çekme mukavemeti oranları (ITSR)

Karışım	Koşullu Ortalama ITS (kPa)	Koşulsuz Ortalama ITS (kPa)	ITSR (%)
Kontrol (Bazalt)	825.90	1104.61	74.77
Bazalt/0.425DK	961.06	1268.14	75.79
Bazalt/0.180DK	856.57	1154.95	74.17
Bazalt/0.075DK	920.62	1207.71	76.23
Bazalt/0.075DK (Nemli agregası)	966.65	1190.12	81.22
Bazalt/0.075DK (Hamur yöntemi)	833.66	1063.51	78.39

2.4.2. Dolaylı Çekme Mukavemeti Testi

Dolaylı çekme mukavemeti testinde, asfalt numunelere, numunelerin dikey çap düzlemi boyunca ve bu düzleme paralel olacak şekilde tek bir basınç kuvveti uygulanır. Bu

basınç kuvveti, uygulanan yükün yönüne dik ve dikey çap düzlemi boyunca nispeten eşit bir çekme gerilimi oluşturur, bu gerilim de numunenin dikey çap boyunca çatlamasına neden olur (Tran ve Loon, 2009).



Şekil 21. Dolaylı çekme mukavemeti testi, yükleme anı (solda) deformasyonun oluşması (sağda) (Srinivasan, 2004).

Bu çalışmada her bir karışım grubundan 3 örnek kullanılmıştır. Örnekler donma-çözünme döngüsüne tabi tutulup ardından 0°C soğutucuda 6-7 saat süreyle bekletilmiştir. Bu şekilde içsel sıcaklığı 0°C 'ye ulaşan numuneler bekletilmeden Marshall stabilite deney aleti ve dolaylı çekme mukavemeti deney (ASTM D4123) ekipmanları kullanılarak test edilmiştir. Test sonucu elde edilen ortalama kalınlıklar ve dolaylı çekme mukavemeti değerleri Tablo 22'de verilmiştir.



Şekil 22. Dolaylı çekme mukavemeti test cihazı

Tablo 22. Karışımların dolaylı çekme mukavemeti değerleri (kPa)

Karışım	Örnek No.	Ortalama Yükseklik (mm)	ITS (kPa)	Ortalama ITS (kPa)
Kontrol (Bazalt)	1	65.03	3091.82	3296.56
	2	65.27	3018.67	
	3	64.35	3779.20	
Bazalt/0.425DK	1	64.13	2950.14	3397.56
	2	63.95	3911.66	
	3	64.82	3330.89	
Bazalt/0.180DK	1	63.34	3392.71	3573.39
	2	64.25	3307.75	
	3	64.29	4019.70	
Bazalt/0.075DK	1	65.08	3508.14	3548.22
	2	65.35	3845.13	
	3	63.96	3291.39	
Bazalt/0.075DK (Nemli agregası)	1	64.99	2847.44	2778.92
	2	65.11	2968.47	
	3	64.88	2520.85	
Bazalt/0.075DK (Hamur yöntemi)	1	64.41	2330.12	2840.07
	2	65.31	2991.86	
	3	64.82	3198.23	

2.4.3. Marshall Stabilite Testi

Sıcak asfalt karışımların Marshall stabilitesi, kaplamanın trafik yükü altındaki tekerlek izi oluşumuna ve ötelenme direncine karşı yeteneğini yansıtır. Marshall testi ile elde edilen bir diğer değer olan akma ise, kaplamanın çatlamaksızın alt tabakadaki hareketlere ve yavaş oturmalarla karşı kendisini ayarlama yeteneğidir. Akma, stabiliteye karşıt bir özellik olarak göz önünde bulundurulur. Stabilitenin (kN) akmaya (mm) oranı olarak hesaplanan Marshall oranı (MQ) (kN/mm), belirli koşullar altında yükün deformasyona oranına yakın bir değerini simgeleyerek servis esnasında kalıcı deformasyona karşı malzemenin direncinin bir ölçüsüdür (Ahmedzade vd., 2007).

Çalışmada, Marshall stabilite testi uygulamak amacıyla, her bir karışım grubundan üçer numune koşullandırılmıştır. Donma-çözülme döngüsünün ardından numuneler iç sıcaklıkları 25°C'ye gelene kadar, su banyosunda 2 saat süreyle bekletilmiştir. Ardından numuneler, üçer adet yükseklik ölçüsü alındıktan sonra, Marshall stabilite ve akma deney aleti ile teste tabi tutulmuştur. Bu amaçla kullanılan Marshall stabilite ve akma deney aleti Şekil 23'te gösterilmiştir.



Şekil 23. Marshall stabilite ve akma deney aleti

Numunelerin yüksekliklerine göre stabilite değerlerinin düzeltilmesi gerekir. Marshall metodunda standart briket yüksekliği 63.5mm'dir ve stabilite değeri bu yüksekliğe göre değerlendirilir. Standart briket yüksekliğine denk gelen katsayı 1'dir. Yüksekliğin 63.5 mm'den büyük olduğu durumlarda katsayı azalır ve 63.5 mm'den küçük olduğunda katsayı artar. Briketin ölçülen stabilitesi ile numunenin yüksekliğine bağlı katsayının çarpılması, standart olan yüksekliğin standart brikete göre düzeltilmiş stabilite değerini verir (Aminbakhsh, 2013). Karışımların düzeltilmiş stabilite ve akma değerleri ile stabilite değerinin akma değerine bölünmesiyle elde edilen Marshall oranları Tablo 23'te verilmiştir.

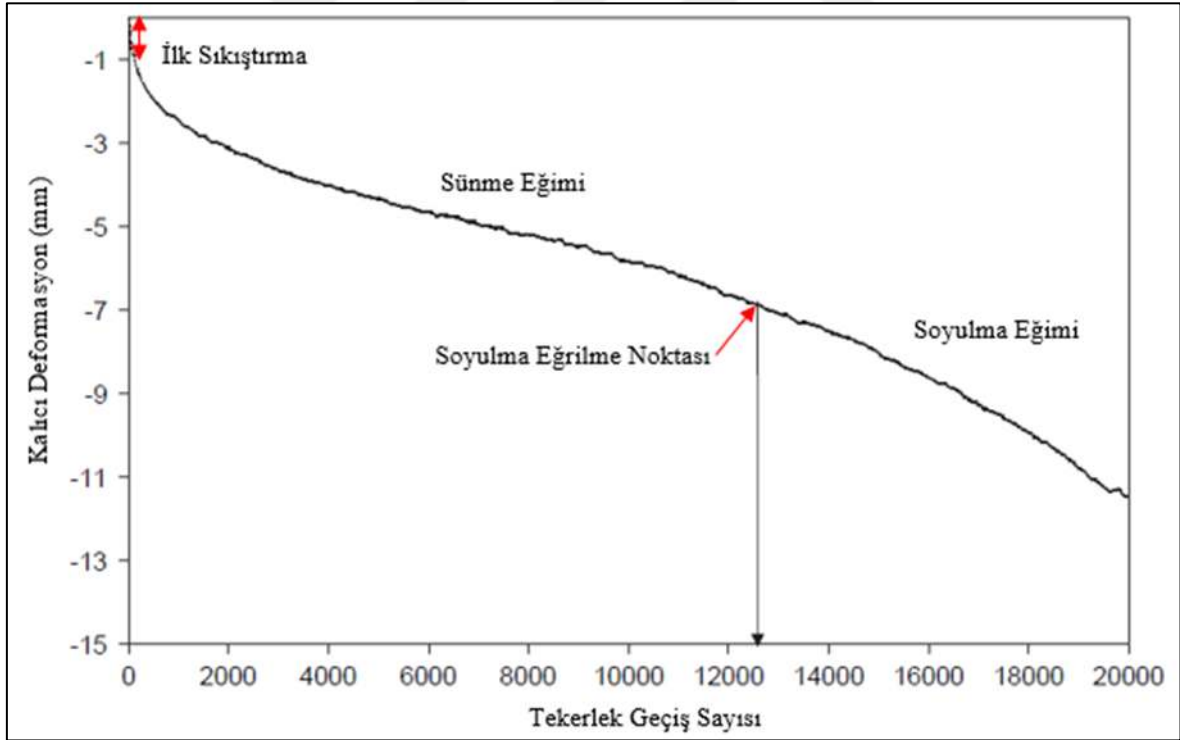
Tablo 23. Karışımların düzeltilmiş stabilite (kN), akma (mm) değerleri ve Marshall oranları

Karışım	Örnek No.	Akma (mm)	Ortalama Akma (mm)	Stabilite (kN)	Ortalama Stabilite (kN)	Marshall Oranı (MQ)
Kontrol (Bazalt)	1	13.36	12.20	35.81	43.06	3.53
	2	4.54		31.38		
	3	18.7		61.99		
Bazalt/0.425DK	1	20.28	13.20	54.82	42.25	3.20
	2	10.74		32.74		
	3	8.59		39.20		
Bazalt/0.180DK	1	6.72	12.39	39.52	45.09	3.64
	2	10.14		36.05		
	3	20.3		59.72		
Bazalt/0.075DK	1	6.44	7.99	38.11	38.70	4.85
	2	5.23		39.90		
	3	12.29		38.10		
Bazalt/0.075DK (Nemli agregası)	1	4.85	5.17	34.61	36.05	6.97
	2	4.37		36.52		
	3	6.3		37.01		
Bazalt/0.075DK (Hamur yöntemi)	1	20.61	11.19	59.33	44.19	3.95
	2	7.5		38.13		
	3	5.47		35.10		

2.4.4. Hamburg Tekerlek İzi Testi (HWTT)

Hamburg tekerlek izi test cihazı 1970'lerde Almanya'nın Hamburg şehrinde, limanlarda kullanılan ağır ve yavaş kamyonların kaplamalara verdiği hasarı önlemek için hazırlanan şartnamede kullanılmak üzere geliştirilmiştir. Test ile başlangıçta kaplamanın tekerlek izine duyarlılığını ölçmek amaçlanmış, ancak daha sonra bu test ile su hasarının etkilerinin de tespit edilebileceği keşfedilmiştir (Lu ve Harvey, 2006).

Eş zamanlı olarak bir çift numune test edilir. Bir örnek 260 mm genişliğinde, 320 mm uzunluğunda, 40 mm derinliğinde ve 7.5 kg ağırlığında olmalı, $\pm 1\%$ hava boşluğu ihtiva etmelidir. 47 mm derinliğindeki çelik tekerlek, dakikada 50 geçiş yaparak, örnekleri 705 N yük ile yükleyebilir. Tekerleğin maksimum hızı, örneğin merkezinde, 340 mm/dk'dır. Her örnek 20 mm'lik deformasyon gözlemlenene kadar ya da 20000 tekerlek geçişi ile yüklenir (Aschenbrener vd., 1994).



Şekil 24. Şematik Hamburg tekerlek izi test eğrisi (Lu ve Harvey, 2006).

Hamburg tekerlek izi testi ile elde edilen sonuçlar, Şekil 24'te gösterildiği üzere sünme eğimini, soyulma eğimini ve soyulma eğrilme noktasını içerir. Sünme eğimi, ilk

sıkıştırırmadan sonra ve eğer soyulma varsa soyulma başlamadan önce, deformasyon eğrisinin lineer bölgesinin içinde, deformasyon oranının tersini gösterir. Soyulma eğimi ise soyulma başladıktan sonra, deformasyon eğrisinin lineer bölgesinin içinde, deformasyon oranının tersini gösterir. Soyulma eğrilme (büküm) noktası sünme eğimi ve soyulma eğiminin kesiştiği noktadaki tekerlek geçiş sayısıdır. Bu değer hasara neden olan suya karşı bitümlü sıcak karışım briketlerinin nispi direncini tahmin etmede kullanılmaktadır (Cooley vd., 2000).

Bu çalışmada Hamburg Tekerlek İzi Testi, AASHTO T324 standardına uygun olarak yapılmıştır. Numuneler her bir karışım grubundan ikişer adet olmak üzere 150 mm (6 inç) çapında hazırlanmış, hazırlanan numuneler asfalt testeresi ile düzgün bir şekilde kesilerek test cihazı kalıbına yerleştirilmiştir. Numuneler su dolu kabin içerisinde test edilmiştir. Deney parametreleri Tablo 24’te ve Hamburg tekerlek izi test cihazı Şekil 25’te verilmiştir.

Tablo 24. Hamburg tekerlek izi deneyinde uygulanan parametreler

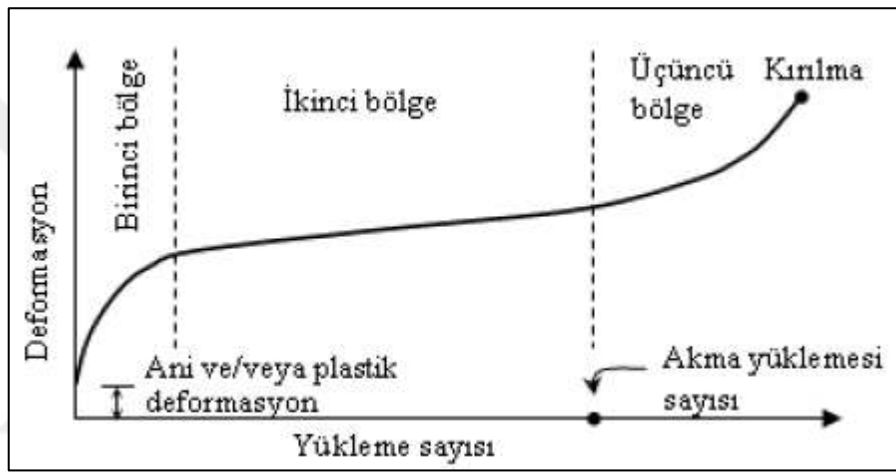
Deney ölçütü	Değer
Deney sıcaklığı (°C)	50
Deneyi sonlandıran tekerlek izi derinliği (mm)	20
Tekerlek geçiş hızı (döngü/dakika)	26
Maksimum geçiş sayısı	20000
Suda bekletme süresi (dak.)	30
Koşullama tekerlek geçiş sayısı	5



Şekil 25. Hamburg tekerlek izi test cihazı

2.4.5. Tekrarlı Yük Sünme Testi (RCT)

Akma yükleme sayısı veya tekrarlı sünme deneyi olarak da bilinen tekrarlı yük sünme deneyi, kaplama malzemelerinin kalıcı deformasyon özelliklerini belirlemek için yapılır. Deneyde numune üzerine birkaç bin yük tekrerrüğü uygulanır ve deney boyunca oluşan kalıcı deformasyonların yük tekrerrüğünün bir fonksiyonu halinde yığışımli olarak kaydedilir. Tekrarlı yük sünme deneyinin en önemli özelliklerinden biri üçüncül akma noktasının da tespit edilebilmesidir (İskender ve Aksoy, 2013).



Şekil 26. Asfalt betonunun tekrarlı yük altında sünme davranışı

Şekil 26'da kümülatif kalıcı deformasyon ile yük tekrerrüğü arasındaki ilişkiyi ifade eden eğri görülmektedir. Kümülatif kalıcı deformasyon eğrisi olarak adlandırılan bu eğri genellikle birinci, ikinci ve üçüncü bölge şeklinde üç bölge olarak ifade edilmektedir. Birinci bölgede kalıcı deformasyon hızlı bir şekilde birikir ve eğer yük kaldırılmazsa malzeme azalan oranda bozulmaya devam eder. İkinci bölgede kalıcı deformasyondaki artış sabitken deformasyon eğrisinin eğimi de sabittir ve bu bölgedeki bozulmalar geri dönüşümsüzdür. Üçüncü bölgede, kalıcı deformasyonun artış hızı tekrar artar ve kalıcı deformasyon hızla birikir. Üçüncü bölgenin başladığı yerdeki yükleme sayısı, akma yükleme sayısı (flow number) olarak ifade edilmektedir (İskender, 2008).

Bu çalışmada her bir karışım grubundan üçer adet numune EN-12697-25(A) standardına uygun olacak şekilde Tekrarlı Yük Sünme Testine tabi tutulmuştur. Numuneler iç sıcaklıkları 40°C'ye ulaşınca kadar 24 saat test cihazında bekletilip koşulsuz olarak

test edilmiştir. Deney parametreleri Tablo 25’te, deney sonucu elde edilen ortalama deformasyon değerleri Tablo 26’da ve tekrarlı yük sünme deney düzeneği Şekil 27’de verilmiştir.

Tablo 25. Tekrarlı yük sünme deneyinde uygulanan parametreler

Deney ölçütü	Değer
Deney sıcaklığı (°C)	40
Koşullandırma gerilmesi (kPa)	3
Koşullandırma gerilmesi uygulama süresi (dak.)	2
Deney yükleme gerilmesi (kPa)	95
Frekans (Hz)	0.5
Deneyi sonlandıran vuruş sayısı	12000



Şekil 27. Tekrarlı yük sünme deney düzeneği

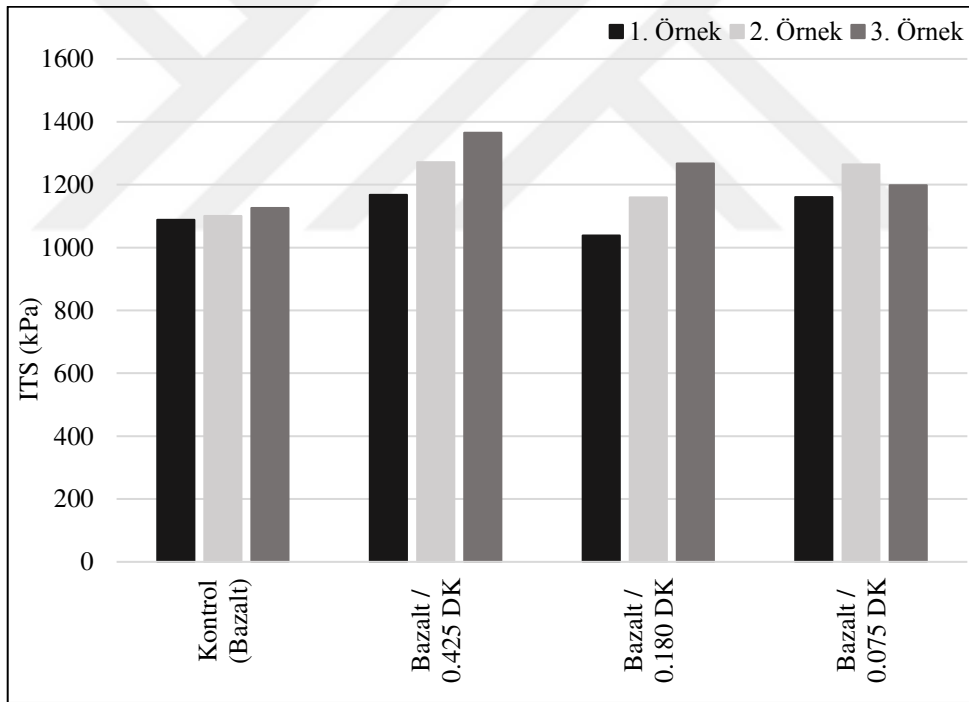
Tablo 26. Karışımların ortalama deformasyon değerleri

Yük Tekerrür Sayısı	Kontrol (Bazalt)	Bazalt/ 0.425DK	Bazalt/ 0.180DK	Bazalt/ 0.075DK	Bazalt/ 0.075DK (Nemli agrega)	Bazalt/ 0.075DK (Hamur yöntemi)
2	0.582982	0.547876	0.681258	0.617506	0.465464	0.432582
20	0.767541	0.739395	0.853402	0.768496	0.572223	0.55094
100	0.940533	0.913519	1.003918	0.895797	0.662092	0.65305
250	1.060427	1.031164	1.103327	0.97762	0.71983	0.719687
500	1.163628	1.130541	1.186167	1.044519	0.767034	0.774713
1000	1.279231	1.239897	1.27632	1.116062	0.81752	0.834073
1500	1.353276	1.308907	1.33274	1.160195	0.848669	0.870944
2000	1.408944	1.360281	1.374529	1.192577	0.871527	0.898116
4000	1.554728	1.492853	1.481616	1.274416	0.929311	0.967224
6000	1.648345	1.576563	1.548736	1.324905	0.964973	1.01016
8000	1.71884	1.638904	1.598498	1.361953	0.991147	1.041807
10000	1.775989	1.689022	1.638374	1.391412	1.011964	1.067055
12000	1.824357	1.731154	1.671812	1.415961	1.029315	1.08815

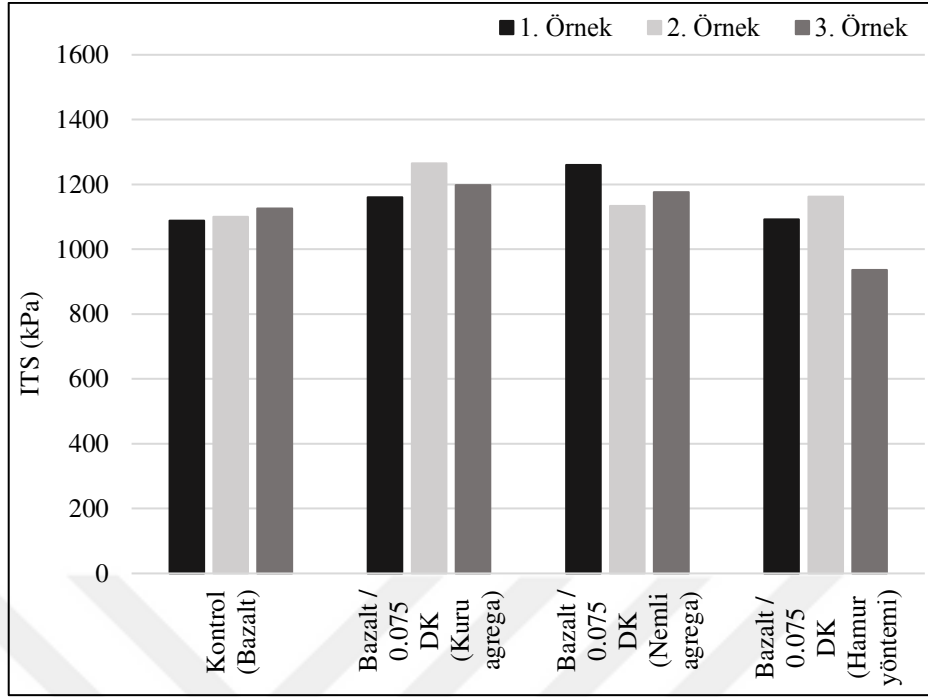
3. BULGULAR VE İRDELEME

3.1. Modifiye Lottman (AASHTO T 283) Testine Ait Bulgular ve İrdeleme

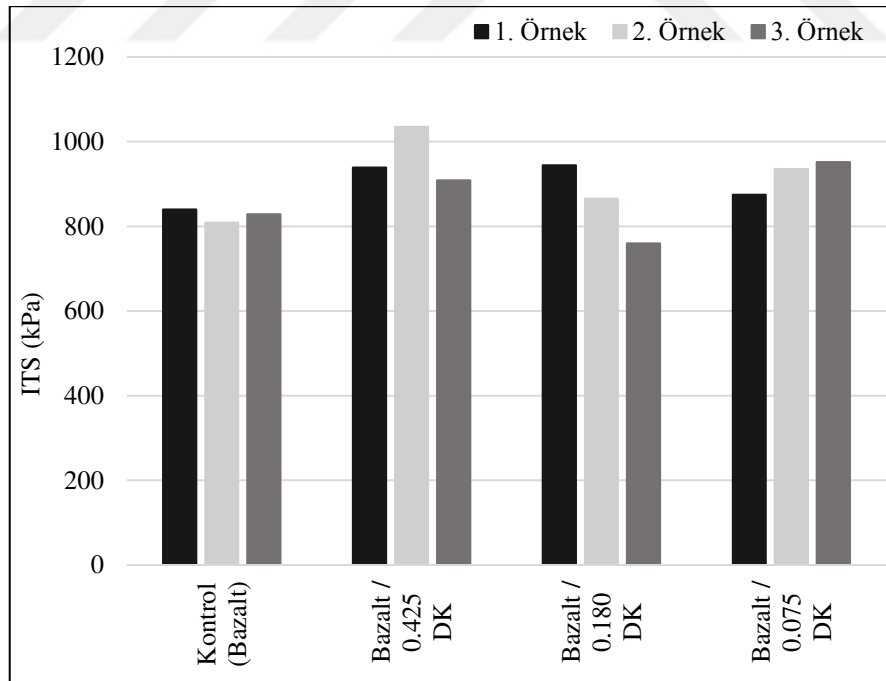
Modifiye Lottman testi, hazırlanan taş mastik asfalt karışımların su hasarına karşı dirençlerini belirlemek için kullanılmıştır. Her karışım türünden, üçer numune koşullandırılarak üçer numune ise koşullandırılmadan dolayıly çekme mukavemeti testine tabi tutulmuştur. Üçlü numune gruplarının test sonuçlarının ortalaması alınarak, ITSR değerleri hesaplanmıştır. Koşulsuz ve koşullu örneklerin dolayıly çekme mukavemeti değerleri Şekil 28-31’de, ortalama dolayıly çekme mukavemeti değerleri Şekil 32-35’te verilmiştir.



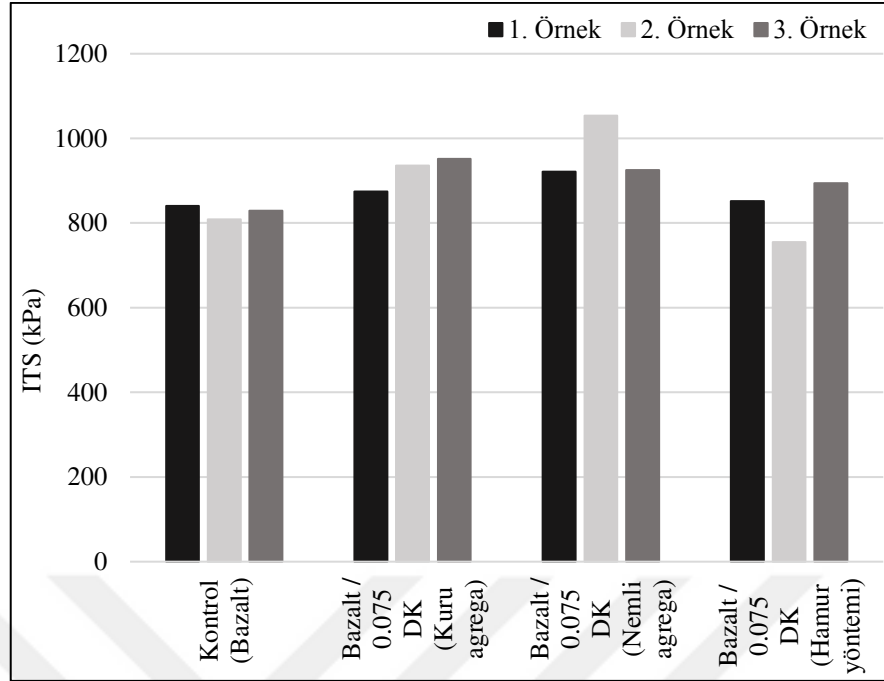
Şekil 28. Farklı boyutlarda deniz kabuğu agregası içeren koşulsuz örneklerin dolayıly çekme mukavemeti değerleri (kPa)



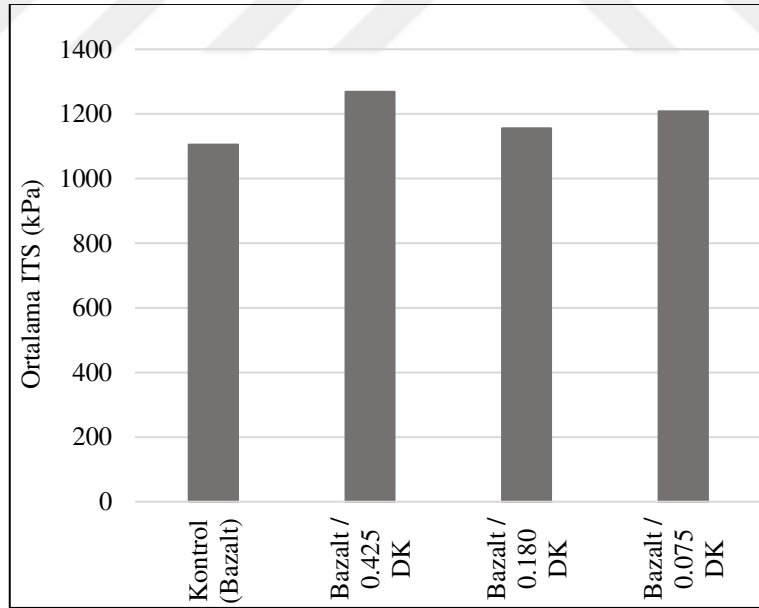
Şekil 29. Deniz kabuğu filleri ile farklı katılma yöntemlerine göre hazırlanan koşulsuz örneklerin dolaylı çekme mukavemeti değerleri (kPa)



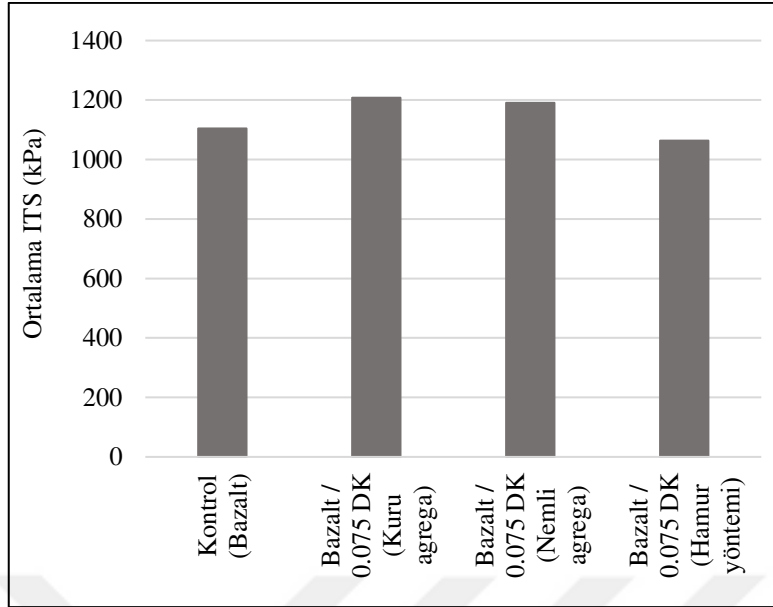
Şekil 30. Farklı boyutlarda deniz kabuğu agregası içeren koşullu örneklerin dolaylı çekme mukavemeti değerleri (kPa)



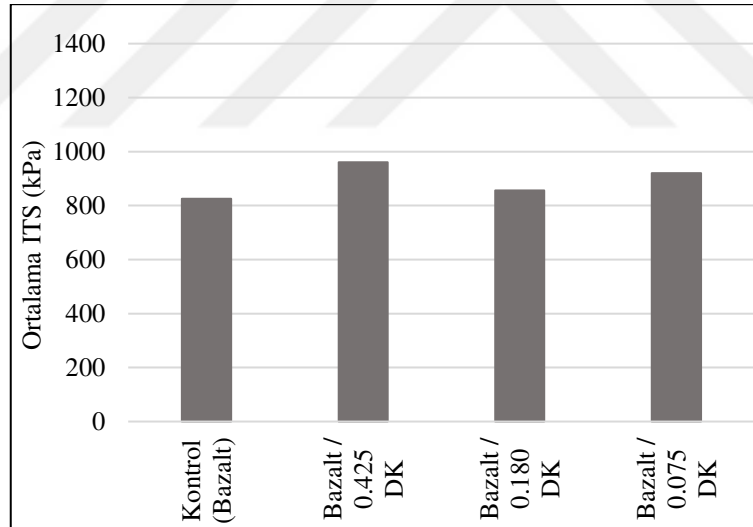
Şekil 31. Deniz kabuğu filleri ile farklı katılma yöntemlerine göre hazırlanan koşullu örneklerin dolaylı çekme mukavemeti değerleri (kPa)



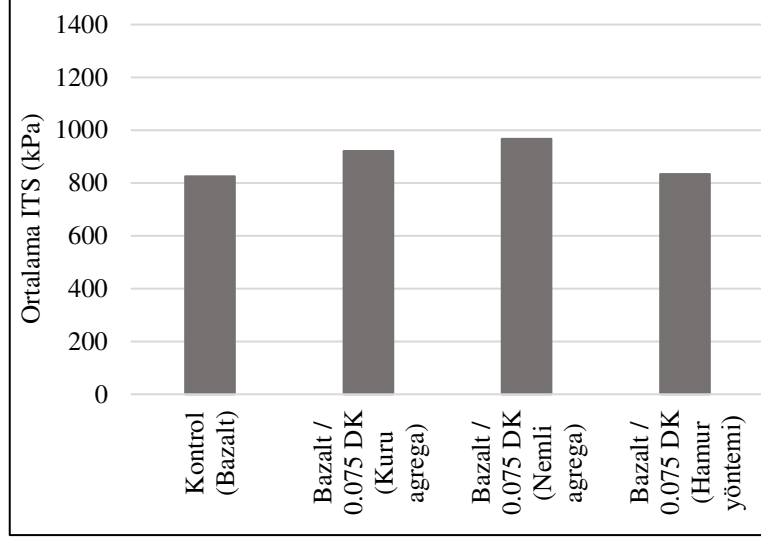
Şekil 32. Farklı boyutlarda deniz kabuğu agregası içeren koşulsuz örneklerin ortalama çekme mukavemeti değerleri (kPa)



Şekil 33. Deniz kabuğu filleri ile farklı katılma yöntemlerine göre hazırlanan koşulsuz örneklerin ortalama çekme mukavemeti değerleri (kPa)



Şekil 34. Farklı boyutlarda deniz kabuğu agregası içeren koşullu örneklerin ortalama çekme mukavemeti değerleri (kPa)



Şekil 35. Deniz kabuğu filleri ile farklı katılma yöntemlerine göre hazırlanan koşullu örneklerin ortalama çekme mukavemeti değerleri (kPa)

Şekil 32. incelendiğinde, koşulsuz örneklerde, 0.425 mm'den küçük deniz kabuğu agregası içeren karışımda, en yüksek ortalama dolaylı çekme mukavemeti değerinin elde edildiği görülmektedir. Elde edilen değerler deniz kabuğu agregası boyutuyla orantılı olarak artıp azalmamış, ikinci en yüksek değer 0.075 mm'den küçük deniz kabuğu filleri içeren karışımdan elde edilmiştir. Şekil 33. incelendiğinde, koşulsuz örneklerde, farklı katılma yöntemlerine göre hazırlanan karışım gruplarında, en yüksek ortalama çekme mukavemeti değerini kuru agrega yöntemi ile hazırlanan grup vermiştir. Ardından bu değeri sırasıyla nemli agrega yöntemi ile hazırlanan karışım grubu, kontrol grubu ve hamur yöntemi ile hazırlanan karışım grubundan elde edilen değerler takip etmiştir. Tüm gruplar bir arada incelendiğinde, koşulsuz örneklerde, en yüksek ortalama çekme mukavemeti değeri 0.425 mm'den küçük deniz kabuğu agregası içeren karışım grubunda, en düşük ortalama çekme mukavemeti değeri ise hamur yöntemi ile hazırlanan karışım grubunda görülmüştür.

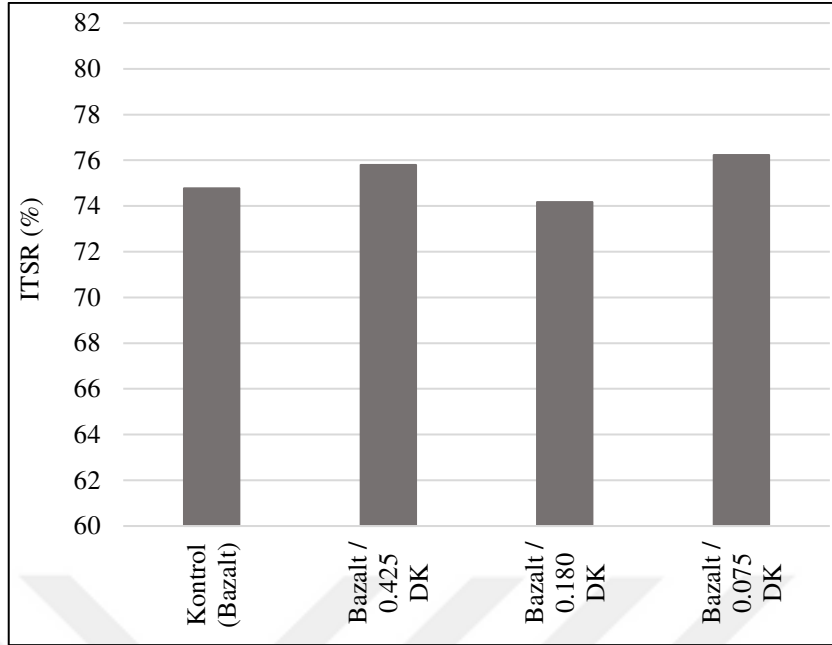
Şekil 34. incelendiğinde, koşullu örneklerde, en yüksek ortalama çekme mukavemeti değeri 0.425 mm'den küçük deniz kabuğu agregası içeren karışımdan elde edilmiştir. Koşulsuz örneklerle benzer şekilde katkı boyutu ile orantılı değerler gözlemlenmemiştir. En yüksek değeri sırasıyla 0.075 mm'den küçük ve 0.180 mm'den küçük deniz kabuğu agregası ile hazırlanan karışımlardan elde edilen değerler izlemiştir. Kontrol grubu ise en düşük ortalama çekme mukavemeti değerini vermiştir. Şekil 35. incelendiğinde, koşullu

örneklerde, en yüksek ortalama çekme mukavemeti değerini nemli agregaya yöntemi ile hazırlanan karışım grubu vermiştir. Tüm karışım gruplarında, koşullu örneklerde, en yüksek ortalama çekme mukavemeti değeri nemli agregaya yöntemi ile hazırlanan karışım grubundan, en düşük ortalama çekme mukavemeti değeri ise kontrol grubundan elde edilmiştir. Kontrol grubundan sonra en düşük değeri hamur yöntemi ile hazırlanan karışım grubu vermiştir.

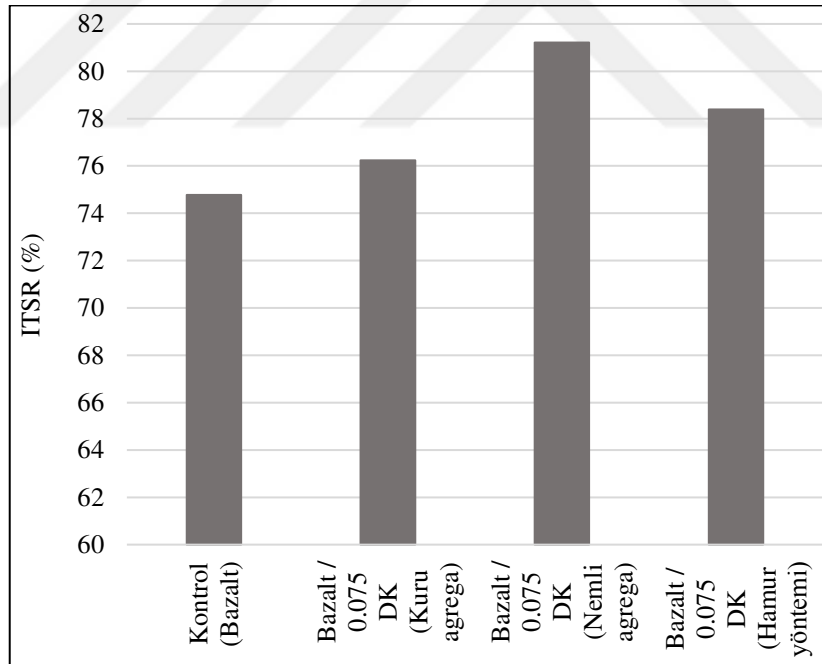
Koşulsuz ve koşullu örneklerden elde edilen değerlerin oranlanması ile hesaplanan ITSr değerleri Tablo 27.'de ve Şekil 36-37'de verilmiştir.

Tablo 27. Koşullu ve koşulsuz örneklerin ortalama dolaylı çekme mukavemeti değerleri (kPa) ve dolaylı çekme mukavemeti oranları (ITSr)

Karışım	Koşullu ITS (kPa)	Koşulsuz ITS (kPa)	ITSr (%)
Kontrol (Bazalt)	825.90	1104.61	74.77
Bazalt/0.425DK	961.06	1268.14	75.79
Bazalt/0.180DK	856.57	1154.95	74.17
Bazalt/0.075DK	920.62	1207.71	76.23
Bazalt/0.075DK (Nemli agregaya)	966.65	1190.12	81.22
Bazalt/0.075DK (Hamur yöntemi)	833.66	1063.51	78.39



Şekil 36. Farklı boyutlarda deniz kabuğu agregası içeren karışımların ITSR değerleri



Şekil 37. Deniz kabuğu filleri ile farklı katılma yöntemlerine göre hazırlanan karışımların ITSR değerleri

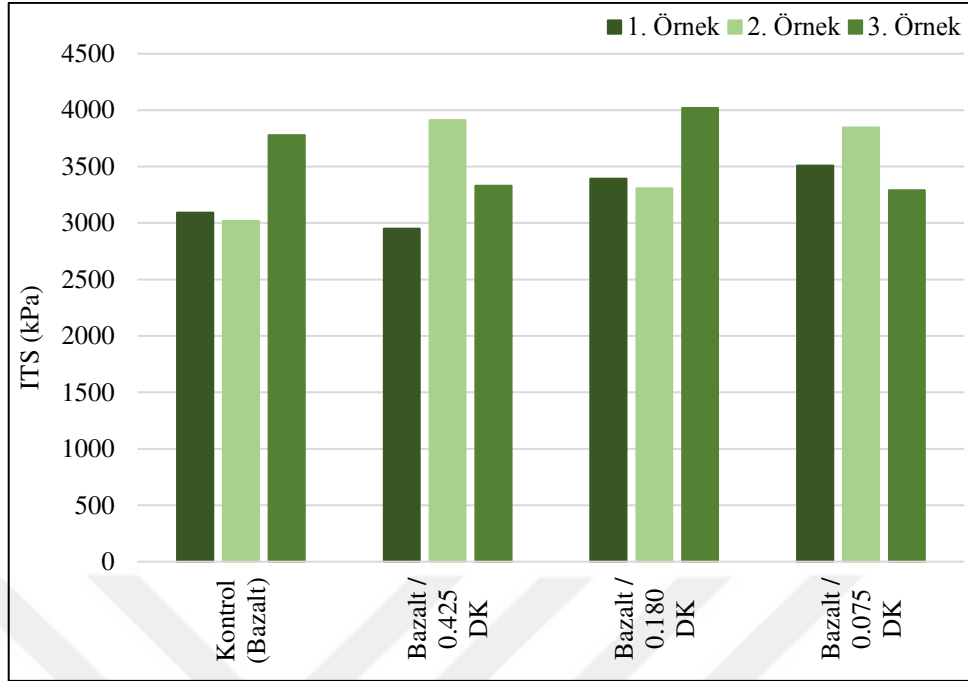
Hicks (1991), Lottman prosedürüne göre ITSR değerinin 0.70'in üzerinde kabul edilebileceğini belirtmektedir. Ancak Karayolları Teknik Şartnamesi'ne göre (KGM, 2013) bu oran 0.80 olarak önerilmektedir. Bu açıdan değerlendirildiğinde, KTŞ'ye göre, sadece

ıslak agregaya ile hazırlanan karışımın %81.22 ile eşik değerini aştığı görülmektedir. Diğer tüm karışım grupları %80'in altında kalsa da hamur yöntemi ile hazırlanan karışım grubu bu değerden %1.61 daha az bir değerle eşik değerine en yakın sonucu vermiştir.

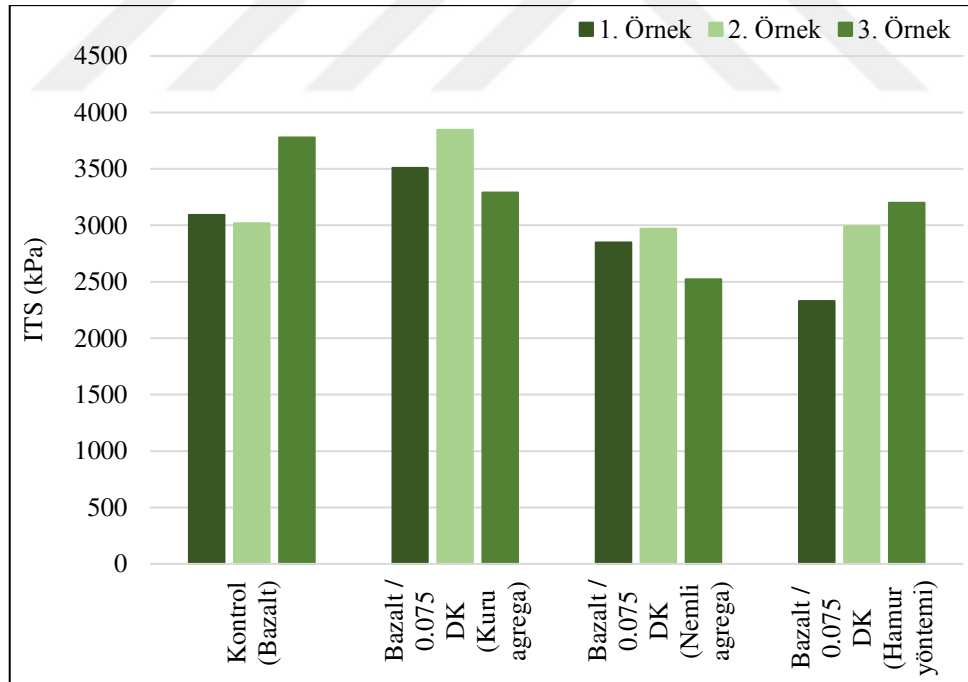
Deniz kabukları filler halinde asfalt betonuna katıldığında bitüm-agrega adezyonunu arttırmış bu da suyun kaplamanın agregaya yüzeyinden çıkmasını önlemiştir (Arabani vd., 2015). Benzer şekilde deniz kabuğu fillerinin, ıslak halde, TMA karışımlara katılmasının bitümün agregaya yapışmasını artırdığı, bu yüzden ıslak agregaya yöntemi ile hazırlanan karışım grubunun eşik değerini aşarak su hasarına karşı en iyi direnci gösterdiği tespit edilmiştir. Hamur yöntemi ile hazırlanan karışım grubu, ıslak agregaya yöntemiyle hazırlanan gruba göre %2.83 daha az bir değer verse de agregalar ıslatılıp hamur halinde kullanıldığı için geleneksel yöntemle hazırlanan karışımlara göre daha yüksek bir su hasarı direnci göstermiştir.

3.2. Dolaylı Çekme Mukavemeti Testine Ait Bulgular ve İrdeleme

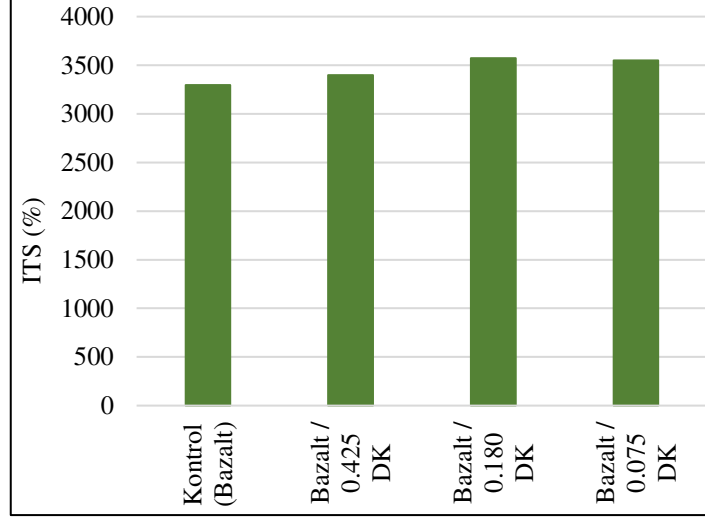
Dolaylı çekme mukavemeti testi karışımların düşük sıcaklık çatlama direncini belirlemek amacıyla yapılmıştır. Bu amaçla her bir karışım grubundan üçer adet numune koşullandırılmış ve koşullu numunelere 0°C'de dolaylı çekme mukavemeti testi uygulanmıştır. Teste tabi tutulan tüm numunelerin dolaylı çekme mukavemeti değerleri Şekil 38-39'da ve üçerli numune gruplarının ortalama dolaylı çekme mukavemeti değerleri Şekil 40-41'de verilmiştir.



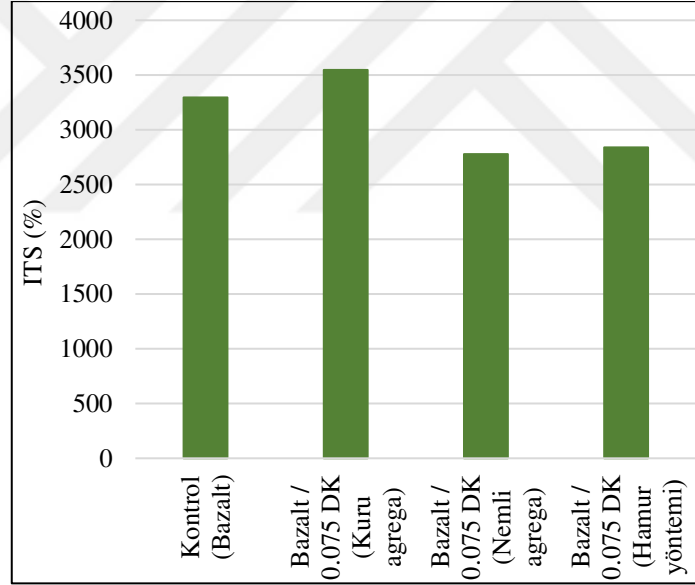
Şekil 38. Farklı boyutlarda deniz kabuğu agregası içeren karışımların dolaylı çekme mukavemeti değerleri (kPa)



Şekil 39. Deniz kabuğu filleri ile farklı katılma yöntemlerine göre hazırlanan karışımların dolaylı çekme mukavemeti değerleri (kPa)



Şekil 40. Farklı boyutlarda deniz kabuğu agregası içeren karışımların ortalama dolaylı çekme mukavemeti değerleri (kPa)



Şekil 41. Deniz kabuğu filleri ile farklı katılma yöntemlerine göre hazırlanan karışımların ortalama dolaylı çekme mukavemeti değerleri (kPa)

Şekil 40.'tan görüldüğü üzere deniz kabuğu agregası geleneksel yani kuru yöntemle karışımlara katıldığında dolaylı çekme mukavemeti değerleri daha yüksek çıkmıştır. 0.18 mm'den küçük deniz kabuğu içeren grup en yüksek değeri vermiştir. Bu karışım grubunu sırasıyla deniz kabuğu filleri ve 0.425 mm'den küçük deniz kabuğu filleri içeren karışım grupları izlemiştir.

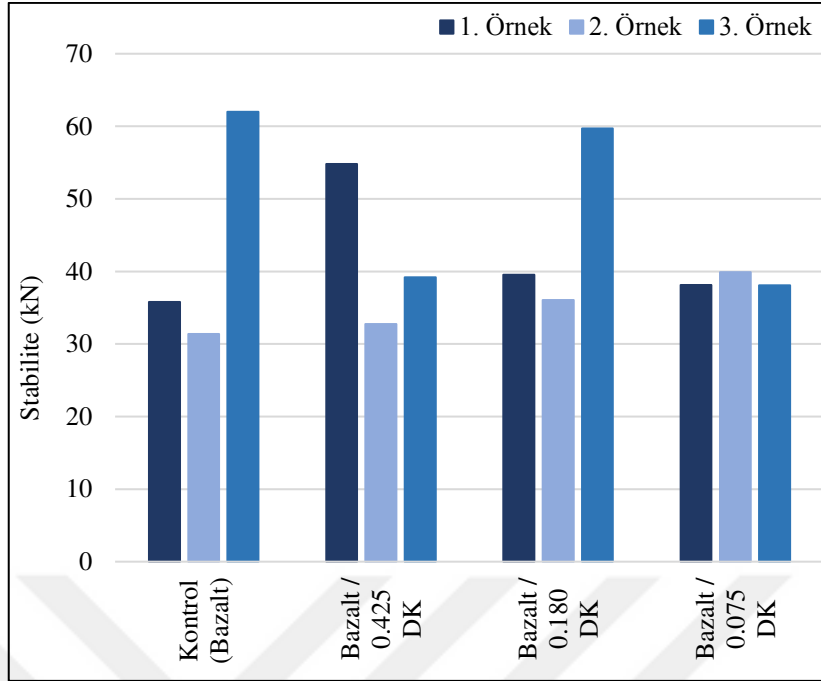
Şekil 41.'de görüldüğü üzere deniz kabuğunun ıslak agrega ve hamur yöntemleriyle karışıma eklenmesi dolaylı çekme mukavemeti değerlerini düşürmüştür. Bu iki gruba ait sonuçlar kontrol grubunun altında kalmıştır.

Tüm karışım grupları içinde en yüksek dolaylı çekme mukavemeti değerini 0.180 mm'den küçük deniz kabuğu agregası içeren karışım grubu vermiştir. Dolayısıyla en yüksek düşük sıcaklıkta çatlama direncini bu karışım grubu göstermiştir. Deniz kabuğunun filler halinde kullanılması en yüksek ikinci değeri verirken, deniz kabuğu fillerinin ıslak halde karışımlara katılması çatlama direncinin düşmesine neden olmuştur.

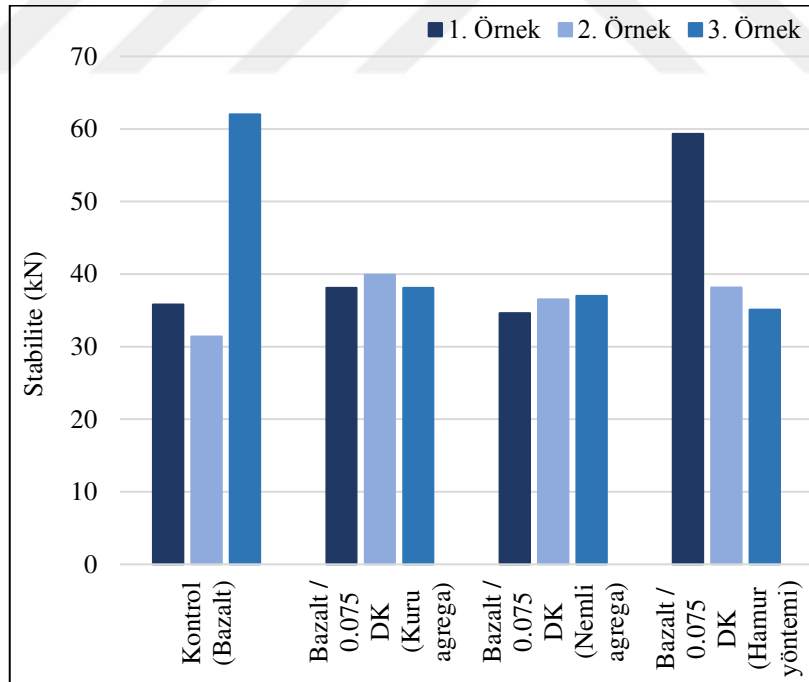
Çekme mukavemeti, numunenin dayanabileceği maksimum gerilme miktarıdır, düşük sıcaklıkta gözlemlenen çatlama direnci ile ilgilidir. Sönmüş kireç ile yapılan çalışmada, sönmüş kirecin filler halinde kullanımının agrega-asfalt bağıntıyı artırarak asfalt karışımı nem etkilerine karşı daha az hassas hale getirdiği tespit edilmiştir. Karışım içerisindeki kirecin hidratlaştığı ve hidratlaşan kirecin dolgu etkisi çatlama direncinin artmasına neden olduğu gözlemlenmiştir (Little vd., 2006). Benzer şekilde deniz kabuğu fillerinin ıslatılarak karışımlara katılmasının hidratasyonun erken gerçekleşmesine neden olduğu ve bu sebeple çatlama direncini düşürdüğü düşünülmektedir.

3.3. Marshall Stabilité Testine Ait Bulgular ve İrdeleme

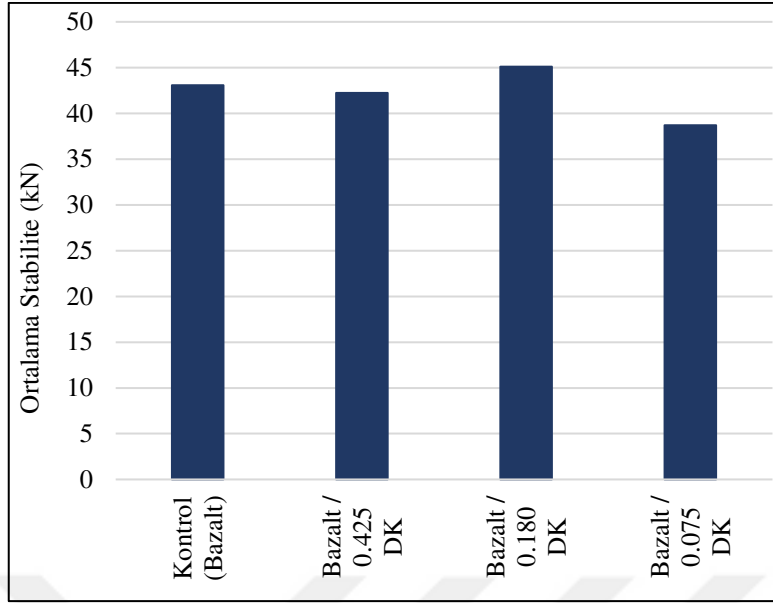
Marshall stabilite testi karışımların stabilite ve akma değerlerini belirlemek amacıyla yapılmıştır. Her bir karışım grubundan üçer numune koşullandırılmış ve koşullu numuneler su banyosunda 25°C iç sıcaklığa ulaşması için 2 saat bekletildikten sonra teste tabi tutulmuşlardır. Elde edilen stabilite değerleri numune kalınlıklarına göre alınan düzeltme faktörleri ile çarpılarak düzeltilmiş stabilite değerleri hesaplanmıştır. Karışımların düzeltilmiş stabilite değerleri Şekil 42. ve Şekil 43.'te ve üçer numunenin ortalaması alınarak elde edilen ortalama düzeltilmiş stabilite değerleri Şekil 44 ve Şekil 45'te verilmiştir.



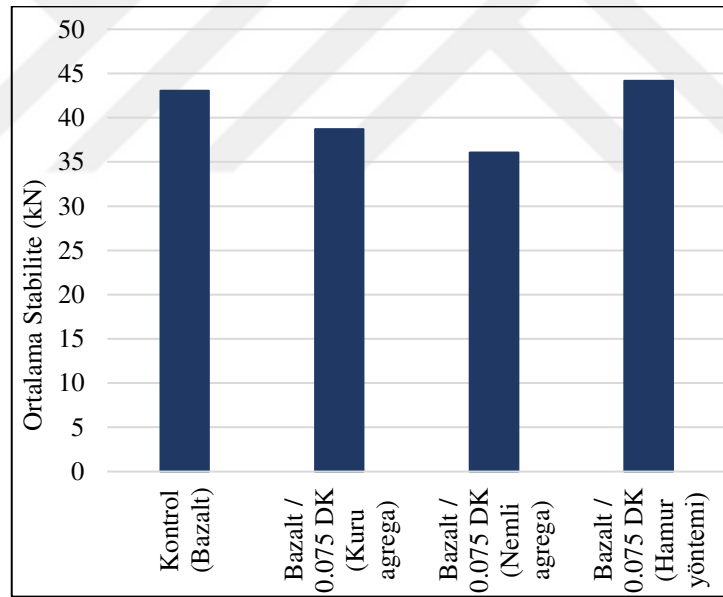
Şekil 42. Farklı boyutlarda deniz kabuğu agregası içeren karışımların düzeltilmiş stabilite değerleri (kN)



Şekil 43. Deniz kabuğu filleri ile farklı katılma yöntemlerine göre hazırlanan karışımların düzeltilmiş stabilite değerleri (kN)



Şekil 44. Farklı boyutlarda deniz kabuğu agregası içeren karışımların ortalama düzeltilmiş stabilite değerleri (kN)

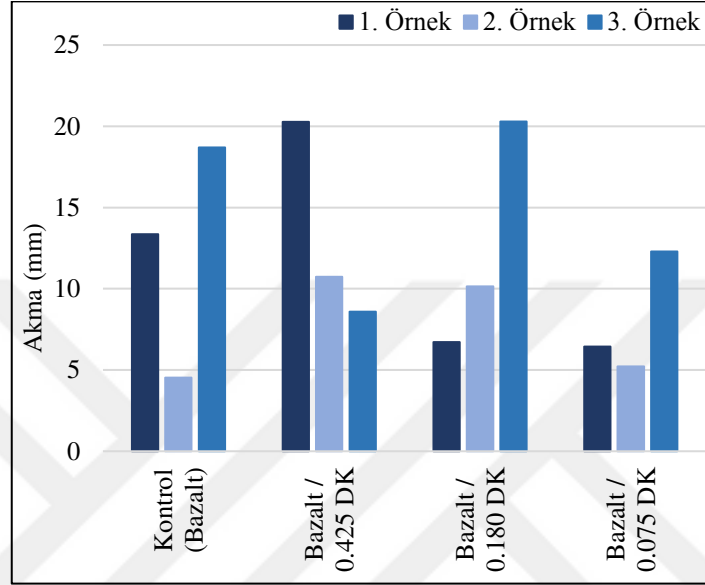


Şekil 45. Deniz kabuğu filleri ile farklı katılma yöntemlerine göre hazırlanan karışımların ortalama düzeltilmiş stabilite değerleri (kN)

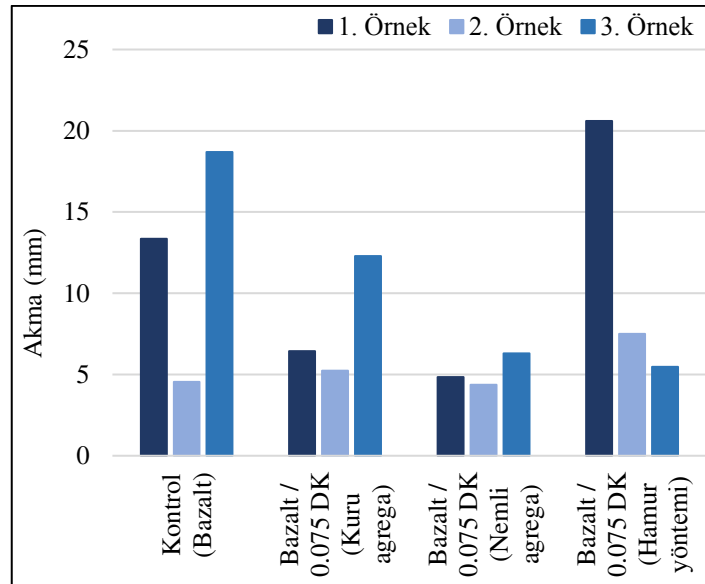
Şekil 44.'ten görüldüğü üzere, karışımların stabilite değerleri agrega boyutuyla orantılı olarak değişmemiştir. Tüm karışım grupları içinde en yüksek stabilite değerini 0.18 mm'den küçük deniz kabuğu agregası ile hazırlanan karışım grubu vermiştir. Hamur

yöntemi ile hazırlanan karışım grubu en iyi performansı gösteren ikinci grup olmuş, diğer karışım türleri kontrol grubundan daha yüksek bir değere ulaşamamıştır.

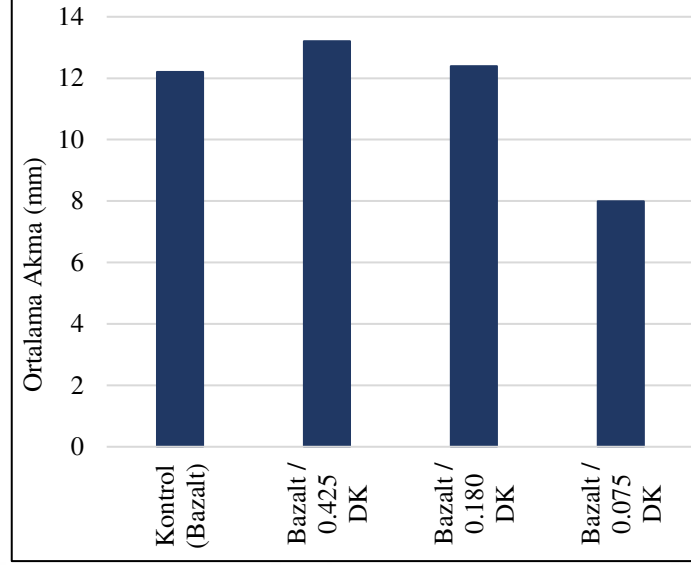
Karışım numunelerinin akma değerleri Şekil 46-47’de ve ortalama akma değerleri Şekil 48-49’da verilmiştir.



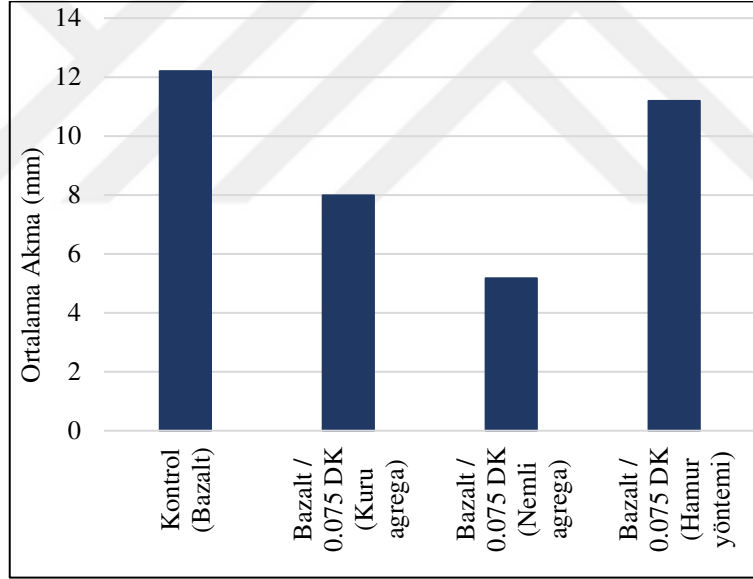
Şekil 46. Farklı boyutlarda deniz kabuğu agregası içeren karışımların akma değerleri (mm)



Şekil 47. Deniz kabuğu filleri ile farklı katılma yöntemlerine göre hazırlanan karışımların akma değerleri (mm)



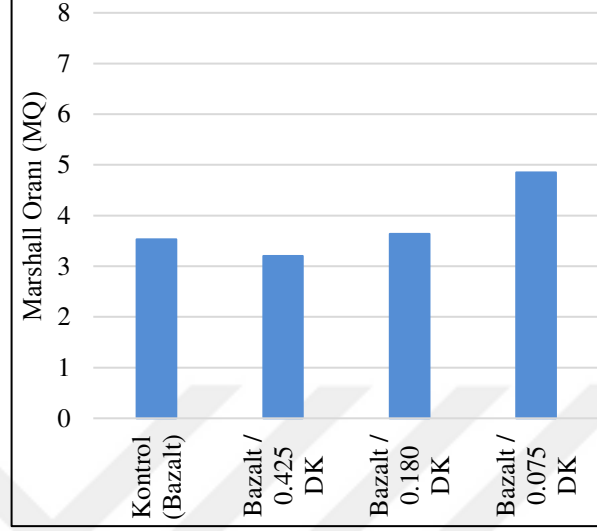
Şekil 48. Farklı boyutlarda deniz kabuğu agregası içeren karışımların ortalama akma değerleri (mm)



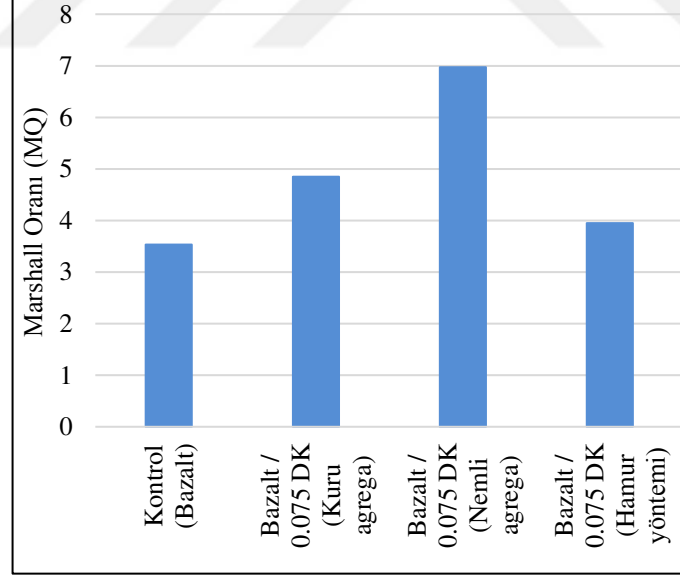
Şekil 49. Deniz kabuğu filleri ile farklı katılma yöntemlerine göre hazırlanan karışımların ortalama akma değerleri (mm)

Şekil 48.'den görüldüğü üzere, akma değerleri deniz kabuğu agregası boyutu azaldıkça azalma eğilimi göstermiştir. Tüm karışım grupları içinde en yüksek akma değeri, en büyük boyutlu deniz kabuğu agregası içeren, 0.425 mm'den küçük deniz kabuğu agregası ile hazırlanan karışım grubunda elde edilmiştir. Şekil 49.'a göre ıslak agrega yöntemiyle hazırlanan grup en düşük akma değerini vermiştir. Ancak hamur yöntemi ile

hazırlanan karışım grubu, kontrol grubunun altında bir değer almasına rağmen, ıslak agrega yöntemiyle hazırlanan gruba göre çok daha yüksek bir akma değeri vermiştir.



Şekil 50. Farklı boyutlarda deniz kabuğu agregası içeren karışımların Marshall oranları



Şekil 51. Deniz kabuğu filleri ile farklı katılma yöntemlerine göre hazırlanan karışımların Marshall oranları

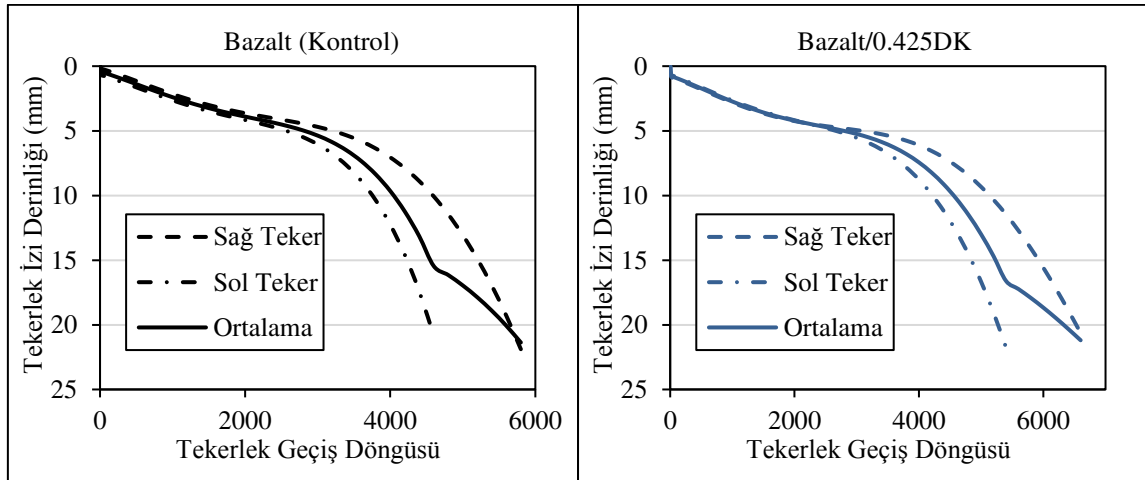
Şekil 50.'den görüldüğü üzere, farklı boyutlarda deniz kabuğu agregası içeren karışım gruplarında, deniz kabuğu filleri ile hazırlanan grup 4.85 ile en yüksek Marshall oranını vermiştir. Bu karışım grubunu 0.180 mm'den küçük deniz kabuğu agregası içeren

karışım grubu takip etmiştir. En düşük oran ise 0.425 mm'den küçük deniz kabuğu agregası içeren karışım grubunda 3.20 olarak gözlemlenmiştir. Şekil 51.'de verildiği üzere nemli agregaya yöntemi ile hazırlanan karışım grubundan en yüksek Marshall oranı elde edilmiştir. Ancak hamur yöntemi ile hazırlanan karışım grubu 3.02'lik daha düşük bir Marshall oranı vermiştir. Tüm karışım grupları içerisinde en yüksek Marshall oranı 6.97 olarak nemli agregaya ile hazırlanan karışım grubundan elde edilmiştir. Bu da nemli agregaya ile hazırlanan karışım grubunun en yüksek rijitliğe sahip karışım grubu olduğunu göstermektedir.

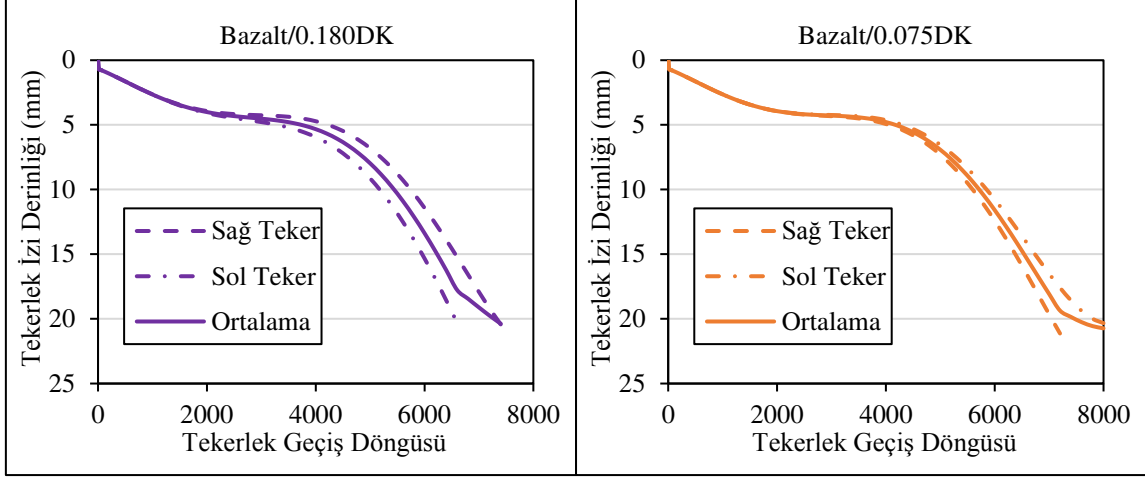
Taş mastik asfalt karışımlar açısından değerlendirildiğinde stabilite ve akma değerlerinin genelde öngörülen seviyeye ulaşamadığı ifade edilmektedir. Bu nedenle Marshall stabilite testine ait sonuçlar, TMA karışımlarında tekerlek izi değerlendirmesi için kritik değil, ek bir bilgi kaynağı olarak görülmektedir (Liu vd., 2011).

3.4. Hamburg Tekerlek İzi Testine (HWTT) Ait Bulgular ve İrdeleme

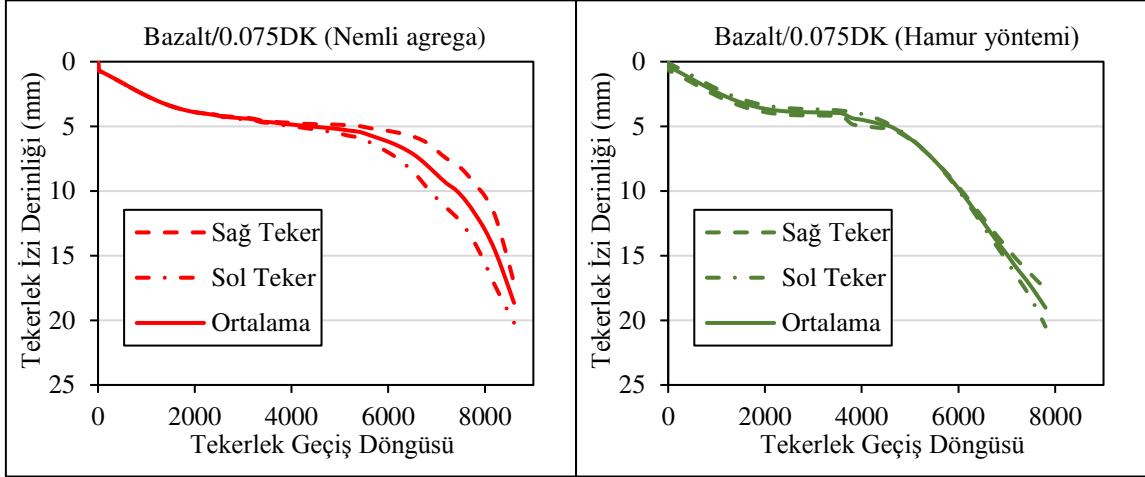
Hamburg tekerlek izi testi hazırlanan karışımların tekerlek izi potansiyelini ve su hasarına karşı direncini tespit etmek amacıyla yapılmıştır. Numuneler su dolu kabin içerisinde test edilmiş ve elde edilen sonuçlara dair grafikler Şekil 52-54'te verilmiştir.



Şekil 52. Bazalt (Kontrol) ve Bazalt/0.425DK karışım gruplarına ait Hamburg tekerlek izi eğrileri



Şekil 53. Bazalt/0.180DK ve Bazalt/0.075DK karışım gruplarına ait Hamburg tekerlek izi eğrileri



Şekil 54. Bazalt/0.075DK (Nemli agreg) ve Bazalt/0.075DK (Hamur yöntemi) karışım gruplarına ait Hamburg tekerlek izi eğrileri

Bu test ile elde edilen eğriler, üç bölgeye ayrılmaktadır. Son bölge üçüncü bölgedir ve bu bölgede örnek hızlıca bozulma sürecine girmektedir. Hamburg deneyi ile elde edilen eğrilerdeki bu üçüncü bölgeler su hasarı problemi ile ilgilidir. Su hasarına karşı dayanıksız olan karışımlar, soyulma büküm noktasında, kaba agregaların yerinden çıkmasına neden olmaktadır. Soyulma eğimi ise su hasarı nedeniyle oluşan kalıcı deformasyonların toplamının ölçüsüdür. Sünme eğiminin, soyulma noktasının ve soyulma eğiminin daha yüksek bir değer alması daha düşük su hasarını göstermektedir (İskender, 2017).

Eğrinin ikinci bölgesine çizilen teğetin eğimi sünme eğimi ve üçüncü bölgesine çizilen teğetin eğimi soyulma eğimi olarak adlandırılmaktadır. Sünme eğimi ve soyulma

eğiminin kesişme noktası soyulma büküm noktasıdır. Çizilen grafikler üzerinden elde edilen sünme eğimi değerleri Tablo 28.'de ve soyulma büküm noktası değerleri Tablo 29.'da verilmiştir.

Tablo 28. Karışımların sünme eğimleri (mm/geçiş)

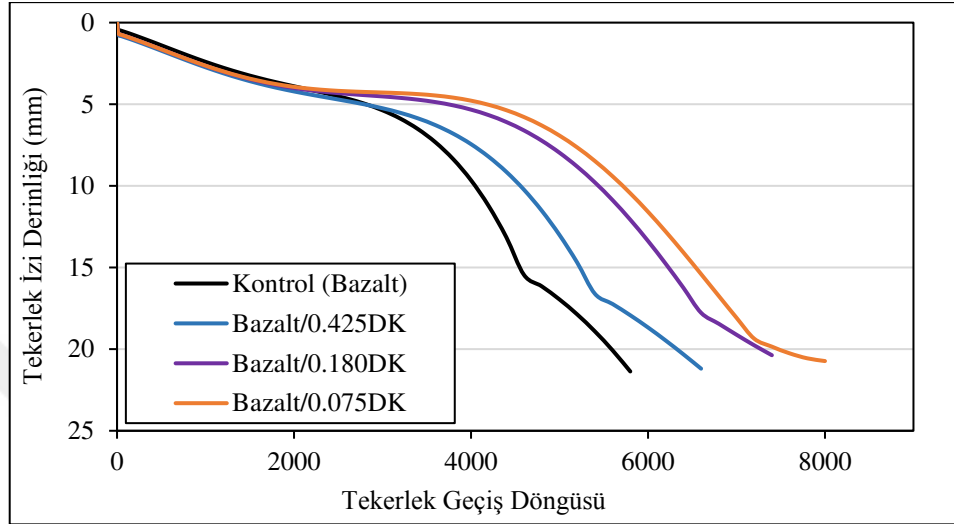
Karışım	Sünme Eğimleri (mm/geçiş)		
	Sağ Teker	Sol Teker	Ortalama
Kontrol (Bazalt)	0.0014	0.0018	0.0016
Bazalt/0.425DK	0.0013	0.0017	0.0015
Bazalt/0.180DK	0.0010	0.0013	0.0011
Bazalt/0.075DK	0.0010	0.0009	0.0010
Bazalt/0.075DK (Nemli agregası)	0.0007	0.0009	0.0008
Bazalt/0.075DK (Hamur yöntemi)	0.0011	0.0009	0.0010

Tablo 29. Karışımların soyulma büküm noktaları (geçiş)

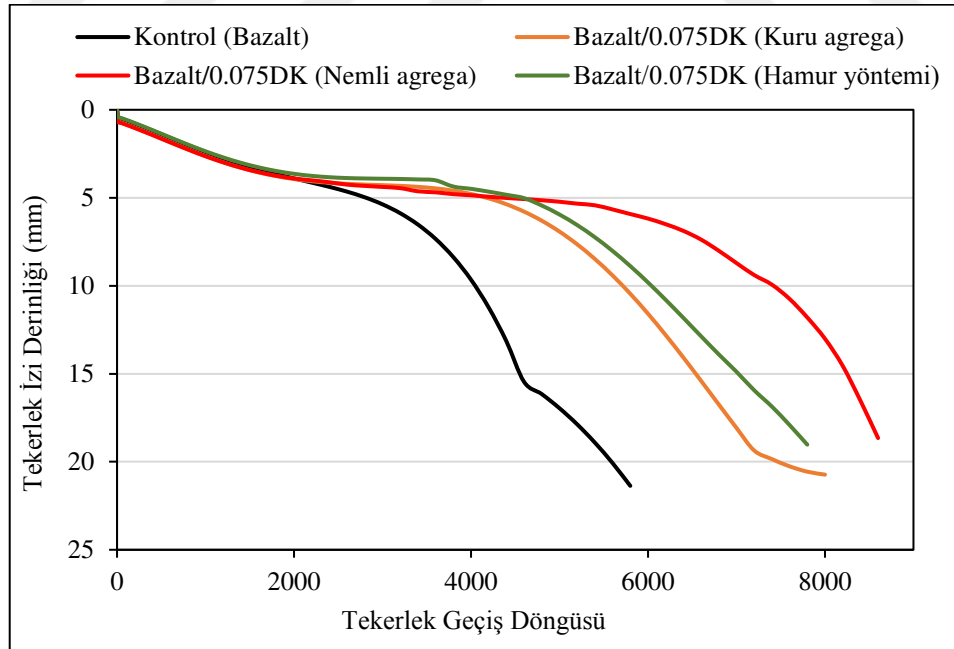
Karışım	Soyulma Büküm Noktası (geçiş)		
	Sağ Teker	Sol Teker	Ortalama
Kontrol (Bazalt)	4400	3700	4050
Bazalt/0.425DK	4750	4200	4475
Bazalt/0.180DK	5000	4800	4900
Bazalt/0.075DK	5000	4900	4950
Bazalt/0.075DK (Nemli agregası)	7700	6850	7275
Bazalt/0.075DK (Hamur yöntemi)	5200	4900	5050

Tablo 28.'e göre ortalama değerler göz önünde bulundurulduğunda en yüksek sünme eğimi kontrol grubundan ardından 0.425 mm'den küçük deniz kabuğu agregası ile hazırlanan karışım grubundan elde edilmiştir. En düşük sünme eğimi ise nemli agregası yöntemi ile hazırlanan karışım grubundan 0.0008 olarak elde edilmiştir. Bu değeri deniz kabuğu filleri içeren ve hamur yöntemiyle hazırlanan karışımlar 0.0002 fark ile takip etmiştir. Sünme eğiminin düşük olması karışımın deformasyonlara karşı direncinin yüksek olduğu anlamına gelmektedir. Dolayısıyla deformasyonlara karşı en yüksek direnci nemli agregası yöntemi ile hazırlanan karışım grubu göstermiştir. 0.425 mm'den küçük deniz kabuğu agregası ile hazırlanan karışım grubu ise en düşük deformasyon direncini göstermiştir. Tablo 29.'a göre ise ortalama değerler göz önünde bulundurulduğunda en

erken soyulma başlangıcı kontrol grubunda gözlemlenmiştir. Kontrol grubu hariç en erken soyulma ise 0.425 mm'den küçük deniz kabuğu agregası ile hazırlanan karışım grubunda gözlemlenmiştir.

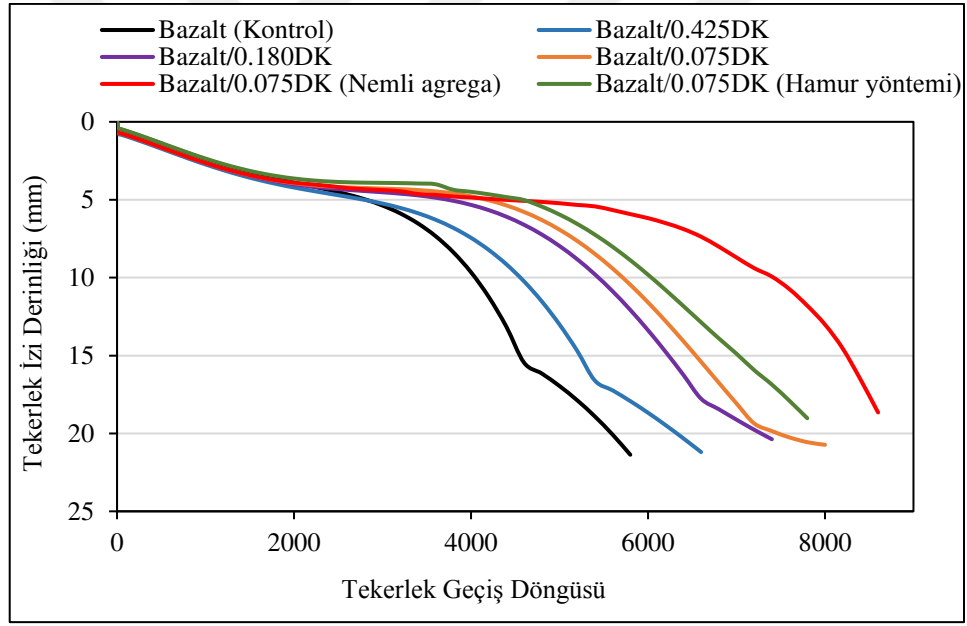


Şekil 55. Farklı boyutlarda deniz kabuğu agregası içeren karışımların Hamburg tekerlek izi eğrileri



Şekil 56. Deniz kabuğu filleri ile farklı katılma yöntemlerine göre hazırlanan karışımların Hamburg tekerlek izi eğrileri

Şekil 55.'ten, farklı boyutlarda deniz kabuğu agregası ile hazırlanan karışımlarda en yüksek sünme eğimi kontrol grubunda görülmüştür. 0.180 mm ve 0.075 mm deniz kabuğu agregası ile hazırlanan karışımlar birbirine yakın sünme eğimleri vermiştir. Ancak bu boyutlarda deniz kabuğu agregası katkısının deformasyon direncini azaltacağı tespit edilmiştir. Deniz kabuğu agregasının boyutu azaldıkça soyulma başlangıcının daha yüksek değer aldığı görülmüştür. Şekil 56.'dan ise kuru agregata ve hamur yöntemi ile hazırlanan karışımların sünme eğimleri daha düşük görülmektedir. Bu yüzden bu iki yöntemin karışımların deformasyon direncini arttırmak için daha etkili olacağı tespit edilmiştir. Benzer şekilde kuru agregata ve hamur yöntemi ile hazırlanan karışımların soyulma başlangıçları birbirine yakın değerlerde gözlemlenmiştir. Ancak nemli agregata yöntemi ile hazırlanan karışımın soyulma başlangıcı daha yüksek bir değer aldığı belirlenmiştir.



Şekil 57. Karışımların Hamburg tekerlek izi eğrileri

Tüm karışım türlerine ait Hamburg tekerlek izi eğrileri Şekil 57.'de verilmiştir. Genel olarak bakıldığında deniz kabuğu agregası boyutu azaldıkça karışımların deformasyon direncinin de azaldığı gözlemlenmiştir. Tüm karışım grupları içerisinde kontrol grubu hariç en yüksek deformasyon direncini 0.425 mm'den küçük deniz kabuğu agregası ile hazırlanan karışım grubu göstermiştir. Deniz kabuğu agregasının boyutu azaldıkça soyulma başlangıç değeri de artmış ve bu da deniz kabuğu agregası katkısının karışımları su hasarına karşı daha dayanıklı olmasını sağlamıştır. Tüm karışım grupları

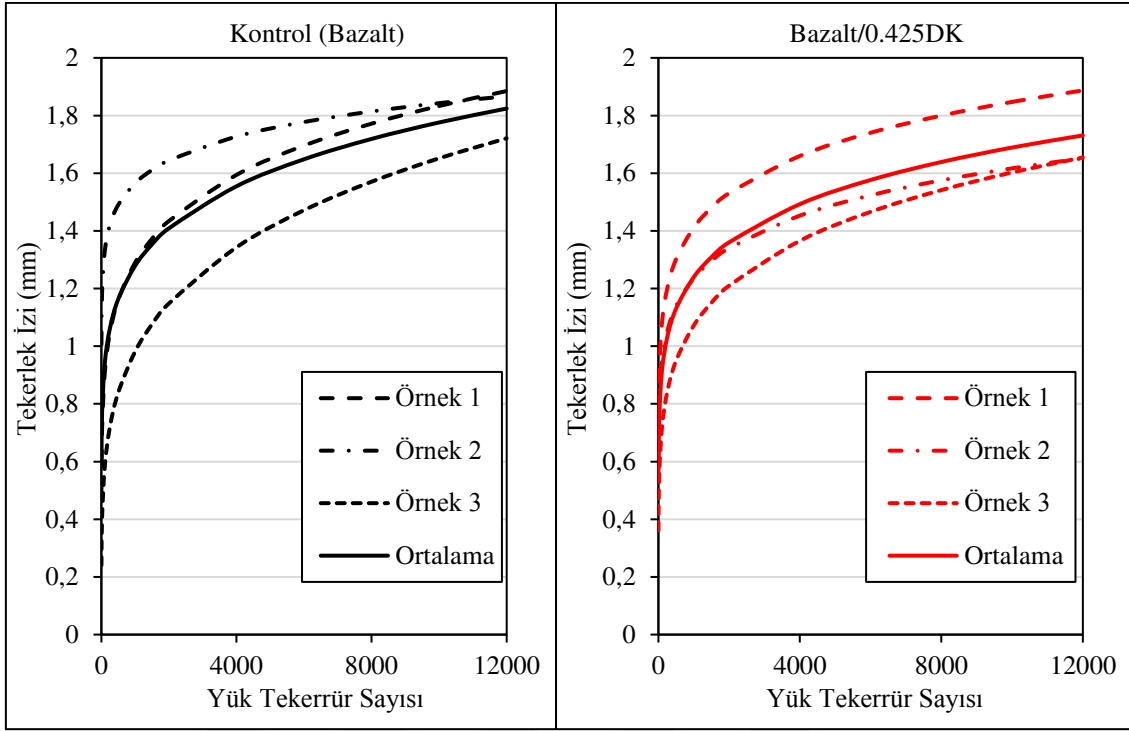
içinde nemli agregası ile hazırlanan karışım grubu en geç soyulma başlangıcını göstermiştir. Dolayısıyla deniz kabuğu agregası katkısının filler boyutunda ve ıslak agregaya katılarak yapılması karışımın soyulmaya karşı daha dayanıklı olmasını sağlamıştır.

Su hasarı, asfalt karışımların performansı ve dayanıklılığı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Su hasarı genelde adezyon yetersizliği sonucu oluşur. Adezyon yetersizliği asfalt filminin agregası yüzeyinden sıyrılması şeklinde kendini gösterir. Su kaplamadan içeri doğru sızdıkça bitüm ile agregası arasında kopma meydana gelir. Bu da bitümün açığa çıkıp kaplama boyunca hareket etmesine neden olur. Bu mekanizma ile kaplama tekerlek izine karşı daha dayanıksız bir hale gelir (Beecroft ve Petho, 2015). Sönmüş kireç ile yapılan çalışma, sönmüş kirecin içerdiği kalsiyum iyonlarının agregası yüzeyinde çökerek agreganın bitümlü bağlayıcı ile daha iyi tutunmasını sağladığını göstermiştir. Ancak mastik harca sönmüş kireç eklendiğinde, kalsiyum iyonlarının agregası yüzeyinde öbek halinde birikebileceği ve daha sonra bitümden gelen asitlerle bağlanarak suda çözünmeyen tuzlar oluşturabileceği tespit edilmiştir. Ayrıca, sönmüş kirecin içerdiği kalsiyum karbonatın su mevcudiyetinde çökeldiği ve bu nedenle daha yüksek bir yüzey pürüzlülüğü yaratıp bitüm agregası adezyonunu iyileştirdiği belirlenmiştir (Lesueur vd., 2013).

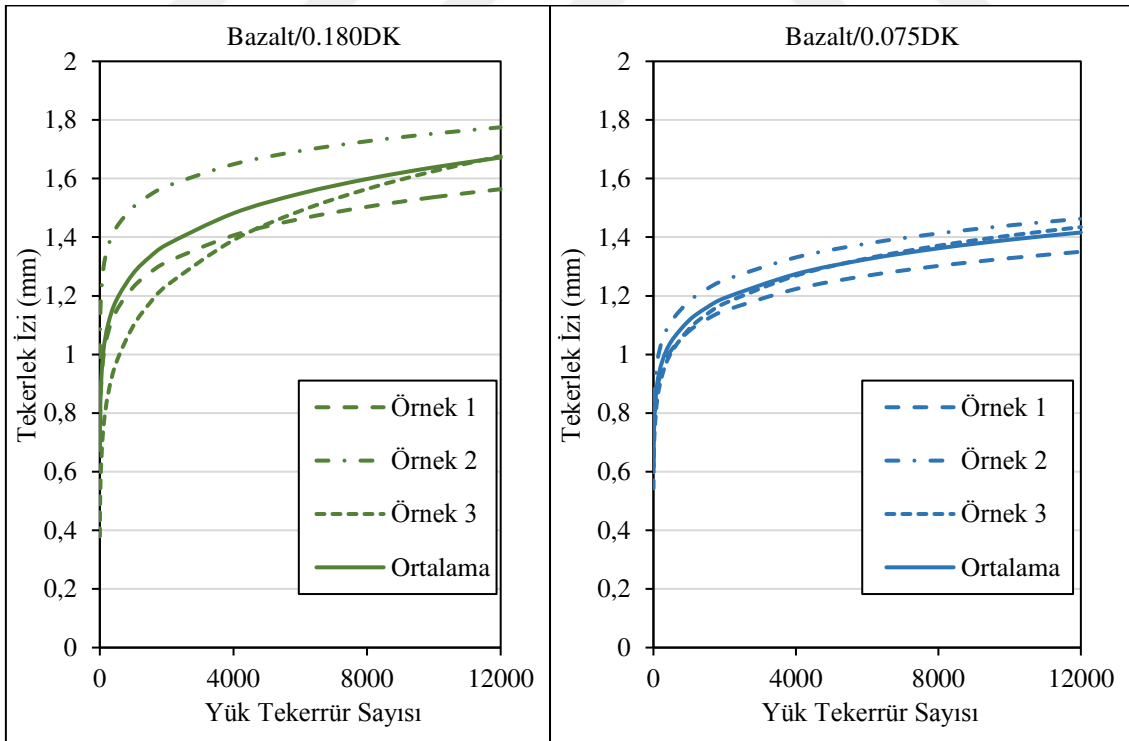
Tüm karışım grupları içinde en yüksek deformasyon ve soyulma direncini nemli agregası yöntemi ile hazırlanan karışım grubu göstermiştir. Deniz kabuklarının içerdiği kalsiyum karbonatın, nemlendirilen agregası ile birlikte karıştırıldığında, çökeliş yüzey pürüzlülüğü yarattığı düşünülmektedir. Bu nedenle bu karışım grubuyla en yüksek bitüm-agregası adezyonu elde edilmiş ve bu da karışımın su hasarına ve deformasyona karşı daha dirençli olmasını sağlamıştır.

3.5. Tekrarlı Yük Sünme Testine (RCT) Ait Bulgular ve İrdeleme

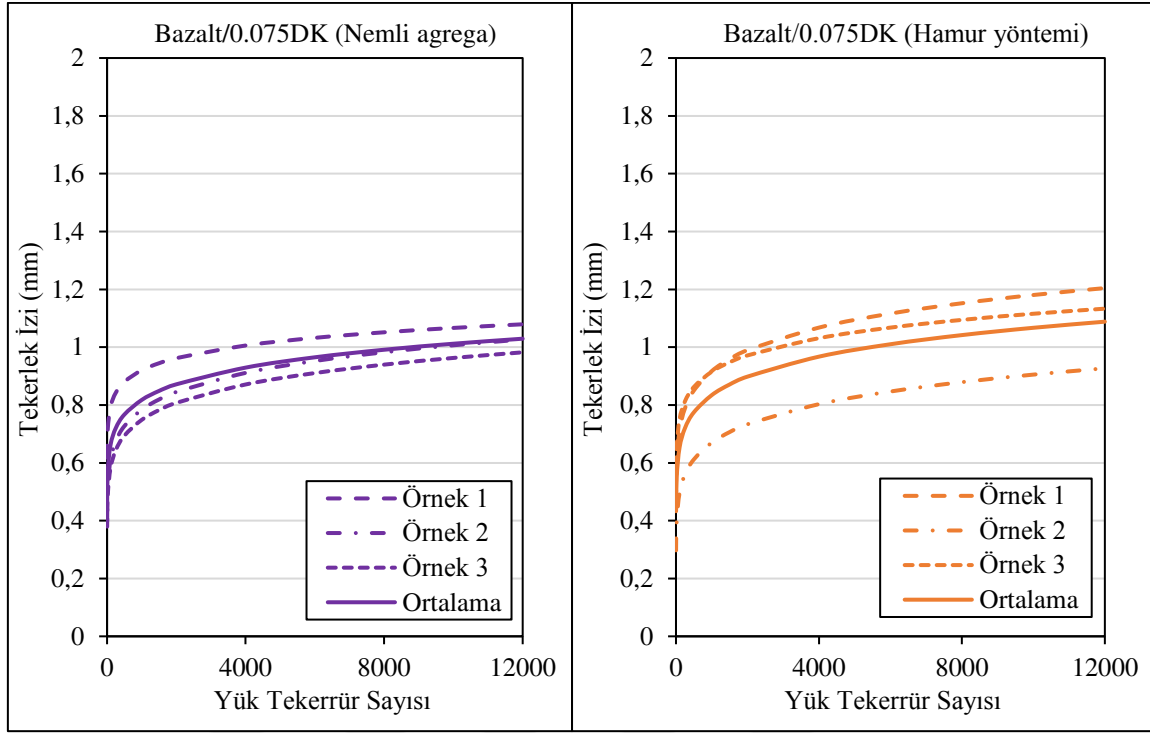
Tekrarlı yük sünme testi hazırlanan karışımların tekerlek izi potansiyelini tespit etmek amacıyla yapılmıştır. Her bir karışım grubundan üçer adet numune koşulsuz halde test edilmiş ve elde edilen tekerlek izi değerlerinin ortalaması alınmıştır.



Şekil 58. Bazalt (Kontrol) ve Bazalt/0.425DK karışım gruplarına ait tekrarlı yük sünme eğrileri

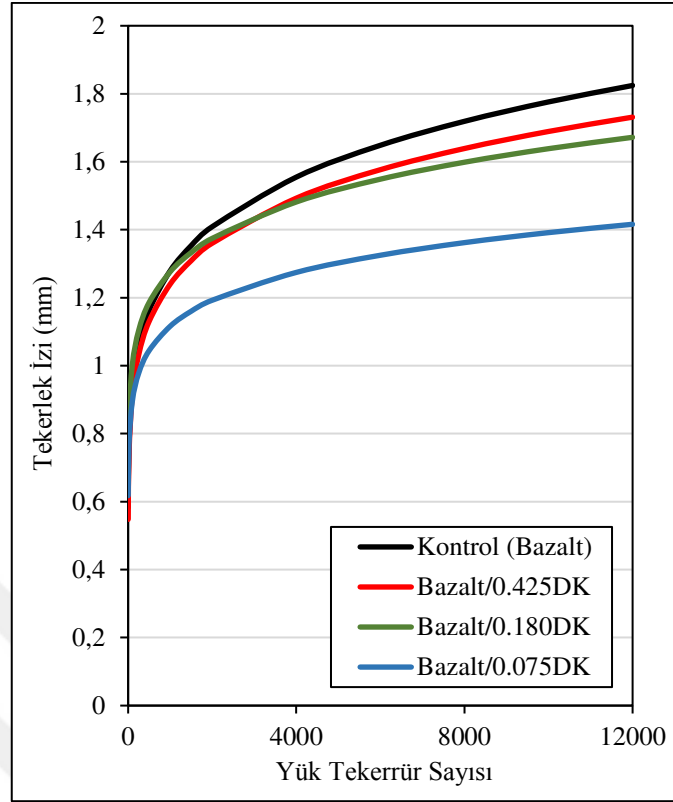


Şekil 59. Bazalt/0.180DK ve Bazalt/0.075DK karışım gruplarına ait tekrarlı yük sünme eğrileri



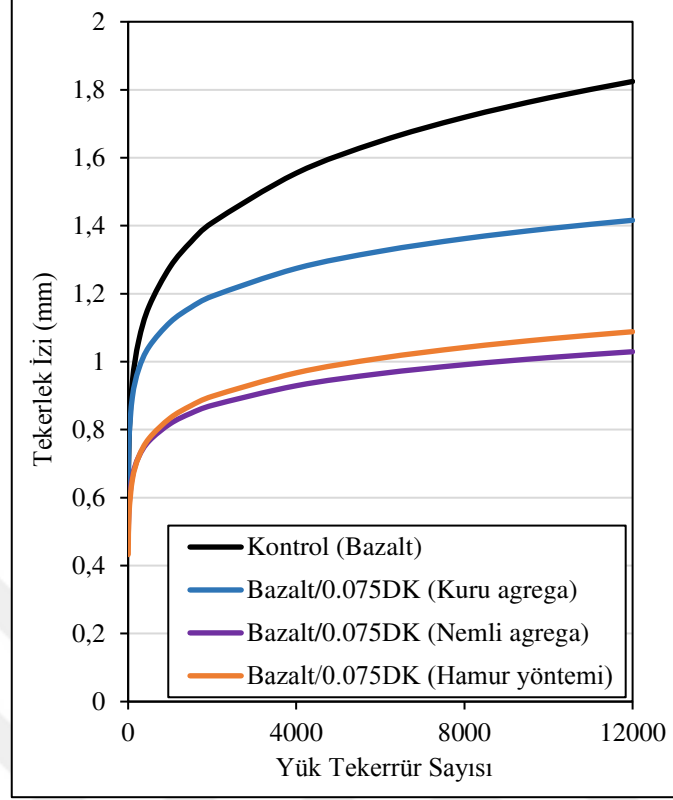
Şekil 60. Bazalt/0.075DK (Nemli agreg) ve Bazalt/0.075DK (Hamur yöntemi) karışım gruplarına ait tekrarlı yük sünme eğrileri

Şekil 58-60'ta tüm karışım türleri için hazırlanan tüm numunelere ait tekrarlı yük sünme eğrileri verilmiştir. Tüm karışım gruplarına ait eğrilerde belirgin bir üçüncü bölge gözlemlenememiştir.



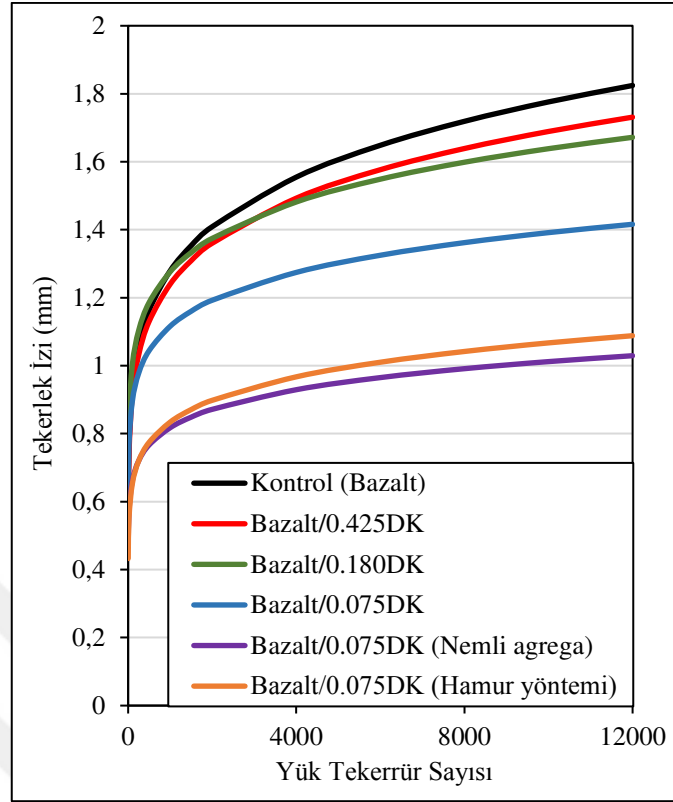
Şekil 61. Farklı boyutlarda deniz kabuğu agregası içeren karışımların tekrarlı yük sünme eğrileri

Şekil 61.'den en yüksek deformasyon değerlerini kontrol grubunun verdiği görülmektedir. Kullanılan deniz kabuğu agregasının boyutları azaldıkça deformasyonun da azaldığı görülmüştür. Özellikle deniz kabuğunun filler olarak karışıma katılması deformasyon direncinin artmasına dolayısıyla daha düşük deformasyon değerlerinin okunmasına neden olmuştur.



Şekil 62. Deniz kabuğu filleri ile farklı katılma yöntemlerine göre hazırlanan karışımların tekrarlı yük sünme eğrileri

Şekil 62.'den deniz kabuğu fillerinin ıslatılarak kullanılmasının deformasyon direncini belirgin bir şekilde artırdığı görülmektedir. Nemli agreg ve hamur yöntemleri ile hazırlanan karışımlardan elde edilen deformasyon değerlerinin, kuru agreg yöntemi ile hazırlanan karışımların deformasyon değerlerine göre daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. En düşük deformasyon değerlerini nemli agreg yöntemi ile hazırlanan karışımlar vermiş, bu karışım grubunun deformasyon direncinin, diğer yöntemler ile hazırlanan karışımlara göre, daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 63. Karışımların tekrarlı yük sünme eğrileri

Şekil 63.'te tüm karışımlara ait ortalama deformasyon değerleri ile çizilen tekrarlı yük sünme eğrileri verilmiştir. Karışım gruplarında belirgin bir üçüncü bölge gözlemlenmemiştir. Deniz kabuğu agregası boyutunun azaltılması ve deniz kabuğu agregasının ıslak kullanılması deformasyon değerlerini düşürmüştür. Dolayısıyla tüm karışım grupları içinde en yüksek deformasyon direncini, deniz kabuğu fillerinin nemli agreg yöntemi ile karışıma katılmasıyla hazırlanan karışım göstermiştir.

Hamburg tekerlek izi testi ve tekrarlı yük sünme testi ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış ve birbirleri ile tutarlı oldukları gözlemlenmiştir. Her iki test sonucunda da en yüksek deformasyon direncini nemli agreg yöntemi ile hazırlanan karışım grubu vermiştir. Bu karışım grubunu her iki testte de hamur yöntemi ile hazırlanan karışım grubu izlemiştir. Sonuç olarak deniz kabuğu fillerinin ıslatılarak kullanılması taş mastik karışımın kalıcı deformasyonlara karşı direncini arttırmıştır.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada deniz kabuğundan elde edilen ince agregası ve fillerin taş mastik asfalt karışımlarında kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu amaçla toplam beş tür karışım hazırlanmış ve her bir karışım türünde, toplam agreganın ağırlıkça %5'i oranında deniz kabuğu agregası ve filleri, belirlenen kesikli gradasyonla orantılı olarak ince agregası ve filler yerine kullanılmıştır. Deniz kabuğu agregasının maksimum boyutu 0.425 mm, 0.18 mm ve 0.075 mm (filler) olarak seçilmiştir. Deniz kabuğu agregasının boyut etkisi değerlendirilirken kuru agregası yöntemi kullanılmıştır. Ayrıca deniz kabuğu filleri agregası karışımına hamur yöntemi, ıslak agregası yöntemi ve kuru agregası yöntemi ile katılarak katılma yönteminin etkisi araştırılmıştır. Marshall yöntemine göre hazırlanan sıcak karışım örneklerine Modifiye Lottman, dolaylı çekme mukavemeti, Marshall stabilite, Hamburg tekerlek izi ve tekrarlı yük sünme testleri uygulanmıştır. Çalışma sonucunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

Düşük sıcaklıkta (0°C) koşullandırılmış karışımlara yapılan dolaylı çekme mukavemeti deney sonuçlarına göre, bazalt agregası yerine deniz kabuğu agregası eklenmesi ile karışımın çekme mukavemetini bununla birlikte düşük sıcaklık çatlamasına karşı direncini artmıştır. Deniz kabuğu agregasının maksimum boyutunun azalması ile genel anlamda çekme mukavemetleri artmıştır. Bunun nedeni olarak, agregası karışımındaki toplam deniz kabuğu oranı sabit olduğundan, maksimum boyutun azalması ile deniz kabuğu filleri oranının artması ve deniz kabuğu içerisindeki CaO'nun daha kolay tepkimeye girebilmesi olarak düşünülmektedir.

Deniz kabuğu filleri bazalt agregasına katılma yöntemi asfalt karışımın düşük sıcaklık çatlama direnci üzerinde etkili olmuştur. Kuru agregası yöntemi ile çatlama direncinde yaklaşık %8 oranında bir artma gözlemlenmesine rağmen nemli agregası yöntemi ile %16 ve hamur yöntemi ile %14 oranında azalmalar görülmüştür.

25°C sıcaklıkta yapılan dolaylı çekme mukavemeti testinde, koşullandırılmış ve koşullandırılmamış deniz kabuğu agregası ve filleri içeren karışımlardan, koşullandırılmamış ve hamur yöntemi ile hazırlanmış karışım hariç, bütün karışımlar kontrol (sadece bazalt agregası kullanılan) karışıma göre daha yüksek çatlama dirençleri ortaya koymuştur. Koşulsuz karışımlar içerisinde en yüksek çekme direnci en büyük

boyutlu deniz kabuğu agregası içeren (0.425mm) karışımlarda görülürken koşullu karışımlar içerisinde ise nemli agrega yöntemi ile hazırlanan seçeneklerde görülmüştür. Hem koşullu hem de koşulsuz durumda çekme mukavemetindeki en büyük artışın %17 olduğu belirlenmiştir.

Deniz kabuğu agregası içeren karışımların çekme mukavemeti oranları (ITSR) kontrol karışımına eşdeğer veya daha yüksek çıkmıştır. Nemli agrega yöntemi su hasarı direnci açısından en etkili yöntem (ITSR=81.22) olmuş, kontrol karışıma oranla su hasarı direncinde yaklaşık %9 artış sağlamış, %80 eşik değerini geçen tek karışım olmuştur. Hamur yönteminden de 78.39 ITSR değeri elde edilmiştir. Farklı bir katkı kullanılmadığı düşünülürse, bunun bazalt agregası ile soyulma direncinin sağlanması açısından önemli olduğu değerlendirilmektedir.

Koşullu ve koşulsuz karışımların çekme mukavemetlerinin artması bunun yanında ITSR değerlerinin de kontrol karışıma göre artması, yük yayma kapasitesinin arttığı ve ayrıca adezyon kuvveti artarken kohezyonun azalmadığı şeklinde de yorumlanabilir.

Deniz kabuğu agregası içeren karışımların Marshall stabilite değerlerinde genel anlamda azalma görülmüştür. 0.180 mm maksimum boyutlu deniz kabuğu agregası içeren karışım ve hamur yöntemi ile hazırlanan karışım hariç diğer karışımların tamamı kontrol karışımdan daha düşük Marshall stabilitesi göstermiştir. Marshall stabilite değerleri arasında çok yüksek farklar oluşmamıştır. Kontrol karışım ve daha büyük boyutlu deniz kabuğu agregası içeren karışımların akma değerleri yüksek çıkmış ancak deniz kabuğu filleri içeren karışımlarda akma değerleri çok daha düşmüştür. Marshall oranı (MQ) değerleri, stabilite değerlerinde çok büyük farklılıklar oluşmamasına rağmen akma değerlerinden kaynaklı olarak, deniz kabuğu fillerinin kullanıldığı karışımlarda kontrol karışımdan daha yüksek çıkmıştır. Deniz kabuğu agrega boyutunun artması ile MQ değerleri ve buna bağlı olarak da karışımların deformasyon direnci azalmıştır. En yüksek MQ değerleri sırasıyla nemli agrega yöntemi (6.97 kN/mm), kuru agrega yöntemi (4.85 kN/mm) ve hamur yöntemi (3.9 5kN/mm) ile hazırlanan karışımlardan elde edilmiştir.

Hamburg tekerlek izi deneyi numuneler 50°C iç sıcaklıktayken, su içerisinde yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre, bazalt agregası yerine deniz kabuğu agregası ilave edilen karışımların tekerlek izi direncinin tamamen bazalt agregası ile hazırlanan karışımlara göre arttığı, deniz kabuğu agregası boyutunun küçülmesiyle deformasyon direncinin arttığı tespit edilmiştir. En yüksek tekerlek izi direnci deniz kabuğunun filler olarak kullanıldığı karışımlarda oluşmuştur.

Deniz kabuğu fillerinin bazalt agregasına katılma yöntemleri değerlendirildiğinde, tekerlek izi direnci açısından kuru agrega yöntemi ve hamur yöntemi arasında önemli bir farklılık görülmemiştir. Hatta aynı sünme eğimi değerleri oluşmuştur. Nemli agrega yönteminde ise diğer katılma yöntemlerine göre daha yüksek deformasyon dirençleri görülmüştür.

Hamburg tekerlek izi deneyi ile yapılan soyulma yorumlamasında, deniz kabuğu ilavesinin soyulma büküm noktalarını yükselttiği, soyulma direncini artırdığı görülmüştür. Deniz kabuğu agregası boyutu soyulma davranışı üzerinde pozitif etki oluşturmuştur. Deniz kabuğu agregasının boyutunun küçülmesiyle soyulma direnci artmıştır. Deniz kabuğu filleri ile katılma yöntemlerine göre hazırlanan karışımlar diğer karışımlara göre daha yüksek soyulma dirençleri göstermiştir. Nemli agrega yöntemi ile en yüksek soyulma direnci görülmüş, kuru agrega yöntemi ile hamur yönteminden birbirine yakın sonuçlar elde edilmiştir.

Tekrarlı sünme deneylerinden elde edilen sonuçlar da diğer deney sonuçlarıyla benzerlik göstermiştir. Bazalt agregası yerine deniz kabuğu agregası ilavesi ile deformasyon direncinin arttığı, ancak en yüksek deformasyon dirençlerinin deniz kabuğu filleri kullanılan seçeneklerde olduğu görülmüştür. Deniz kabuğu filleri ilaveli karışımlar kendi aralarında karşılaştırıldığında, ıslak agrega yönteminde en küçük, kuru agrega yönteminde ise en yüksek deformasyonlar görülmüştür.

Deniz kabuğunda yaklaşık %60 oranında kalsiyum oksit bulunmaktadır. Deniz kabuğunun küçük boyutlara öğütülmesi ile kalsiyum oksitin daha kolay reaksiyona girerek karışım özelliklerini artırdığı düşünülmektedir. Hamur yönteminde ise su ile erken temas olduğundan reaksiyonun erken gerçekleştiği ve bundan dolayı bitüm ile agrega arasındaki adezyon kuvvetinin, nemli agrega yönteminde olduğu kadar, iyileşmediği düşünülmektedir. Maksimum boyutu 0.425 mm ve 0.180 mm olan deniz kabuğu agregalarının kullanılmasından ziyade deniz kabuğu fillerinin kullanılması karışımların mekanik özelliklerini daha fazla arttırmıştır. Bu yüzden deniz kabuğunun filler boyutunda karışımlara katılmasının daha uygun olacağı tespit edilmiştir.

Taş mastik asfalt karışımlarda bazalt agregası gibi sert, sağlam ve dayanıklı agregaların kullanılması gerektiği şartnamelerde belirtilmektedir. Ancak bu tür agregalardan filler elde etmek oldukça zordur. Diğer yandan, kullanımı her geçen gün artan TMA karışımlarda %12'ye kadar çıkabilen yüksek filler oranı bu bağlamda üretim açısından güçlük teşkil etmektedir. Bu çalışma ışığında, atık madde olarak bulunan deniz

kabuklarının TMA karışımlarda filler olarak hem ucuz hem de etkili bir katkı maddesi olarak değerlendirilebileceği ayrıca atık yönetimi konusunda çevresel kaygılara da önemli bir çözüm olabileceği görülmüştür.

Bu çalışma sonucunda nemli agrega yönteminin daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Deniz kabuğu filler toplam agrega ağırlığına oranla %5 olarak kullanılmıştır. Aynı yöntemle, daha yüksek oranlarda deniz kabuğu fillerinin katılma yöntemleri üzerindeki etkisine yönelik çalışmalara devam edilebilir.



5. KAYNAKLAR

- Ahmed, I., 1993. Use of Waste Materials in Highway Construction, Purdue University, Noyes Data Corporation.
- Ahmedzade, P., Alataş, T. ve Geçkil, T., 2007. The Effect of Carbon Black on The Mechanical Properties of Asphalt Mixtures, Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences, 25, 3, 179-189.
- Aminbakhsh, S., 2013. Bitüm ve Bitümlü Karışımların Özelliklerinin Şeker Pancarı Melası Kullanılarak Geliştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Arabani, M., Babamohammadi, S. ve Azarhoosh, A. R., 2015. Experimental Investigation of Seashells Used as Filler in Hot Mix Asphalt, International Journal of Pavement Engineering, 16, 6, 502-509.
- Arslan, F., 2014. Taş Mastik Asfalt Karışımlarda İstanbul Çevresindeki Cebeci-Dolamitli Kireçtaşı, Gölcük-Kumtaşı ve Karatepe-Bazaltı Kullanımının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Aschenbrener, T., Terrel, R. L. ve Zamora, R. A., 1994. Comparison of the Hamburg Wheel Tracking Device and the Environmental Conditioning System to Pavements of Known Stripping Performance, Report No. CDOTDTD-R-94-1, Colorado Department of Transportation, Denver, Colorado.
- Atud, T.J., Kanitpong, K. ve Martono, W., 2007. Laboratory Evaluation of Hydrated Lime Application Process in Asphalt Mixture for Moisture Damage and Rutting Resistance, Transportation Research Board 86th Annual Meeting, Washington, D.C., Paper No. 1508.
- Beecroft, A. ve Petho, L., 2015. Commissioning of Hamburg Wheel Tracking Device (HWDT), National Asset Centre of Excellence, Final Report, 007180.
- Bindu, C. S. ve Beena, K. S., 2010. Waste Plastic as a Stabilizing Additive in Stone Mastic Asphalt, International Journal of Engineering and Technology, 2, 6, 379-387.
- Blazejowski, K., 2011. Stone Matrix Asphalt Theory and Practice, The CRC Press, U.S..
- Cooley, L.A., Kandhall, P.S., Buchanan, M.S., Fee, F. ve Epps, A., 2000. Loaded Wheel Testers in the United States: State of the Practice, Transportation Research E-Circular, NCAT Report 00-04.

- Çavdar, E., 2019. Bitkisel Atık Yağ Katkısının SBS Modifiyeli Bitümün Fiziksel ve Reolojik Özellikleri Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Das, A. K. ve Singh, D., 2017. Investigation of Rutting, Fracture and Thermal Cracking Behavior of Asphalt Mastic Containing Basalt and Hydrated Lime Fillers, Construction and Building Materials, 141, 442-452.
- Diab, A., You, Z., Othman, A. M. ve Ahmed, H. Y., 2012. Effect of Hydrated Lime Application Method on Mechanical and Fatigue Properties of HMA, The Twelfth COTA International Conference of Transportation Professionals, Beijing, China, 3327-3334.
- Doğan, O., 2006. Esnek Üstyapılı Devlet Yollarındaki Bozulmaların Bulanık Mantık ile Tahmini, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Drüschner, L. ve Schäfer, V., 2000. Taş Mastik Asfalt, Çeviren: Çetinkaya R., 2009, Deutscher Asphaltverband e. V. Schieffelingsweg 653123, Bonn.
- Ekici, Ö., 2012. Denizden Gelen Cevherler Deniz Kabukları, Bilim ve Teknik, 533, 36-41.
- Erfen, Y. ve Yunus, K. N. H., 2015. The Appropriateness of Egg Shell as Filler in Hot Mix Asphalt, 10.13140/RG.2.1.4113.5201.
- Hanlı, E., 2009. Esnek Yol Üstyapısında Oluşan Bozulmalar ve Değerlendirmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Hicks, R. G., 1991. Moisture Damage in Asphalt Concrete, Transportation Research Board, National Research Council Washington, D.C.
- İlcalı, M., Tayfur, S., Özen, H., Sönmez, İ. ve Eren, K., 2001. Yıldız Teknik Üniversitesi Yayın Merkezi Başkanlığı, Asfalt ve Uygulamaları, İsfalt Bilimsel Yayını No:1, İstanbul.
- İncegöl, M., 2010. Türkiye’de Esnek Üstyapı Bozulmalarının Çevre Etkileri Göz Önüne Alınarak Modellenmesi, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- İskender, C., 2017. Cam Agrega Boyutu ve Agrega Gradasyonunun Asfalt Kaplama Performansına Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- İskender, E. ve Aksoy, A., 2013. Su Hasarı Önleyici Katkılarının Tekerlek İzi Direncine Etkisinin Araştırılması, SDU International Technologic Science, 5, 2, 103-113.
- İskender, E., 2008. Koşullandırma Sistemlerinin Geleneksel ve Modifiye Asfalt Karışımlar Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

- İyınam, Ş., 1997. Karayollarının Üstyapı Bakım Çalışmalarını Planlama Metodolojisi, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Jasni, N. E., Masri, K. A., Ramadhansyah, P. J., Arshad, A. K., Shaffie, E., Ahmad, J., ve Norhidayah, A. H., 2020. Mechanical Performance of Stone Mastic Asphalt Incorporating Steel Fiber, 3rd National Conference on Wind & Earthquake Engineering and International Seminar On Sustainable Construction Engineering, Kuala Lumpur, Malaysia, 012026.
- Kabadayı, E., 2019. Üleksitin Taş Mastik Asfalt Karışımlarda Filler Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Kaşak, S., 2007. Taş Mastik Asfalt Karışımında Katkı Maddesi Olarak Fiber Yerine Diatomit'in Uygulanabilirliğinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Kaya, D. ve Topal, A., 2016. Marshall ve Superpave Tasarım Yöntemleri Arasındaki Farklılıkların İlk Karışım Asfaltlar Açısından İncelenmesi, C.B.Ü. Fen Bilimleri Dergisi, 12, 2, 289-302.
- KGM, 2013. Karayolları Teknik Şartnamesi-2013, Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Kütük, S. ve Kütük-Sert, T., 2017. Particle Size Distribution of Nanoscale Ulexite Mineral Prepared by Ball Milling, International Journal of Science and Technology, 3, 3, 86-103.
- Lesueur, D., Petit, J. ve Ritter, H., 2013. The Mechanisms of Hydrated Lime Modification of Asphalt Mixtures: A State-of-The-Art Review, Road Materials and Pavement Design, 14, 1, 1-16.
- Liang, R.Y., 2008. Refine AASHTO T283 Resistance of Compacted Bituminous Mixture to Moisture Induced Damage for Superpave , Department of Civil Engineering, University of Akron, Akron.
- Little, D. N., Epps J. A. ve Sebaaly, P. E., 2006. The Benefits of Hydrated Lime in Hot Mix Asphalt, NLA Publication, Virginia.
- Liu, Y., Han, S., Zhang, Z. ve Xu, O., 2011. Design and Evaluation of Gap-Graded Asphalt Rubber Mixtures, Materials and Design, 35, 873-877.
- Lu, Q. ve Harvey, J. T., 2006. Evaluation of Hamburg Wheel-Tracking Device Test with Laboratory and Field Performance Data, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1970, 1, 25-44.
- Muniandy, R., Aburkaba, E. ve Taha, R., 2013. Effect of Mineral Filler Type and Particle Size on the Engineering Properties of Stone Mastic Asphalt Pavements, The Journal of Engineering Research (TJER), 10, 2, 13-32.

- Nciri, N., Shin, T., Lee, H. ve Cho, N., 2018. Potential of Waste Oyster Shells as a Novel Biofiller for Hot-Mix Asphalt, Applied Sciences, 8, 3, 415.
- Orhan, F., 2012. Bitümlü Karışımlar Laboratuvarı Çalışmaları, Karayolları Genel Müdürlüğü Araştırma Geliştirme Dairesi Başkanlığı Üstyapı Geliştirme Şubesi Müdürlüğü, Ankara.
- Razzaq, A. K., Yousif, R. A. ve Tayh, S. A., 2018. Characterization of Hot Mix Asphalt Modified by Egg Shell Powder, International Journal of Engineering Research and Technology, 11, 3, 481-492.
- Ruiz, G., Chávez, F., Santamaría, S., Araujo, W., Timanáa, J. ve Schmittc, R., 2018. Laboratory Evaluation of Seashells Used as Fine Aggregate in Hot Mix Asphalt, International Journal of Pavement Engineering, 1-9.
- Sağlık, A. ve Güngör, A. G., 2008. Karayolları Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi, Karayolları Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı Üstyapı Şubesi Müdürlüğü, Ankara.
- Shidhore, A. V., 2005. Use of Lime as Anti-Strip Additive for Mitigating Moisture Susceptibility of Asphalt Mixes Containing Baghouse Fines, Master Thesis, North Carolina State University, Raleigh, North Carolina.
- Srinivasan, G., 2004. Evaluation of Indirect Tensile Strength to Identify Asphalt Concrete Rutting Potential, Master Thesis, West Virginia University, Department of Civil and Environmental Engineering, Morgantown, West Virginia.
- Şengül, C. E., Oruç, Ş., İskender, E. ve Aksoy, A., 2013. Evaluation of SBS Modified Stone Mastic Asphalt Pavement Performance, Construction and Building Materials, 41, 777-783.
- Taşdemir, Y., 1998. Stone Mastik Asfalt Karışımlarının Etüdü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- TOB, 2020. Su Ürünleri İstatistikleri, Tarım ve Orman Bakanlığı, Ankara.
- Tran, J. ve Loon, H. V., 2009. Indirect Tensile Strength of Asphalt Mixes in South Australia, Australian Asphalt Paving Association, Thirteenth International Flexible Pavements Conference, Surfers Paradise, Queensland, Australia, 1-3.
- Tuğlu, H. ve Kazankıran, H., 2004. Ülkemizde Uygulanan Aşınma Tabakası Şartnameleri, Problemler ve İlk Yaygın SMA Uygulaması, 4. Ulusal Asfalt Sempozyumu, Ankara, 49-69.
- Uluçaylı, M. ve Yavuz, A., 2002. Asfalt El Kitabı, Sistem Ofset, İstanbul.
- Umar, F. ve Ağar, E., 1991. Yol Üstyapısı, İ.T.Ü İnşaat Mühendisliği Matbaası, İstanbul.

- URL-1, <https://www.lime.org/lime-basics/uses-of-lime/construction/asphalt/> 19 Şubat 2020.
- URL-2, <https://pavementinteractive.org/performance-tests-for-rutting/> 25 Şubat 2020.
- URL-3, <https://insapedia.com/asfalt-yollarda-meydana-gelen-kusur-ve-hasar-cesitleri/> 26 Şubat 2020.
- URL-4, https://upload.wikimedia.org/wikipedia/en/9/9c/SMA_and_DGA.jpg 02 Mart 2020.
- Yardım, M. S. ve Arslan, F., 2013. Türkiye’de Taş Mastik Asfalt Kaplama Kullanımı ve Literatür Üzerine Bir Değerlendirme, 6. Ulusal Asfalt Sempozyumu ve Sergisi, Ankara, 61-72.
- Yıldız, K., 2003. Marshall Dizayn Metodu ile Optimum Bitüm Muhtevasının Belirlenmesinde Deney Parametrelerinin Sonuca Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Yıldız, Z. B., 2019. Deniz Kabuğu, Kitin ve Kitosanla Karşılaştırmalı Ağır Metal Adsorpsiyonunun İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivas.

ÖZGEÇMİŞ

Kübra ÇEVİRİM, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği bölümünü kazanarak, inşaat mühendisi unvanıyla bu bölümden mezun oldu. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitime başladı. Batman Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ulaştırma Anabilim Dalı'nda Araştırma Görevlisi olarak göreve başladı. İngilizce bilmekte ve halen Batman Üniversitesinde Araştırma Görevlisi görevine devam etmektedir.

