

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**CAM AGREGA BOYUTU VE AGREGA GRADASYONUNUN ASFALT
KAPLAMA PERFORMANSINA ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Cansu İSKENDER

HAZİRAN 2017

TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**CAM AGREGA BOYUTU VE AGREGA GRADASYONUNUN ASFALT KAPLAMA
PERFORMANSINA ETKİSİ**

Cansu İSKENDER

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

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 23 / 05 / 2017

Tezin Savunma Tarihi : 16 / 06 / 2017

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Erol İSKENDER

Trabzon 2017

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında
"Cansu İSKENDER Tarafından Hazırlanan"**

**CAM AGREGA BOYUTU VE AGREGA GRADASYONUNUN ASFALT KAPLAMA
PERFORMANSINA ETKİSİ**

**başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 31 / 05 / 2017 gün ve 1704 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak kabul edilmiştir.**

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Atakan AKSOY

Üye : Yrd. Doç. Dr. Erol İSKENDER

Üye : Yrd. Doç. Dr. Tuba KÜTÜK

Atakan
Erol
T. Kütük

Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ

Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak hazırlamış olduğum “Cam Agregası Boyutu ve Agregası Gradasyonunun Asfalt Kaplama Performansına Etkisi” adlı bu tezin ülke bilimine ve ekonomisine katkıda bulunacağını ummaktayım. Ülkemizde; ekonomi, sanayileşme, kentleşme vb. alanlarındaki hızlı gelişme üretilen atık miktarının da artmasına neden olmaktadır. Artan atık miktarına bağlı olarak geri dönüşüm ile birlikte yeni ürünlerin elde edilmesi önem kazanmıştır. Bu bağlamda, bu tez çalışmasında atık camların asfalt karışımlarda kullanılabilirliğinin araştırılması konusunda literatüre katkı yapılması hedeflenmiştir.

Bu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir. Proje numarası: FAY-2016-5471. Çalışma konusunu öneren ve bu konuda bana cesaret veren danışman hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Erol İSKENDER'e çalışmam esnasında değerli vakitlerini bana ayırdıkları ve desteklerini hiç eksik etmedikleri için sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Tüm eğitim hayatım boyunca bana daima destek olan aileme teşekkürlerimi sunarım.

Cansu İSKENDER
Trabzon 2017

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Cam Agregası Boyutu ve Agregası Gradasyonunun Asfalt Kaplama Performansına Etkisi ” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Yrd. 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. 16/06/2017

Cansu İSKENDER

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET.....	VII
SUMMARY.....	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XIII
SEMBOLLER DİZİNİ.....	XV
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Problemin Tanımı.....	1
1.3. Amaç.....	4
1.4. Çalışmanın Özgeçmişi.....	5
1.5. Esnek Üstyapılarda Temel Problemler.....	16
1.5.1. Soyulma ve Sökülme.....	16
1.5.2. Tekerlek İzi Oluşumu.....	16
1.5.3. Çatlak Oluşumu.....	17
1.5.3.1. Yorulma Çatlaması.....	18
1.5.3.2. Düşük Sıcaklık Çatlaması.....	18
1.5.4. Bitümün Yaşlanması.....	19
1.6. Agrega Gradasyonuna Göre Asfalt Karışım Türleri.....	19
1.6.1. Açık Gradasyonlu Karışım.....	20
1.6.2. Kesikli Gradasyonlu Karışım.....	21
1.6.3. Yoğun Gradasyonlu Karışım.....	21
1.6.4. Üniform Gradasyonlu Karışım.....	22
1.7. Asfalt Karışımlarda Kullanılan Katkı Malzemeleri.....	22
1.8. Modifikasyon Yöntemi.....	24
1.9. Atık ve Çeşitleri.....	26

1.10.	Atık Yönetimi ve Atık Camların Geri Dönüşümü.....	28
1.10.1.	Camın Yapısı ve Çeşitleri.....	31
1.10.2.	Dünyada Atık Camları Geri Dönüşümü.....	32
1.10.3.	Türkiye’de Atık Camların Geri Dönüşümü.....	34
1.11.	Atık Camın Kullanım Alanları.....	35
1.11.1.	Cam Katkılı Asfaltlar.....	36
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	38
2.1.	Giriş.....	38
2.2.	Çalışmada Kullanılan Malzemeler.....	39
2.2.1.	Bitümlü Bağlayıcı ve Özellikleri.....	39
2.2.2.	Agrega Özellikleri.....	39
2.2.3.	Cam Agregalar ve Özellikleri.....	42
2.2.4.	Sönmüş Kireç ve Özellikleri.....	44
2.2.5.	Nanokil ve Özellikleri.....	46
2.2.6.	Selüloz Elyaf ve Özellikleri.....	48
2.3.	Karışım Tasarımları.....	49
2.4.	Yöntem.....	51
2.4.1.	AASHTO T 283 Koşullama Sistemi.....	52
2.4.2.	Modifiye Lottman (AASHTO T 283) Testi.....	53
2.4.3.	Dolaylı Çekme Mukavemeti Testi (ITST).....	55
2.4.4.	Tekrarlı Yük Sünme Testi (RCT).....	57
2.4.5.	Hamburg Tekerlek İzi Deneyi (HWTT).....	61
3.	BULGULAR VE İRDELEME.....	67
3.1.	Giriş.....	67
3.2.	Modifiye Lottman (AASHTO T 283) Testine Ait Bulgular ve İrdeleme..	67
3.3.	Dolaylı Çekme Mukavemeti Testine Ait Bulgular ve İrdeleme.....	82
3.4.	Tekrarlı Yük Sünme Testine Ait Bulgular ve İrdeleme.....	87
3.5.	Hamburg Tekerlek İzi Testine Ait Bulgular ve İrdeleme.....	94
4.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	104
5.	KAYNAKLAR.....	108
ÖZGEÇMİŞ		

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

CAM AGREGA BOYUTU VE AGREGA GRADASYONUNUN ASFALT KAPLAMA
PERFORMANSINA ETKİSİ

Cansu İSKENDER

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Yrd. Doç. Dr. Erol İSKENDER
2017, 114 Sayfa

Atık maddelerin tekrar ekonomiye kazandırılması için çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalardan birisi de atık camların asfalt kaplamalarda agrega olarak kullanılmasıdır. Bu çalışmada, cam atıkların agrega olarak asfalt karışımlarda kullanılabilirliği araştırılmıştır. Maksimum cam agrega boyutu seçenekleri 0.075mm, 2.00mm, 4.75mm ve 9.5mm olarak seçilmiştir. Geleneksel bitüm, nanokil modifiye bitüm (bitüm ağırlığına göre %3) ve sönmüş kireç modifiye bitüm (bitüm ağırlığına göre %2) kullanılmıştır. Yoğun gradasyonlu (geleneksel asfalt betonu-GAB) ve kesikli gradasyonlu (taş mastik asfalt-TMA) karışımlar Marshall metoduna göre tasarlanmıştır. Karışımlar tekrarlı yük sünme (RCT), dolaylı çekme mukavemeti, modifiye Lottman ve Hamburg tekerlek izi (HWTT) testleri ile düşük sıcaklık çatlama, su hasarına karşı direnç ve kalıcı deformasyon davranışları yönünden değerlendirilmiştir. Cam agrega kullanımının GAB karışımlarında daha iyi sonuçlar verdiği, cam agrega boyutunun artması ile GAB ve TMA karışımların su hasarı direncinde azalma olduğu, nanokil veya sönmüş kireç modifiye bitüm kullanımının karışımların mekanik özelliklerini iyileştirdiği, 2.00mm maksimum boyuttaki cam agrega kullanımının nispeten daha iyi su hasarı ve deformasyon özellikleri gösterdiği, HWTT ile RCT ve modifiye Lottman yöntemleri arasında anlamlı bir ilişkinin olduğu anlaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Cam agrega, Sönmüş kireç, Nanokil, Taş mastik asfalt, Asfalt betonu, Hamburg tekerlek izi testi, Modifiye Lottman, Tekrarlı yük sünme testi, Yoğurmalı kompaktör, Kalıcı deformasyon, Su hasarı.

Master Thesis

SUMMARY

EFFECT OF GLASS AGGREGATE SIZE AND AGGREGATE GRADATION ON
ASPHALT PAVEMENT PERFORMANCE

Cansu ISKENDER

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor: Assist. Prof. Dr. Erol ISKENDER
2017, 114 Pages

Various studies are being carried out to bring the waste materials back into the economy. One of these works is the use of waste glass as aggregate in asphalt pavements. In this study, the use of glass waste as aggregate asphalt mixtures was investigated. The maximum glass aggregate size options were selected as 0.075mm, 2.00mm, 4.75mm and 9.5mm. Conventional bitumen, nano clay modified bitumen (3% by weight of bitumen) and hydrated lime modified bitumen (2% by bitumen weight) were used. Mixtures with dense gradation (conventional asphalt concrete) and gap-graded (stone mastic asphalt) were designed according to the Marshall method. The mixtures were evaluated for low temperature cracking, resistance to water damage and permanent deformation behavior with repeated load creep (RCT), indirect tensile strength, modified Lottman and Hamburg wheel tracking (HWTT) tests. It is understood that the use of glass aggregates gives better results for dense graded asphalt mixtures from gap-graded mixtures, the increase in glass aggregate size reduces the water damage resistance of HMA and SMA mixtures, nano clay or hydrated lime modification improves the mechanical properties of the both mixtures, using of 2.00mm sized maximum glass aggregate shows relatively better water damage and deformation properties, there is a meaningful relationship between HWTT with RCT and modified Lottman methods.

Key Words: Glass aggregate, Hydrated lime, Nano clay, Stone mastic asphalt, Asphalt concrete, Hamburg wheel tracking test, Modified Lottman test, Repeated load creep test, Gyrotory compactor, Permanent deformation, Water damage.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.	Yükleme tekrarı ve tekerlek izi derinliği ilişkisi.....	10
Şekil 2.	Agrega gradasyon dağılımı	20
Şekil 3.	Kesikli gradasyonlu karışım ve yoğun gradasyonlu karışımın karşılaştırması	22
Şekil 4.	Kentsel katı atık bileşimleri	27
Şekil 5.	Türkiye 2006 yılı katı atık oranları.....	28
Şekil 6.	Atık yönetimi döngüsü	29
Şekil 7.	Atık cam görüntüleri	30
Şekil 8.	AB 27 belediye katı atık bileşimi	32
Şekil 9.	AB 27 2008 yılı cam geri dönüşüm oranları	33
Şekil 10.	Atıkların geri dönüştürülme oranları.....	34
Şekil 11.	Deneysel akış diyagramı.....	38
Şekil 12.	Taş mastik asfalt gradasyon eğrisi	41
Şekil 13.	Geleneksel asfalt betonu gradasyon eğrisi.....	41
Şekil 14.	Toplanan atık camlardan bir görüntü	42
Şekil 15.	Kırma ve öğütme sonrası elenen atık camlardan bir görüntü	43
Şekil 16.	Kullanılan sönmüş kireçten bir görüntü	44
Şekil 17.	Bitümün modifiye edilmesi	45
Şekil 18.	Kullanılan nano kilden bir görüntü.....	47
Şekil 19.	Süzülme önleyici selüloz fiber katkısı	48
Şekil 20.	Üretilen örneklerin bir bölümünden görüntü	50
Şekil 21.	AASHTO T 283 yönteminde koşullama aşamalarının gösterimi.....	53
Şekil 22.	Donma döngüsü (a) ve sıcak suda bekletme döngüsü (b) uygulanmış örnekler	53
Şekil 23.	AASHTO T 283 yöntemi ile su hasarının belirlenmesi	54
Şekil 24.	Düşük sıcaklıkta örnekte meydana gelen çatlama	56
Şekil 25.	Asfalt betonunun tekrarlı yük altında sünme davranışı	57
Şekil 26.	Üniversal asfalt deney cihazı	59

Şekil 27.	Şematik Hamburg tekerlek izi test eğrisi.....	63
Şekil 28.	Kenarları kesilerek HWT cihazı kalıbına yerleştirilen 150mm çaplı ikili örnek.....	64
Şekil 29.	Hamburg tekerlek izi deney cihazı.....	65
Şekil 30.	Geleneksel bağlayıcılı TMA karışımların koşulsuz ITS değerleri.....	68
Şekil 31.	Nanokil modifiye TMA karışımların koşulsuz ITS değerleri.....	68
Şekil 32.	Sönmüş kireç modifiye TMA karışımların koşulsuz ITS değerleri.....	68
Şekil 33.	Geleneksel bağlayıcılı GAB karışımların koşulsuz ITS değerleri.....	69
Şekil 34.	Nanokil modifiye GAB karışımların koşulsuz ITS değerleri.....	69
Şekil 35.	Sönmüş kireç modifiye GAB karışımların koşulsuz ITS değerleri.....	69
Şekil 36.	Cam agregası içermeyen koşulsuz asfalt karışımların ITS değerleri.....	70
Şekil 37.	0.075mm maksimum boyutlu cam agregası içeren koşulsuz asfalt karışımların ITS değerleri.....	70
Şekil 38.	2.00mm maksimum boyutlu cam agregası içeren koşulsuz asfalt karışımların ITS değerleri.....	71
Şekil 39.	4.75mm maksimum boyutlu cam agregası içeren koşulsuz asfalt karışımların ITS değerleri.....	71
Şekil 40.	9.5mm maksimum boyutlu cam agregası içeren koşulsuz asfalt karışımların ITS değerleri	71
Şekil 41.	Geleneksel bağlayıcılı TMA karışımların koşullu ITS değerleri	72
Şekil 42.	Nanokil modifiye TMA karışımların koşullu ITS değerleri.....	72
Şekil 43.	Sönmüş kireç modifiye TMA karışımların koşullu ITS değerleri.....	72
Şekil 44.	Geleneksel bağlayıcılı GAB karışımların koşullu ITS değerleri.....	73
Şekil 45.	Nanokil modifiye GAB karışımların koşullu ITS değerleri.....	73
Şekil 46.	Sönmüş kireç modifiye GAB karışımların koşullu ITS değerleri.....	74
Şekil 47.	Cam agregası içermeyen koşullu asfalt karışımların ITS değerleri.....	74
Şekil 48.	0.075mm maksimum boyutlu cam agregası içeren koşullu asfalt karışımların ITS değerleri	75
Şekil 49.	2.00mm maksimum boyutlu cam agregası içeren koşullu asfalt karışımların ITS değerleri.....	75
Şekil 50.	4.75mm maksimum boyutlu cam agregası içeren koşullu asfalt karışımların ITS değerleri	75
Şekil 51.	9.5mm maksimum boyutlu cam agregası içeren koşullu asfalt karışımların ITS değerleri.....	76
Şekil 52.	Geleneksel bağlayıcılı TMA karışımların ITSR değerleri.....	77
Şekil 53.	Nanokil modifiye TMA karışımların ITSR değerleri.....	77

Şekil 54.	Sönmüş kireç modifiye TMA karışımların ITSR değerleri.....	78
Şekil 55.	Geleneksel bağlayıcılı GAB karışımların ITSR değerleri.....	78
Şekil 56.	Nanokil modifiye GAB karışımların ITSR değerleri.....	78
Şekil 57.	Sönmüş kireç modifiye GAB karışımların ITSR değerleri.....	79
Şekil 58.	Cam agregası içermeyen asfalt karışımların ITSR değerleri.....	79
Şekil 59.	0.075mm maksimum boyutlu cam agregası içeren asfalt karışımların ITSR değerleri	79
Şekil 60.	2.00mm maksimum boyutlu cam agregası içeren asfalt karışımların ITSR değerleri.....	80
Şekil 61.	4.75mm maksimum boyutlu cam agregası içeren asfalt karışımların ITSR değerleri	80
Şekil 62.	9.5mm maksimum boyutlu cam agregası içeren asfalt karışımların ITSR değerleri.....	80
Şekil 63.	Koşullaması sonrası dağılan örneklerden bir görüntü.....	81
Şekil 64.	Geleneksel bağlayıcılı TMA karışımların ITS değerleri	82
Şekil 65.	Nanokil modifiye TMA karışımların ITS değerleri.....	82
Şekil 66.	Sönmüş kireç modifiye TMA karışımların ITS değerleri.....	83
Şekil 67.	Geleneksel bağlayıcılı GAB karışımların ITS değerleri.....	83
Şekil 68.	Nanokil modifiye GAB karışımların ITS değerleri.....	83
Şekil 69.	Sönmüş kireç modifiye GAB karışımların ITS değerleri.....	84
Şekil 70.	Cam agregası içermeyen asfalt karışımların ITS değerleri.....	85
Şekil 71.	0.075mm maksimum boyutlu cam agregası içeren asfalt karışımların ITS değerleri.....	85
Şekil 72.	2.00mm maksimum boyutlu cam agregası içeren asfalt karışımların ITS değerleri	86
Şekil 73.	4.75mm maksimum boyutlu cam agregası içeren asfalt karışımların ITS değerleri	86
Şekil 74.	9.5mm maksimum boyutlu cam agregası içeren asfalt karışımların ITS değerleri.....	86
Şekil 75.	Cam agregası içermeyen koşulsuz geleneksel asfalt betonu karışımların tekrarlı yük sünme eğrileri.....	87
Şekil 76.	0.075mm maksimum boyutlu cam agregası içeren koşulsuz geleneksel asfalt betonu karışımların tekrarlı yük sünme eğrileri.....	88
Şekil 77.	2.00mm maksimum boyutlu cam agregası içeren koşulsuz geleneksel asfalt betonu karışımların tekrarlı yük sünme eğrileri.....	88
Şekil 78.	4.75mm maksimum boyutlu cam agregası içeren koşulsuz geleneksel asfalt betonu karışımların tekrarlı yük sünme eğrileri.....	89

Şekil 79.	9.5mm maksimum boyutlu cam agregası içeren koşulsuz geleneksel asfalt betonu karışımlarının tekrarlı yük sünme eğrileri.....	89
Şekil 80.	Cam agregası içermeyen koşulsuz taş mastik asfalt karışımlarının tekrarlı yük sünme eğrileri.....	90
Şekil 81.	0.075mm maksimum boyutlu cam agregası içeren koşulsuz taş mastik asfalt karışımlarının tekrarlı yük sünme eğrileri.....	90
Şekil 82.	2.00mm maksimum boyutlu cam agregası içeren koşulsuz taş mastik asfalt karışımlarının tekrarlı yük sünme eğrileri.....	91
Şekil 83.	4.75mm maksimum boyutlu cam agregası içeren koşulsuz taş mastik asfalt karışımlarının tekrarlı yük sünme eğrileri.....	91
Şekil 84.	Koşulsuz TMA ve GAB için bitüm türü ve cam agregası içeriklerine göre sünme eğrileri.....	92
Şekil 85.	Koşullu TMA ve GAB için bitüm türü ve cam agregası içeriklerine göre sünme eğrileri.....	93
Şekil 86.	4.75mm maksimum boyutlu cam agregası içeren GAB ve TMA karışımlarının HWT eğrileri	95
Şekil 87.	2.00mm maksimum boyutlu cam agregası içeren GAB ve TMA karışımlarının HWT eğrileri.....	96
Şekil 88.	0.075mm maksimum boyutlu cam agregası içeren GAB ve TMA karışımlarının HWT eğrileri.....	97
Şekil 89.	Maksimum cam agregası boyutuna göre HWT eğrilerinin değerlendirilmesi.....	98

TABLolar DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1.	Bir yıllık kullanımından sonra % 10 geri dönüştürülmüş cam ile yapılan asfalt betonu test bölümlerine ait sonuçlar	8
Tablo 2.	Su hasarı üzerine sönmüş kireç ve soyulma önleyici katkının etkileri.....	10
Tablo 3.	Bitüm katkı maddelerinin genel sınıflandırılması	23
Tablo 4.	Bitümlü karışımlarda kimyasal katkıların etkileri	24
Tablo 5.	Modifiyerler ve değişiklik sağladığı özellikler	24
Tablo 6.	Cam geri kazanımıyla sağlanan tasarruflar.....	31
Tablo 7.	Asfalt çimentosu özellikleri (AC 50-70).....	39
Tablo 8.	Bazalt agregasının kimyasal analiz sonuçları.....	39
Tablo 9.	Bazalt agregasının temel özellikleri.....	40
Tablo 10.	Taş mastik asfalt karışımı ve agrega fraksiyon oranları	40
Tablo 11.	Geleneksel asfalt betonu karışımı ve agrega fraksiyon oranları	41
Tablo 12.	Cam atıkların kimyasal analiz test sonuçları	43
Tablo 13.	Cam atıkların 1150 gr agrega içindeki kullanım oranları.....	43
Tablo 14.	Kullanılan sönmüş kirecin kimyasal analiz sonuçları	45
Tablo 15.	Kullanılan nano kilin kimyasal analiz sonuçları	47
Tablo 16.	Selüloz fiber geleneksel özellikleri	48
Tablo 17.	Taş mastik asfalt tasarım sonuçları	49
Tablo 18.	Geleneksel asfalt betonu tasarım sonuçları.....	50
Tablo 19.	Karışımların pratik özgül ağırlıkları.....	51
Tablo 20.	Koşulsuz örneklerin ortalama dolaylı çekme mukavemeti değerleri.....	55
Tablo 21.	Koşullu örneklerin ortalama dolaylı çekme mukavemeti değerleri	55
Tablo 22.	Düşük sıcaklıkta örneklerin dolaylı çekme mukavemeti değerleri	57
Tablo 23.	Tekrarlı yük sünme deneyinde uygulanan parametreler	58
Tablo 24.	Koşulsuz geleneksel asfalt betonu karışımların ortalama deformasyon değerleri.....	60
Tablo 25.	Koşulsuz taş mastik asfalt karışımların ortalama deformasyon değerleri.....	60
Tablo 26.	Koşullu geleneksel asfalt betonu karışımların ortalama deformasyon değerleri.....	61

Tablo 27. Koşullu taş mastik asfalt karışımların ortalama deformasyon değerleri	61
Tablo 28. Hamburg tekerlek izi deneyinde uygulanan parametreler.....	64
Tablo 29. Geleneksel asfalt betonu karışımların ortalama tekerlek izi derinlikleri.....	65
Tablo 30. Taş mastik asfalt karışımların ortalama tekerlek izi derinlikleri.....	66
Tablo 31. GAB ve TMA karışımların dolaylı çekme mukavemeti oranları.....	76



SEMBOLLER DİZİNİ

AASHTO	Amerika Devlet Karayolu ve Ulaştırma İdareleri Birliği
GAB	Geleneksel asfalt betonu
ASTM	Amerika Test ve Malzeme Kurumu
CDOT	Colorado Ulaşım Bölümü
HL	Sönmüş kireç
HMA	Sıcak karışım asfalt
HWTD	Hamburg tekerlek izi test cihazı
HWTT	Hamburg tekerlek izi testi
ITS	Dolaylı çekme mukavemeti
NC	Nanokil
PMA	Polimer modifiye asfalt
RCT	Tekrarlı yük sünme testi
RLA	Tekrarlı yük eksenel testi
TMA	Taş mastik asfalt
TSR	Dolaylı çekme mukavemeti oranı
UM	Geleneksel bitüm
VMA	Agregalar arası boşluk
D	Asfalt briket örneğinin çapı
V_h	Hava boşluğu
V_f	Asfaltla dolu boşluk
P	Maksimum yük
t	Asfalt briket örneğinin testten önceki yüksekliği
$W_{a,}$	Bitüm içeriği

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Ülkemizde ve dünyada sanayinin, nüfusun, endüstrinin hızla artması tüketimin de artmasına neden olmaktadır. Tüketimin artmasıyla birlikte dünyada her yıl büyük oranda atık malzemeler ortaya çıkmaktadır. Artan atık üretimi insan sağlığını ve çevreyi olumsuz etkilemekte ve ülke ekonomisine zarar vermektedir. Bu sebeple, atıkların bertaraf edilip çevreden uzaklaştırılması gerekmektedir. Üretilen atıkları değerlendirmenin yolu; atıkların tekrar kullanılması, geri dönüştürülmesi ve ekonomiye kazandırılmasıdır. Bunun için atık yönetimi yaklaşımı tüm ülkeler için büyük önem arz etmektedir.

Taşıt trafiğinden kaynaklanan tekrarlı yükler altında kaplamada yorulma ve kalıcı deformasyon problemi oluşmaktadır. Donma-çözülme olaylarının tekrarlanması, suyun kaplamaya nüfuz etmesi, trafik etkisi ve bitümün yeterli kalitede olmaması v.b. sebeplerle kaplamada çatlama, soyulma ve sökülme problemlerini ortaya çıkarmaktadır. Esnek üst yapıda karşılaşılan bu problemleri en aza indirmek, yüksek bakım maliyetlerini azaltmak için çeşitli yöntemlere başvurulmaktadır. Kaliteli agrega kullanımı, agrega gradasyonunun değiştirilmesi veya değişik katkı uygulamaları kaplama performansını artırmak için genellikle kullanılan yöntemlerdendir.

1.2. Problemin Tanımı

Cam atıklar toplam atık miktarları arasında önemli bir orana sahiptir. Atık camların bir kısmı geri dönüşümle birlikte tekrar kullanılmaktadır. Bir kısmı da farklı alanlarda kullanılarak ekonomiye geri kazandırılmakta ve çevreye olan zararlı etkileri azaltılmaktadır. Atık camların kullanım alanlarından birisi yol inşaatlarıdır. Yollarda temel ve alt temel tabakalarında kullanılabildiği gibi esnek kaplamalarda aşınma tabakasında da kullanımları mevcuttur.

Atık camların bitümlü aşınma tabakasına eklenmesiyle cam katkıli asfaltlar (glassphalt) elde edilmektedir. Cam katkıli asfaltlarda soyulma problemi önemli yer

tutmaktadır. Bu nedenle kullanılacak atık cam miktarı ve boyutu özenle belirlenmelidir. Literatürdeki bazı araştırmalar (Chen ve Su, 2002; Huang vd., 2007; Arabani, 2011; Sajed ve Shafabakhsh, 2014; Behbahani vd., 2015; Issa, 2016) maksimum cam boyutunun 4.75mm (No:4) olabileceğini savunurken bazı araştırmacılar ise (Lee, 2007); Maupin, 1998) 9.5mm (3/8 inç), bazıları ise (Atkins ve Macdonald, 2009; Salem vd., 2017) 2.36mm (No:8) olabileceğini önermektedirler. Diğer yandan kırılmış cam boyutunun yanında cam içeriğinin de sınırlandırılması gerektiği vurgulanmıştır (Chen ve Su, 2002). Cam içeriğini (Maupin, 1998; Arabani, 2011) %15, (Issa, 2016; Abendeh, 2017; Chen ve Su, 2002; Behbahani vd., 2015) %10 olarak önermektedirler. Farklı filler tipleri ve cam içerikleriyle asfalt karışımının performansının değerlendirildiği bir çalışmada (Navarro vd., 2015) %8 cam içeriğinin en uygun olduğu, cam tozunun asfalt karışımlarda kullanılan diğer filler çeşitlerine alternatif olarak araştırıldığı bir diğer çalışmada (Jony vd., 2011) ise optimum cam tozu içeriği %7 olarak önerilmektedir. Maksimum kırılmış agregaya çapının 5mm olarak seğıildiği bir araştırmada (AL- Saffar, 2013) değişik cam oranları kullanılmış, mekanik test sonuçlarına bağlı olarak, toplam agregaya ağırlığına göre %8 cam içeriğinin uygun olduğu önerilmiştir.

Gradasyon değiştiğinde, optimum cam boyutu ve oranı da değişebilir (Maupin, 1998). Yoğun gradasyonlu karışımlardaki yük aktarımı ile kesikli gradasyonlardaki yük aktarımı farklılık arz etmektedir. Bu bağlamda, asfalt karışım içerisindeki optimum cam boyutu ve oranı da değişiklik gösterebilecektir. Bu konuda literatürde kapsamlı bir çalışmanın eksikliği görölmektedir.

Atık camlardaki yüksek SiO₂ içeriği soyulma problemini tetiklemektedir. Soyulma hassasiyetinin azaltılması için karışıma sönmüş kireç, amin bazlı soyulma önleyici katkılar vb. katılmaktadır. Son zamanlarda, asfalt kaplamaların performansını artırıcı özellikleri ile nanokiller dikkat çekmektedir. Bu yenilikçi materyaller cam katkılı asfaltlarda da başarıyla kullanılabilen ve su hasarı direncini arttırılabilmektedirler (Behbahani vd., 2015). Nano malzemelerin kendine özgü özelliklerinden dolayı, asfalt karışımlarda kullanımı dikkat çekmektedir. Araştırmalar (İskender, 2016; Shafabakhsh vd., 2015) nanokillerin asfalt karışımların kalıcı deformasyon ve soyulma direncinin arttırılmasında etkili olduğunu ortaya koymaktadır. Nanokil ile sönmüş kirecin cam katkılı asfalt kaplamalarda göreceli performans değerlendirmesi bir araştırma konusu olarak değerlendirilmektedir.

Asfalt karışımların performansları çeşitli yöntemlerle değerlendirilebilmektedir. Kalıcı deformasyon problemi; Statik sünme deneyi (Tam vd., 2000), tekrarlı sünme deneyi

(Witczak vd., 2002), Hamburg tekerlek izi testi (Hossain ve Rahman, 2014), Marshall stabilite oranı (Hınıslioğlu ve Ağar, 2004) ile değerlendirilebilmektedir. Su hasarı problemi (Schmidt ve Graf, 1972; Lottman, 1978), Hamburg tekerlek izi (Aschenbrener, 1995; Cooley vd., 2000), dolaylı çekme mukavemeti oranı (Buss vd., 2016), Marshall stabilite oranı (Behiry, 2013) ile, düşük sıcaklık çatlaması ise dolaylı çekme mukavemeti testi (Vasconcelos vd., 2012) ile değerlendirilebilmektedir. Bu testlerin birbirlerine göre avantajları bulunabilmektedir.

Sıcak karışım asfaltların hızlı ve güvenilir performans testi için Hamburg tekerlek izi cihazı (HWTD) başlangıçta tekerlek izi davranışını ölçmek için tasarlandı, ancak daha sonra karışımların potansiyel su direncini belirlemek için yeterli bulundu. Cihaz 1990'ların başında kaplama mühendisleri ve yetkililer tarafından teknoloji transferi için Amerika'da tanıtıldı. HWTD'nin tanıtımı ile cihazın asfalt karışımların su hassasiyetini karakterize etmek ve saha performansını tahmin etmek için araştırılmasına başlandı. Bu test, agrega kalitesine, asfalt çimento rijitliğine, kısa süreli yaşlandırma süresine, asfalt kaynağı veya rafine işlemlerine, soyulma önleyici iyileştirmelere ve sıkıştırma sıcaklarına duyarlı bulundu. Asfalt kaplamaların tekerlek izi ve soyulma potansiyelini test etmede popüler bir yöntem haline geldi (Hossain ve Rahman, 2014).

Su hasarı, karışımda asfalt ve agregalar arasındaki adezyonun (soyulma) ve mastik asfalt içindeki kohezyonun kaybıdır. Soyulma, esnek kaplamadaki bozulmaların temel nedenidir. Esnek kaplama bozulmasında soyulmaya, çatlama, sökölme ve tekerlek izi de dahil olmaktadır. Kaplama performansı üzerinde soyulmanın önemli etkilerinden dolayı, nicel ve nitel olarak pek çok farklı test karışımların su hassasiyetini belirlemek için yıllardır araştırmacılar tarafından geliştirilmektedir. Modifiye Lottman testi, hem su hasarını hem de soyulma önleyici katkıların etkinliğini değerlendirmek için geliştirilen ve yaygın olarak kabul gören bir yöntemdir (Apeageyi vd., 2006).

Modifiye Lottman testi, AASHTO T 283 (AASHTO T 283, 2014) ile standart olarak kabul edildi ve daha sonra araştırmacılar tarafından superpave tasarımlı asfalt karışımlardaki su hasarının tespiti için bir araç olarak önerildi. Yaygın olarak uygulanmasına rağmen, bazı araştırmacılar (Little ve Epps, 2001; Bahia ve Ahmed, 1999) AASHTO T 283'in soyulma tahminlerinin tutarsız olduğunu ve gerçek saha performansıyla zayıf korelasyon gösterebileceğini bildirmiştir.

Dolaylı çekme mukavemeti gibi tek bir parametrenin su hasarının değerlendirilmesinde kullanılmasının yetersiz olduğu düşünölmekte ve sorgulama konusu

olarak görülmektedir (Birgisson, 2003). AASHTO T 283'ün tutarsız tahminleri için çeşitli nedenlerden bahsedilmektedir. Tutarsızlıkların bir sebebi, AASHTO T 283'te kullanılan su koşullama şartlarının gerçek saha koşullarını iyi simüle edememesidir. Diğer sebep ise, dolaylı çekme mukavemeti testindeki bozukluk, sıkıştırma, kesme ve gerilme hatalarını da beraberinde getirmesidir. Sıkıştırma ve kesme bozulmaları, sıkıştırılmış asfalt karışımların dolaylı çekme mukavemeti testi boyunca yükleme başlığına yakın konumlarda meydana gelmektedir. AASHTO T 283 sırasında kullanılan çekme mukavemeti oranı üzerinde bileşik bozulmanın etkisi muhtemelen karışıma bağlıdır ve çekme mukavemeti üzerinde su hasarının etkileri testteki maksimum yükte belirlenmekte, oldukça karmaşık ve öngörülemez olabilmektedir (Apeagyei vd., 2006).

Tekrarlı yük sünme testi, kalıcı deformasyon hassasiyetini ölçmek için tekerlek izi testine ilgi çekici bir alternatiftir fakat farklı karışım tiplerini ayırt etme ve fonksiyonel ölçüm metodu olarak çalışabilme yetenekleri hakkında bazı şüpheler bulunmaktadır (Ulmgren, 1996).

Sönmüş kirecin, asfalt karışımların su hasarını ve donma direncini artırmak için etkili bir katkı maddesi olduğu belirtilmektedir. Test yöntemleri sönmüş kirecin yararlı etkilerini ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, çoklu donma-çözülme veya Hamburg tekerlek izi cihazı gibi test metotları, sönmüş kireci diğer sıvı soyulma önleyici katkılardan açıkça ayırt etmede kullanılabilmektedir (Asphalt Task Force, 2010).

AASHTO T 283 metodu, tekrarlı yük sünme testi ve Hamburg tekerlek izi testlerinden elde edilen verilerin de birbirleriyle doğrulanması, korelasyon ilişkilerinin irdelenmesi önemli bir konu olarak görülmektedir. Bu karşılaştırmaların farklı karışım, farklı katkı seçenekleri, farklı katkı oranları gibi durumlarda araştırılması sonuçların tutarlılığının irdelenmesi ve bir yaklaşım ortaya konulması gerekmektedir.

1.3. Amaç

Tezin ana amacı, yoğun ve kesikli gradasyona sahip cam katkılı asfalt karışımlarda karşılaştırmalı olarak optimum cam boyutunun ve oranının araştırılmasıdır. Diğer amaçlar, sönmüş kireç ve nanokil modifiye asfalt çimentosu kullanılarak üretilen cam katkılı taş mastik asfalt ve yoğun gradasyonlu asfalt örnekleri üzerinde tekrarlı yük sünme test (RCT) sonuçları ile Hamburg tekerlek izi test (HWTT) sonuçlarının tekerlek izi açısından

ve aynı zamanda AASHTO T 283 yöntemi ile Hamburg tekerlek izi sonuçlarının soyulma problemi açısından karşılaştırılmasıdır. Bununla birlikte, sönmüş kirecin ve nanokilin cam katkılı asfalt karışımlarda modifiyer olarak performanslarının karşılaştırılması, kullanılabilirliklerinin araştırılması hedeflenmiştir.

1.4. Çalışmanın Özgeçmişi

Artan atık bileşimi geri dönüştürülmüş malzemelerin temininde büyük bir potansiyel olmasına rağmen, bazı faktörler bu tür geri dönüşüm faaliyetlerini azaltabilmektedir. Birincil malzemeler yerine ikincil (geri dönüştürülmüş) malzemelerin kullanımı arazi doldurma basınçlarının hafiflemesine ve çıkarma talebinin azalmasına yardımcı olmakla birlikte, düşük yol performansı ve ek maliyetler üzerine endişeler uygulamalarda geri dönüştürülmüş malzemelerin yaygın şekilde kullanılmasını engelleyebilmektedir. Asfalt kaplamaların yüzey tabakalarında geri dönüştürülmüş katı atık malzemeler (atık cam, çelik çüruf, lastik ve plastik) kullanılarak yapılan asfalt kaplamaların performansı kadar, teknik gereklilikler için standart ve literatür gözden geçirilerek gerekli araştırmalar yapılmıştır. Engellerin tanımlanmasından ve miktarlarının belirlenmesinden sonra, bunların kaldırılma yollarına gidilmiştir. Geri dönüştürülmüş katı atık malzemelerin birden fazla kullanıma sahip olduğunu ve geri dönüşüm malzemelerini başlangıçtaki kullanımına geri döndürmenin (örneğin geri dönüştürülmüş cam kırıklarından cam yapımına) genellikle yeni uygulamalar bulmaktan daha sürdürülebilir olduğu ifade edilmiştir. Asfalt endüstrisinin, katı atık malzemelerin doğru kaynağını bulmak ve asfalt kaplamanın hem teknik hem de mali açıdan uygun olan bileşenlerini kaplamalarda kullanmak gerektiği vurgulanmaktadır (Huang vd., 2007).

Son yıllarda, çeşitli ekonomik ve çevresel faydalar, karayolu yapımında geri dönüştürülmüş cam kullanımını artırmakta, cam ve agregası karışımlarının mühendislik özelliklerinin değerlendirilmesini sağlamaktadır. Geri dönüştürülmüş camın kullanımı özel uygulamalara bağlı olarak çeşitlilik göstermektedir. Kırıları geri dönüştürülmüş cam veya parçaları, bağımsız olarak kullanılmış ve ayrıca doğal inşaat agregası ile farklı değiştirme oranlarında karıştırılmıştır (Dalloul, 2013).

Ekonominin hızla büyümesi ve tüketimin sürekli artmasıyla büyük miktarda atık cam malzemeler ortaya çıkmaktadır. Atık camların geri dönüşümü ve kullanımı asfalt

karışımlarda uygulanabilmektedir. Optimum bitüm içeriğini düşürecek ekonomik karışımlar elde edilerek, karışımın durabilite ve stabilitesini artırmak, yol yüzeyinin kayma direncini artıracak, bunun sonucunda kazalar azalacak ve maliyet açısından daha kazançlı karışımların elde edilebileceği sonucuna varılmıştır (Salem vd., 2017).

Önceki cam katkılı asfalt uygulamalarında yüksek oranda cam içeriği (karışım ağırlığına %25'den daha fazla) ile kaba cam gradasyonları (12.7mm'den daha büyük, 1/2 inç) kullanılmıştır. Günümüzde, Karayolu İdarelerinin çoğunda asfalt karışımlarda %5 ile %10 oranında kırılmış cam kullanılmasına izin verilmektedir. Bazı bölgeler 6.4mm ile 12.7mm (1/4 inç ile 1/2 inç) ve daha büyük gradasyonlar kullansalar da, bazıları gradasyon boyutu için daha ölçülü bir yaklaşım sergilemiştir. New York şehri, belirlenen maksimum kırılmış cam boyutunu 15.3mm (5/8 inç)'den 9.5mm (3/8 inç)'ye düşürmüştür. Los Angeles cam boyutunu 9.5mm (3/8 inç) olarak belirlemiştir. Virjinya ve Florida'daki araştırmalarda da maksimum 9.5mm (3/8 inç) cam agrega boyutu kullanılması önerilmiştir. Günümüzdeki çoğu araştırmalarda, çakıl boyutundan daha büyük cam parçacıklarının kaplama performansını düşüreceği ve kırılmış camın kum veya ince agrega yerine 4.75 mm'den daha küçük boyutta kullanılmasıyla optimum performansa ulaşılabileceği ifade edilmektedir (Salem vd., 2017).

Kırma ve eleme işleme teknikleri kullanılarak üretilen kırılmış camın mühendislik özelliklerinin seçimi için AASHTO No.10 gradasyonun değerlendirildiği karışımda, kırılmış cam örnekleri agrega ile iyi bir dayanım ve işlenebilirlik özellikleri göstermiştir. Kırılmış camın mühendislik özellikleri tedarikçiler arasında biraz değişmekle birlikte, bu değişimler cam özelliklerine veya işleme prosedürlerine göre tane boyutu dağılımı ile yakından ilişkili olduğu görülmüştür. Kırılmış camın performans özelliklerinin genel olarak doğal agregaya eşit veya daha fazla olan, kolayca temin edilebilen, çevresel olarak temiz ve nispeten düşük maliyetli bir malzeme olduğu ifade edilmiştir. Bu olumlu özelliklerine rağmen, kırılmış camın faydalı kullanımını arttırmak için engellerin de olabileceği belirtilmiştir (Wartman vd. 2004).

Cam katkılı asfalt karışımlarda su hasarı performansının düşük olması ve bunun sonucunda agreganın soyulmasına neden olması başlıca karşılaşılan problem olmuştur. Mineral agrega ile kıyaslandığı zaman, cam daha az boşluklu ve pürüzsüz bir yapıya sahip olduğu için, bu özellikler camın asfaltı daha az absorbe etmesine sebep olmaktadır. Agregalar ile asfaltta organik asit bulunması durumunda iyon değişimi olabilmektedir. Camın asıl elementi SiO_2 asfaltla böyle bir iyon değişimi bağlantısı kurmamaktadır. Tüm

bu özellikler cam asfalt karışımın sökülmesini hızlandırmaktadır. Genellikle bunu engellemek için sönmüş kireç kullanılmaktadır (Liao vd., 2014).

Yol inşaatı için doğal temel tabakası agregası ile cam parçacıklarının birlikte potansiyel kullanımının değerlendirildiği çalışmada, %10, %20 ve %30 oranında ve 3/4 inç, 5/8 inç, 1/2 inç ile 3/8 inç arasında değişen dört farklı maksimum cam boyutu agrega yerine kullanılmıştır. Cam-agrega karışımlarının değerlendirilmesi yapıldıktan sonra, kırılarak geri dönüştürülmüş cam parçacıkların yol temel malzemesine ek olarak kullanılabilceği sonucuna varılmıştır. Çalışmada maksimum cam boyutunun 1/2 inç ve maksimum değiştirme oranının %20 olarak sınırlandırılması gerektiği öne sürülmüştür (Finkle vd., 2007).

Agrega ağırlığına göre kırılmış cam içeriğinin %0, %5, %10 ve %15 oranlarında kullanıldığı çalışmada, maksimum cam boyutu 4.75mm'den küçük cam parçacıkları olarak belirlenmiştir. Asfalt karışımın; stabilite, akma, özgül ağırlık ve hava boşluğu gibi önemli özellikleri araştırılmış ve normal asfalt karışımlarla kıyaslandığı zaman cam asfaltın, karışımın özelliklerini iyileştirdiği gözlemlenmiştir. Optimum cam içeriği %10 olan karışımda stabilite değeri ve Marshall oranı kontrol karışımdan daha yüksek çıkmıştır. Karışımdaki cam yüzdesinin artmasıyla birlikte birim hacim ağırlığın azaldığı görülmüş ve bitüm yüzdesinin artmasıyla birlikte örneklerdeki hava boşluklarının azaldığı belirlenmiştir. Cam kullanılmadan (%0 cam içeriği) asfaltın ortalama stabilitesi; %5 ve %20 cam içeriğindeki oranla kıyaslandığında daha yüksek iken, %10 oranında cam kullanıldığında daha düşük olmuştur (Issa, 2016).

Ekonomik kazanç ve iyi performans elde etmek için asfalt karışımlarda ince atık cam kullanımının uygulanabilirliğini araştırmak ve asfalt karışımda (stabilite, ortalama yoğunluk ve VMA) en iyi özellikleri veren optimum atık cam yüzdesini bulmak amacıyla %5, %10, %15 ve %20 gibi değişik yüzdelerde kırılmış camlar ince agregalar yerine kullanılmıştır. Maksimum atık cam boyutu 2.36 mm (No.8) olarak belirlenmiştir. Farklı cam yüzdesinde, örneklerin suya karşı direnci üzerinde optimum asfalt içeriğinin etkisini incelemek için Marshall tasarımından faydalanılmıştır. Cam katkılı asfaltın soyulma direnci sönmüş kireç ve sıvı soyulma önleyici katkıları kullanılarak iyileştirilmiştir. Asfalt aşınma tabakasında memnun edici performans, karışıma %10 oranında atık cam eklenerek ulaşılmıştır. Kullanılan %10 cam içeriğinde optimum bitüm içeriği %5.35, en iyi stabilite 1195 kg olarak belirlenmiştir (Salem vd., 2017).

Toplam agrega ağırlığına göre %0, %5, %10 ve %15 gibi değişik oranlarda atık cam kullanımının incelendiği çalışmada maksimum cam içeriği 4.75mm olarak belirlenmiştir. Tip II modifiye asfalt, 85/100 penetrasyonlu asfalt ve temizlenmiş atık cam kullanılarak, ASTM ve AASHTO standartlarına uygun olarak Marshall stabilite değeri, kuru/ıslak su hasarı, kayma direnci, ışığı yansıtma, su geçirgenliği ve sıkışma özellikleri değerlendirilmiştir. Deneysel çalışmaların sonucunda, atık camın, asfalt betonu kaplamalarında kullanılabilecek iyi mühendislik ve ekonomik avantajlar sunan bir malzeme olduğu ortaya koyulmuştur. 140 m² ve 510 m² alana sahip iki deneme kesimi inşa edilmiştir. %10 cam içeriğine sahip test yol kesiti yapılarak 1 yıllık hizmet süresi sonunda ışık yansıtma, kayma direnci, geçirgenlik, sıkışma derecesi ve kaplama defleksiyonu test edilmiştir (Chen ve Su, 2002). Geri dönüştürülmüş cam ile yapılan asfalt betonu test bölümlerine ait sonuçlar Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Bir yıllık kullanımından sonra % 10 geri dönüştürülmüş cam ile yapılan asfalt betonu test bölümlerine ait sonuçlar

Test Konusu	Karayolu 1		Karayolu 2	
	Yeni	1 yıl sonra	Yeni	1 yıl sonra
Işık yansıtma (mcd/lx/m ²)	16.23	18.77	14.90	18.74
Kayma direnci, (R ₂₀)	48.0	51.6	50.0	51.2
Sıkıştırma miktarı (%)	98.4	98.8	97.9	98.4
Geçirgenlik ($\times 10^{-3}$ cm/s)	4.77	2.08	3.91	1.02
Defleksiyon (1/1000 cm)	41	45	41	68

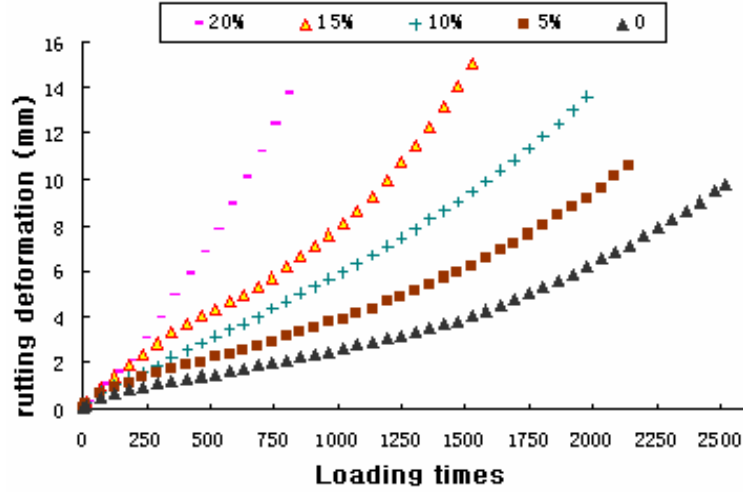
Karayolu 1: 85/100 penetrasyonlu asfalt ve karayolu 2: modifiye asfalt

Test sonuçlarına göre, cam katkılı asfalt betonu kaplamaların, karayolunda 1 yıllık kullanımından sonra, ışık yansıtması ve kayma direnci yeni kaplamadan daha yüksek çıkmıştır. Bu duruma, cam parçacıkların, araç trafiğinin neden olduğu yüzey aşınmasından dolayı kaplama yüzeyinin aşamalı olarak maruz kalması sebep olmuştur. Bir yıllık kullanımından sonra %10 geri dönüştürülmüş cam bulunan test bölümü iyi bir performans göstermiştir (cam parçacıklarının bozulmaması, kaplama üzerinde küçük çatlaklar haricinde iz olmaması). Saha karotlarından elde edilen verilere göre düşük geçirgenlik ve yüksek sürtünme katsayısı karayolu güvenliği için faydalı olmaktadır. Test sonuçlarına bağlı olarak, geri dönüştürülmüş camdan yapılan asfalt betonunun sanayileşen ülkelerin

ilgisini çekecek olan cam atık yönetimine pratik bir çözüm olarak kullanılabileceği ifade edilmiştir (Chen ve Su, 2002).

Kırılmış cam malzemenin asfalt betonda bazı fraksiyonel ince agregaların yerine kullanılması için SBS (styrene-butadiene-styrene) modifiye asfalt ve toplam agrega ağırlığına göre %0, %5, %10, %15 ve %20 oranlarında kırılarak geri dönüştürülmüş cam malzemeler seçilmiş ve maksimum cam parçacık boyutu 4.75 mm olarak sınırlandırılmıştır. Modifiye Lottman testi, donma-çözülme esaslı test ve tekerlek izi testi sonuçlarına göre, cam katkılı asfalt betonunun su hasarına karşı direncinin geleneksel asfalt betonuna göre daha zayıf olduğu ve sıvı soyulma önleyici katkı veya sönmüş kireç kullanılarak bu özelliklerin iyileştirilebildiği belirtilmiştir. Cam içeriğinin artmasıyla birlikte örneklerin Marshall stabilitesi ve dolaylı çekme mukavemeti azalmış, vakum doygunluğu ve donma-çözülme koşullamaları Marshall stabilite örneklerine göre dağılan örneklerin su hasarını önemli derecede hızlandırmıştır. Test sonuçlarına göre optimum cam içeriği %10 olarak belirlenmiştir. Dağılma oranı (testten sonraki ağırlık kaybı), % 10 cam içeriğinde %73.4, %15 için %62.1 ve cam içeriği %20'ye çıktığında ise %51.3 olmuştur. Asfalt ve cam yüzeyi arasındaki zayıf adezyon, yüksek sıcaklık ve suyun ikili etkisine dayanamamıştır. Cam katkılı asfalt betonun yüksek sıcaklık stabilitesi ve yorulma performansı da test edilmiş ve sonuçlar tatmin edici bulunmuştur. 45°C'de yapılan tekerlek izi test sonuçlarına göre artan cam değişimine bağlı olarak tekerlek izi deformasyonu ve soyulma ağırlık kaybı artmıştır (Wu vd., 2003).

Şekil 1'de verilen tekerlek izi test sonuçlarına göre daha yüksek cam içeriğine sahip örnekler kısa bir süre sonra ya kırılmış ya da üst deformasyona (15mm) ulaşmıştır. Bu testlerde su stabilitesi üzerinde camın olumsuz etkileri gözlemlenmiş ve bu yüzden cam asfaltın suda stabilitesini artırmak için sönmüş kireç ve sıvı soyulma önleyici katkı kullanılması gerektiği önerilmiştir (Wu vd., 2003).



Şekil 1. Yükleme tekrarı ve tekerlek izi derinliği ilişkisi

Sıvı soyulma önleyici katkının, cam katkılı asfalt karışımının su hasarı direncini geliştirmede sönmüş kireçten biraz daha etkili olduğu sonucuna varılmıştır. Tablo 2’de farklı katkı türleri eklendikten sonra kalıcı stabilite ve dağılma oranları gösterilmiştir (Wu vd., 2003).

Tablo 2. Su hasarı üzerine sönmüş kireç ve soyulma önleyici katkının etkileri

Katkılar		Kalıcı stabilite (%)	Dağılma oranı (%)
Yok		79.1	73.4
%2 sönmüş kireç		91.4	87.3
%0.4 sıvı soyulma önleyici katkı	Yaşlanma öncesi	92.3	89.7
	Yaşlanma sonrası	91.7	89.4

Atık camın asfalt karışımlarda ikincil agrega olarak kullanımının değerlendirildiği çalışmada, agrega olarak cam kullanılırken ilk olarak her bir eleğin ağırlıkça %50 ve %100 oranlarında 2 farklı cam içeriği yüzdesi ve 6 farklı cam boyutu 1/2, 3/8, No.4, No.8, No.50 ve No.200 kullanılmıştır. İkinci bölümde, cam agrega toplam karışım ağırlığına göre %1, %2 ve %4 oranlarında No.50 ve No.200 olmak üzere iki boyutta kullanılmıştır. Kontrol ve cam katkılı örneklerin mühendislik özellikleri (stabilite, akma, hacim ağırlığı ve toplam karışımdaki boşluk yüzdesi) Marshall testi ile değerlendirilmiştir. Cam katkılı asfalt için Marshall stabilite değerleri; asfalt karışımında ikincil agrega olarak No.8 ve No.200 cam boyutu kullanıldığı zaman %127 ve %174 oranında kontrol karışımdan daha yüksek çıkmıştır. Asfalt karışımında ikincil agrega olarak atık cam boyutlarının 1/2, 3/8, No.4 ve

No.50 olarak kullanılmasının Marshall stabilitesini azalttığı belirlenmiştir. Asfalt karışımın Marshall stabilitesi, katkı olarak %2 oranında atık cam (No.200) ilave edildikten sonra %166 oranında artmıştır (Jasim, 2014).

Soyulma direncine maruz kalmaksızın cam katkıli asfalt karışımında kullanılan maksimum cam miktarını belirlemek için, her biri kimyasal ve sönmüş kireç soyulma önleyici katkı maddelerini içeren iki karışımında, %0, %5, %12 ve %20 oranlarında değişen cam içerikleri kullanılmış ve maksimum cam boyutu 9.5mm olarak seçilmiştir. İzin verilen çekme mukavemeti oranı (TSR) 0.85 olarak kabul edilerek ve AASHTO T 283 yöntemi kullanılarak karışımlardaki soyulma direnci değerlendirilmiştir. Her iki karışımında katkı kullanılmaksızın TSR değeri 0.7 ile 0.8 aralığında olmuştur. Karışımlarda %0 cam içeriğinde katkı kullanımında TSR değerleri yaklaşık 0.85 veya daha üzerinde olmuştur. Her iki katkı maddesi %20 oranında cam ve kimyasal katkı içeren karışım hariç, diğerlerinde yeterli miktarda soyulma direnci ortaya koymuştur. TSR soyulma testinin sonuçlarına göre, cam katkıli asfalt karışımında %15'e kadar cam kullanmanın kabul edilebilir olduğu ve TSR testinin %12'ye kadar cam eklendiğinde önemli bir olumsuz etki göstermediği belirtilmiştir. %20 cam oranında, kimyasal ve sönmüş kireç katkılarının arasında önemli bir fark meydana geldiği gözlemlenmiştir (Maupin, 1998).

Farklı katkı içeriği ve agrega gradasyonuna bağlı olarak sıcak karışım asfaltın (HMA) farklı sıcaklık koşullarında davranışının irdelendiği çalışmada, cam katkıli asfaltın rijitlik modülünün tahmini için modeller ortaya koyulmuştur. %0, %5, %10, %15 ve %20 oranlarında cam içeriği kullanılmış ve cam agregaların maksimum boyutu 4.75 mm olarak seçilmiştir. Marshall testi ve dolaylı çekme mukavemeti testinin sonuçlarından elde edilen bilgilere göre cam katkıli asfalt karışımında optimum atık cam içeriği %15 olarak belirlenmiştir. Geleneksel HMA karışımlarla kıyaslandığı zaman, cam katkıli asfalt karışımın dinamik davranışında iyileşme gözlemlenmiştir. Maksimum rijitlik modülü yaklaşık %15 cam içeriğinde meydana gelmiş, bu oranın üzerinde rijitlik modülü azalma eğilimi göstermiştir. Cam parçacıkları ve karışım ağırlığına göre %3-%5 oranında kullanılan sönmüş kireç içeren örnekler rijitlik modülünü artıran bir eğilim göstermiştir. Cam katkıli asfalt karışımın dinamik davranışı sıcak karışım asfalta kıyasla sıcaklık değişimlerine daha az duyarlılık göstermiştir (Arabani, 2011).

Cam katkıli asfalt betonu kaplama, çevreyi korumada uygun bir yol kaplama türü olarak düşünülmektedir. Cam katkıli asfalt betonunun yol performansını ve yansıtıcı özelliklerini değerlendirmek için kapalı alan yansıtıcı özelliği araştırılmıştır. Test

sonuçlarına bağlı olarak, yüksek miktarda cam içeriği daha güçlü ışık yansımaları göstermiştir. Cam miktarı %15'e ulaştığında yol performansı bükülme noktası göstermiştir. Bükülme noktasının altında, cam katkılı asfalt betonunun yol performansı, geleneksel asfalt betonunun performansına yaklaşmakta ve hizmet ihtiyacını karşılamaktadır. Yol performansı ve yansımaya özelliği göz önüne alındığında %4.2 bitüm, %15 oranında atık cam ve %2 sönmüş kireç karışım için uygun bulunmuştur (SHA vd., 2014).

Soyulma önleyici katkı olarak %0, %0.5, %2.5 ve %4.5 oranlarında nano zycosoil ile modifiye edilmiş karışımlar ve %10 oranında cam kırıkları kullanılarak, cam katkılı asfalt karışımının su hassasiyeti ve bazı mekanik özellikleri araştırılmıştır. Maksimum cam agrega boyutu 4.75mm olarak sınırlandırılmıştır. Nano zycosoilin soyulma önleyici katkı olarak cam katkılı asfalt karışımının mekanik özelliklerini ve su hasarı problemini iyileştirdiği ifade edilmiştir. Zycosoil ile modifiye edilmiş karışımların çekme mukavemeti, dolaylı çekme mukavemeti testinde daha yüksek değerler göstermiştir. Bunun yanında, bu karışımın çatlama öncesi daha büyük çekme gerilmelerine dayanabildiği ortaya koyulmuştur. Cam asfalt örneklerinde soyulma önleyici katkı olarak %4.5 nano zycosoil kullanımı örneklerin su hassasiyetini geliştirmiştir. Deney sonuçları, zycosoil kullanımının agrega ve cam parçacıkları arasında kohezyonu artırabileceğini göstermiştir (Behbahani vd., 2015).

Nanoteknolojik zycosoilin cam katkılı asfalt karışımların rijitlik modülü ve tekerlek izi direnci üzerine etkisini incelemek için, asfalt örneklerinde % 0, %5, %10, %15 ve %20 oranlarında atık cam kırıkları kullanılmış, maksimum cam boyutu 4.75mm olarak seçilmiş ve nano zycosoil asfalt bağlayıcıya ağırlıkça %3.5-%5.5 oranında eklenmiştir. Nano zycosoil ile modifiye edilmiş cam katkılı asfalt karışım örnekleri geleneksel asfalt karışıma kıyasla önemli derecede iyi performans sergilemiştir. Nano zycosoil içeren cam katkılı asfalt örneklerinin rijitlik modülünde ve zamana bağlı deformasyona karşı performansında iyileşme meydana gelmiştir. Modifiye bitümün sıcaklık değişimlerine karşı daha az duyarlı olduğu ve modifiye edilmemiş bitüme kıyasla tekerlek izine karşı daha dayanıklı olduğu sonucuna varılmıştır. Zaman, enerji, agrega ve bitüm, asfalt üretim maliyeti, onarım ve bakım maliyetleri göz önüne alındığında; cam katkılı asfalt karışıma nano zycosoil ilavesinin faydalarının başlangıç maliyetinden daha yüksek olduğu ifade edilmiştir (Ziari vd., 2015).

Cam katkılı asfalt karışımının dinamik özellikleri, yorulma süresi, rijitlik modülü ve sünme esnekliğini araştırmak için maksimum cam parçacık boyutu 4.75mm seçilerek toplam agrega ağırlığına göre %0, %5, %10, %15 ve % 20 oranlarında cam içeriği

kullanılmıştır. Tüm karışımlarda %4.5-%6.5 oranında bağlayıcı ve asfalt karışımların su hasarına karşı direnimini artırmak için soyulma önleyici katkı olarak sönmüş kireç ilave edilmiştir. Geleneksel asfalt karışımlarla kıyaslandığı zaman cam katkılı asfalt betonunun dinamik özelliklerinde iyileşme görülmüş ve verilen sıcaklıkta %15 atık cam içeren numuneler en büyük rijitlik numunesine sahip olmuştur. Fakat cam içeriği yüzdesi %15'den daha fazla olduğunda, cam parçalarının bolluğu bu parçaların birbiri üzerinde kaymasına neden olmakta ve örneklerin rijitlik modülünün azalmasına sebep olmaktadır. Cam parçacıklarının optimum değerden daha fazla olması, asfalt örneklerinin kalıcı deformasyonunun artmasına neden olmuştur. Çalışma sonucuna göre atık cam parçacıkları asfalt kaplamanın dinamik davranışı üzerinde olumlu bir etki göstermiştir (Sajed ve Shafabakhsh, 2014).

Dinamik yükler altında cam katkılı asfalt karışımının yorulma davranışı modelinin araştırıldığı çalışmada önerilen model, sıcak karışım asfaltın davranışı için önceden önerilen modellerle kıyaslanmıştır. Toplam agregaya ağırlığına göre %0, %5, %10, %15 ve %20 oranlarında kırılmış cam örnekleri hazırlanmıştır. Maksimum cam boyutu 4.75mm olarak belirlenmiş ve %3-%5 oranında sönmüş kireç kullanılmıştır. Yorulma süresi testleri 5, 25 ve 40°C'de ve 250-400 kPa sabit gerilmeleri altında gerçekleştirilmiştir. Kırılmış cam ve sönmüş kireç içeren asfalt betonu örnekleri geleneksel HMA karışımlardan önemli derecede daha iyi yorulma performansı göstermiştir. Cam parçacıklarının daha yüksek köşeliliğinden dolayı, cam katkılı asfalt karışımlar daha yüksek içsel sürtünme açısı ve farklı parçacıklar arasında daha iyi kenetlenme oluşturmuştur. Bu özellikler, uygulanan gerilme nedeniyle örneğin nihai gerilmesini azaltacak ve örnekteki başlangıç çatlamasını ve çatlamanın yayılmasını önleyecektir (Arabani vd., 2012).

Cam tozunu, sıcak asfalt karışımlarda geleneksel kireç taşı tozu ve Portland çimentosu fillerine alternatif olarak önermek, mineral filler olarak kullanmak amacıyla Marshall değerleri araştırılmıştır. Kireç taşı tozu, normal Portland çimentosu ve cam tozu fillerleri toplam agregaya ağırlığına göre %4, %7 ve %10 içeriklerinde karışımlarda kullanılmıştır. Yapılan test sonucuna göre optimum cam tozu içeriği %7 olmuştur. Filler olarak cam tozu kullanıldığında, normal Portland çimentosu veya kireç taşı tozu kullanıldığı durumlara kıyasla daha yüksek stabilite (%13'e kadar artış), daha düşük akma (%39'a kadar azalma) ve daha düşük yoğunluğa (%10'a kadar azalma) sebep olmuştur. Sıcak asfalt betonu karışımlarında cam tozunun filler olarak kullanılması, Portland

çimentosu ve kireç taşı tozu içeren karışımlara kıyasla çok az daha yüksek boşluk yüzdesiyle daha hafif karışımlar üretilmesine neden olmuştur (Jony vd., 2011).

Toplam agreganın ağırlığının %4, %6 ve %8'i oranlarında sırasıyla Portland çimentosu, kireç taşı tozu ve atık cam tozu fillerlerinin asfalt betonu karışımları üzerinde etkisinin araştırıldığı ve cam tozunun filler olarak %8 oranında kullanıldığı durumda, diğer filler türleri arasında en iyi olduğu sonucuna varılmıştır. Sıcak asfalt betonu karışımlarının aşınma tabakası için, optimum bitüm içeriği %8 (toplam agreganın ağırlığına göre) olan filler atık cam tozu kullanılarak elde edilen Marshall test sonuçları Portland çimentosu ve kireç taşı tozu fillerleri kullanılarak yapılan karışımlarla kıyaslandığı zaman, daha yüksek Marshall stabilitesi, daha düşük akma ve daha düşük boşluk yüzdesi göstermiştir. Sıcak asfalt betonu karışımlarına toplam agreganın ağırlığının %6'sı oranında cam tozu eklenmesi, normal Portland çimentosu ve kireç taşı tozu ile karşılaştırıldığında, Marshall stabilitesini sırasıyla %15.5 ve %9.2 oranında artırmıştır. Akma ise sıradan Portland çimentosu ve kireç taşı tozu ile karşılaştırıldığında, sırasıyla %14.5 oranında azalmış ve %4.4 oranında artmıştır. Sıcak asfalt betonu karışımlarının toplam agreganın ağırlığının %8'i oranında cam tozu eklenmesi, sıradan Portland çimentosu ve kireç taşı tozu ile karşılaştırıldığında Marshall stabilitesini sırasıyla %11.7 ve %14.3 oranında artırırken; akma, sıradan Portland çimentosu ve kireç taşı tozu ile karşılaştırıldığında sırasıyla %21.6 ve %44.3 oranında azalmıştır (Al-Saffar, 2013).

Farklı filler tipleri ve %0, %8 ve %15 oranlarında cam ile hazırlanan asfalt karışımının mekanik performansının değerlendirildiği çalışmada nem duyarlılığı testi, rijitlik modülü testi ve çevrimsel üç eksenli basınç testi ile rijitlik modülü, nem etkisi ve plastik deformasyonu analiz edilmiştir. Karışımda filler tipi olarak çimento ve kalsiyum karbonat (kireç taşı) kullanılmıştır. %8 oranında atık cam kum fraksiyonu ile yer değiştirdiğinde, kalsiyum karbonat fillerleri yol yüzey tabakası için daha uygun mekanik özellik göstermiştir. Camın karışımda en yüksek miktarı daha düşük yoğunluğa sebep olmuş bu da sıkıştırılabilirlik problemlerinden dolayı daha fazla hava boşluğu anlamına gelmiştir. Daha yüksek atık cam miktarı karışımın stabilitesi kadar dolaylı çekme mukavemetini de önemli derecede azaltmıştır. Filler tipine bakılmaksızın maksimum sünme modülü ve minimum kalıcı deformasyon %8 cam içeren örneklerde meydana gelmiştir. Çeşitli fillerlerden oluşan cam katkılı karışımın sıcaklığı arttıkça rijitlik modülünde bir azalma meydana gelmiştir (Navarro vd., 2015).

Yeni Zelandada Ulaşım Acentesi kırılmış camın toplam agregada içinde %5'e kadar kullanımına izin vermiştir. Literatür taramasından çoğunlukla, kütlece %15'e kadar kırılmış camın temel tabakasına agregada olarak eklenmesine izin verilmiştir. Geri dönüştürülmüş camın, temel tabakasının performansını bozmaksızın kullanılan agregaya güvenli bir şekilde eklenen maksimum yüzdesini belirlemek için, agregada kütlece %50'ye kadar kırılmış cam yüzdesi veya toplam kütlece üçte birine göre maksimum agregada performansı üzerinde etkisi araştırılmıştır. Laboratuvar çalışması aynı agregada ile %0, %10, %20, %30 ve %50 oranlarında kırılmış cam içermektedir. Agregada tabakasında 10 mm tekerlek izi oluşana kadar ağır aksların sayısını belirlemek için tekrarlı yük üç eksenli cihaz ve ilgili tekerlek izi derinlik modellemesi kullanılarak performans ölçülmüştür. Temel tabakasının performansının, %30'a kadar kırılmış camın yüzdesinin artması ile iyileştiği gözlemlenmiştir. Sonuçlar, toplam agreganın %23'ü ve agregada kütlece %30'una kadar kırılmış cam yüzdesi için agregada performansının etkilenmediğini göstermiştir. Tekrarlı üç eksenli yükleme test sonuçlarına dayanarak, kütlece %30'a kadar kırılmış cam agregada ilavesi tekerlek izi derinlik performansı üzerinde çok az veya hiç etkisi yok gibi görülmüştür (Arnold vd., 2008).

Asfalt betonu kaplamaların viskoelastik davranışını tahmin etmek için birçok model geliştirilmiştir, ancak atık cam ilavesi ile modifiye edilmiş asfalt karışımlar için çok fazla çalışma mevcut olmamaktadır. Cam katkılı asfaltın visko-elastik davranışının deney modelinin irdelendiği çalışmada 40, 50 ve 60°C'lik farklı sıcaklıklarda; 100, 150, 200, 250 ve 300 kPa'lık gerilme seviyelerinde tekrarlı yük eksenel (RLA) test serileri gerçekleştirilmiştir. %0, %5, %10, %15 ve %20 oranlarında kırılmış cam kullanılmış ve maksimum cam parçacı boyutu 4.75mm olarak seçilmiştir. Yükleme gerilmeleri ve sıcaklığın sünme davranışı üzerine etkisi araştırılmıştır. Sonuçlara göre, hem deneysel viskoelastik modellerin hem de Burgers modelinin, çalışmada verilen test gerilme seviyesi ve sıcaklığı için viskoelastik aralıktaki malzeme sünme tepkisinin benzeştirilmesi konusunda iyi bir hassasiyet ortaya koymuştur. Optimum cam içeriği %10 olarak belirlenmiştir. 40°C sıcaklıkta ve 250 kPa'dan daha düşük gerilme seviyesinde sünme eğrileri pürüzsüz olup sadece ilk iki aşamaya, ancak 50°C'ye eşit veya daha yüksek sıcaklıklarda yumuşama noktasına yaklaşan bitümün, sünme eğrileri aniden dikleşmekte ve sünme eğrilerinin üçüncü aşaması başlamaktadır. Cam katkılı asfalt örneklerinin ısı duyarlılığı geleneksel asfalt örneklerle kıyaslandığı zaman iyileştiği sonucuna varılmıştır (Arabani ve Kamboozia, 2013).

1.5. Esnek Üst Yapılarda Temel Problemler

Asfalt kaplamaların hizmet sürecinde; soyulma ve sökölme, tekerlek izi oluşumu, düşük sıcaklık çatlaması, yorulma çatlaması gibi temel problemlerin olmasının yanında bitümün yaşlanması ve oksidasyonu ile de karşılaşmaktadır.

1.5.1. Soyulma ve Sökölme

Bitüm ile agrega arasındaki fiziksel bağ gücünün su sızması sonucu zayıflamasından dolayı kaplamalarda su hasarı meydana gelmektedir. Bu da kaplamada; soyulma ve sökölme gibi problemlere sebep olmaktadır (Asphalt Task Force, 2010).

Soyulma ve sökölmelerin başlıca oluşum nedenleri (Hanlı, 2009):

- 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 tabakalar arasına sızar, donma ve erime olayları sırasında asfaltın bozulmasına neden olur),
- Yetersiz bitüm yüzdesi,
- Yaşlanma nedeniyle oluşan asfalt sertleşmesi,
- Donma-çözölme olaylarının tekrarlanması ve kırılabilirliği yüksek agregaların kullanıldığı karışımlarda ayrışma meydana gelmesi.

1.5.2. Tekerlek İzi Oluşumu

Tekerlek izi genellikle, kaplama üzerindeki gerilmelerin malzemenin elastisitesini veya iyileşme kabiliyetini aşmasıyla asfaltın kalıcı deformasyonu olarak tanımlanmaktadır. Asfalt karışım üzerindeki trafik yükünün kaplamanın plastik limitini aşmasıyla kalıcı plastik deformasyon meydana gelmektedir (Asphalt Task Force, 2010).

Tekerlek izi oluşumu çok küçük kalıcı deformasyonların toplamıdır. Karışımın kayma mukavemetini arttırmanın yolu, sadece daha sert bir asfalt kullanmak değil, aynı

zamanda, yüksek kaplama sıcaklıklarında daha çok elastik bir katı gibi davranan bir asfalt kullanılmaktadır. Asfalt karışımların tekrarlı ağır yüklere karşı koyacak yeterli kayma mukavemetine sahip olmaması nedeniyle tekerlek izi oluşur. Zayıf bir karışımda, her bir ağır araç geçişiyle küçük ama kalıcı deformasyonlar oluşturmakta, bu deformasyonlar da karışımın yer değiştirmesini sağlayarak tekerlek izi oluşumuna neden olmaktadır (Hanlı, 2009).

Tekerlek izinde oturmaların oluşum nedenleri (Hanlı, 2009):

- Yüksek bitüm yüzdesi,
- Filler malzemesinin fazlalığı,
- Yuvarlak malzemelerin karışımda kullanımı,
- Karışımın yetersiz sıkışması,
- Ağır trafik ve tek çizgide akan trafik nedeniyle kaplama tabakasının fazla sıkışması,
- Karışımda çok düşük oranlarda kırılmış agrega içeriği,
- Uygun olmayan tane boyutu dağılımı,
- Boşluk oranlarının çok küçük olması,
- Ağır ve yüksek sayıda tekerrür eden yük,
- Bölgenin fazla sıcak oluşudur.

1.5.3. Çatlak Oluşumu

Çatlaklar, trafik yüklerinin yol açtığı yorulmadan, kaplamanın zayıflayıp zamanla daha az esnek olduğu durumlarda, kaplama tabakasında oluşan gerilmelerin kaplama malzemesinin mukavemetini aşmasıyla meydana gelmektedir. Buna ilaveten, çatlama, nem ve sıcaklık değişimlerinin olduğu dış faktörlerden ortaya çıkmaktadır (Hanlı, 2009).

Çatlamaya neden olan hususlar şunlardır (Hanlı, 2009):

- Sıcaklık değişimleri, nem emme kabiliyeti yüksek agrega kullanımı, asfalttaki uçucu maddelerin buharlaşması,
- Fazla miktarda yük tekrarı (yorulma),
- Kaplama tabakasının yetersiz kalınlığı,
- Kaplama altındaki tabakaların yüksek deformasyonları nedeniyle, malzemelerin dağılımı, ayrışımı, yetersiz drenaj.

1.5.3.1. Yorulma Çatlaması

Tekrarlanan trafik yükleri altında HMA yüzeyinin yorulma bozulmasından kaynaklanan birbirine bağlı çatlaklar serisi yorulma çatlama serisine neden olmaktadır. İnce kaplamalarda, çekme gerilmesinin en yüksek olduğu yerde HMA tabakasının tabanında çatlama başlar ve bir veya daha fazla boyuna çatlak olarak yüzeye yayılır. Bu durum genellikle, 'aşağıdan yukarıya' veya 'klasik' yorulma çatlama serisi olarak adlandırılır. Kalın kaplamalarda, çatlaklar büyük olasılıkla lastik-kaplama etkileşimi ve asfalt bağlayıcının yaşlanması (yukarıdan aşağıya çatlama) kaynaklanan yüksek yerel çekme gerilme alanlarında üstten başlar. Tekrarlı yüklemelerden sonra, boyuna çatlaklar timsah sırtı çatlama desenine dönüşen çatlak haline gelir (URL-1, 2017).

Yorulma çatlakları; hafif, orta ve yüksek şiddette yorulma çatlakları olarak üç gruba ayrılmaktadır (URL-2, 2017):

- Hafif şiddette yorulma çatlama serisi: Gerilmenin bu tipinde birbiriyle bağlantılı veya bağlantısı olmayan çatlaklar meydana gelmektedir. Bu seviyede malzemenin parçalanması veya pompaj etkisi görülmemektedir.
- Orta şiddette yorulma çatlama serisi: Bu yorulma çatlama serisinde, birbiriyle bağlantılı timsah derisine benzer çatlaklar ortaya çıkmaktadır. Çatlaklar malzemenin bir miktar parçalanmasına neden olmaktadır, ancak ana malzemenin parçalanması olmamaktadır. Trafik güvenliği sıcak ve ıslak koşullarda problem olabileceğinden, çatlak kapama uygulamaları dikkatle yapılmalıdır.
- Yüksek şiddette yorulma çatlama serisi: Bu durumda, kötüleşme derecesi orta şiddetteki dereceden daha fazladır ve trafik altında parçalar kopabilir ve temel malzeme parçalanabilir.

1.5.3.2. Düşük Sıcaklık Çatlaması

Asfalt kaplamaların düşük sıcaklık çatlaması, sıcaklığın kritik seviyeye düşmesi nedeniyle sıcak karışım asfaltın çekme gerilmesi olarak ifade edilmektedir. Trafik yükleri muhtemel rol oynamasına rağmen, uygulanan trafik yükleri yerine, kaplama sıcaklığının düşük olması nedeniyle ortaya çıkan bir bozulma türüdür. Termal çatlaklar belirli aralıklarla trafik yönüne dik olarak meydana gelen enine çatlaklardır. Düşük sıcaklık çatlakları, asfalt kaplama tabakasının soğuk havada büzülmesi sonucu oluşurlar. Kaplama

büzüldüğünde, çekme gerilmeleri tabaka içerisinde gelişir. Kaplama boyunca belli bir noktada çekme gerilmesi çekme dayanımını aşar ve asfalt tabakası çatlar. Bu nedenle, düşük sıcaklık çatlakları tekil bir olaydan sıklıkla ortaya çıkar. Ayrıca, birçok soğuk hava döngüsünün birikimli etkisinden kaynaklanan bir yorulma olayı da düşük sıcaklık çatlama olabilir. Düşük sıcaklıkların büyüklüğü ve sıklık derecesi ile yüzeydeki asfalt karışımının sertliği, düşük sıcaklık enine çatlama oluşumu ve yoğunluğunda önemli faktörlerdir. Çatlak yüzeyden başlar ve aşağıya doğru ilerler. Esas olarak asfalt bağlayıcının özellikleri ile ilişkili olan karışım sertliği, düşük sıcaklıkta çatlama en büyük katkı sağlayandır (Brown vd., 2001).

1.5.4. Bitümün Yaşlanması

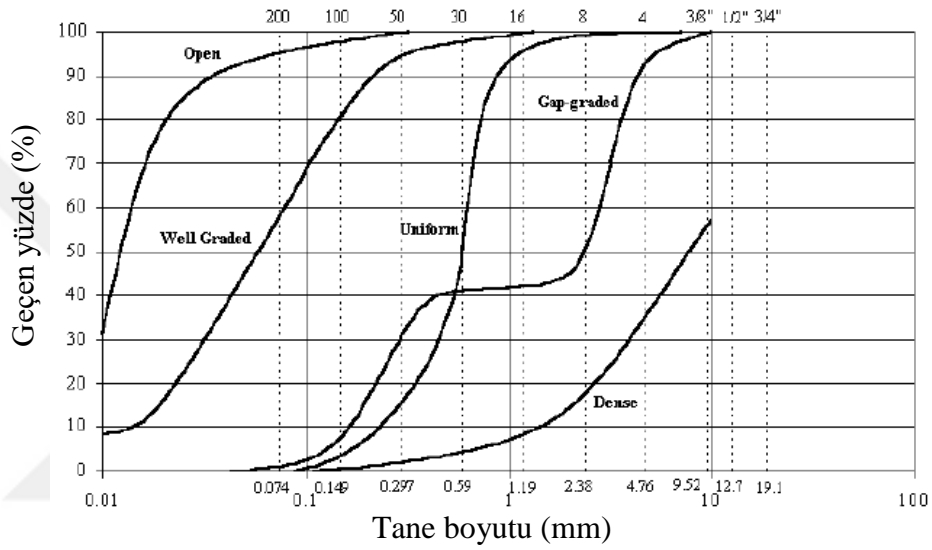
Bitümün yaşlanması; uygulanma veya servis koşullarında, bitümün sertleşmesi ve kırılma hale gelmesiyle daha gerek yapıya sahip olmasıdır. Bu olay, kaplama uygulamalarının bozulmasında önemli bir etkiye sahiptir. Isıl değişikliklere, havaya, neme, ışığa maruz kalan bitümlü bağlayıcıların mühendislik özelliklerinde değişiklikler meydana gelmekte ve bitümlü bağlayıcının sertleşmesine neden olmaktadır. Atmosferik oksidasyon, sertleşmenin ana nedenidir. Zamanla asfalt çimentosunun viskozitesinde artış olmakta ve oksidasyon sonucu ortaya çıkan değişme yaşlanma sertleşmesi olarak adlandırılmaktadır. Yaşlanma sertleşmesine uğrayan asfalt çimentosunun daha düşük penetrasyon ve daha yüksek viskozite gösterdiği ifade edilmektedir. Bitümün sertleşmesi bitümlü karışımların dayanımını olumsuz olarak etkilemektedir. Yaşlanma (sertleşme) nedeniyle üstyapıda genellikle çatlama şeklinde problemler görülmektedir. Bunlar, genellikle yorulma, termal ve yansıma çatlakları olarak görülmektedir. Katkı kullanımı bağlayıcın yaşlanmasının engellenmesi konusunda olumlu etkiye sahiptir (Aksoy, 2002).

1.6. Agregada Gradasyonuna Göre Asfalt Karışım Türleri

Asfalt karışım özellikleri, mevcut agregada içindeki tane veya parçacık boyutlarının dağılımına bağlıdır. Bunun için, standart bir elek seti kullanılarak bir elek analizine tabi tutularak, sırasıyla daha küçük elek açıklıklarını geçen agregaların kümülatif yüzdesinin belirlenmesi ve daha sonra, logaritmik ölçekte tane boyutuna karşı geçiş yüzdesinin

çizilmesiyle belirlenir. Granüler malzemenin granülometrisi, genellikle onu üreten süreçlere (jeolojik veya mühendislik) bağlı olarak değişir (URL-3, 2017).

Karışım içindeki kaba ve ince agrega yüzdesinin kullanılma miktarı ve buna bağlı olarak boşluk yüzdesi değişimine göre agrega gradasyonu; yoğun gradasyonlu, üniform gradasyonlu, kesikli gradasyonlu, açık gradasyonlu veya iyi gradasyonlu olarak sınıflandırılmaktadır. Agrega gradasyon dağılımı Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Agrega gradasyon dağılımı (URL-3, 2017).

1.6.1. Açık Gradasyonlu Karışım

Açık gradasyonlu karışım, ağırlıklı olarak kaba agrega, az miktarda ince agrega ve filler içeren, %18-25 oranında hava boşluğu yüzdesine sahip bir karışımdır. Bu karışımda stabilite, agrega parçacıklarının mekanik olarak birbirine kenetlenmesine dayanır. Geçirgenliğe sahip olduğu için yoğun gradasyonlu karışımlardan daha az dayanıklıdır. Bağlayıcı miktarının artırılması ile dayanımın artırılması desteklenir. Köşeli şekilli kaba dokulu agregalar, yüzey dokusu ve stabilite için istenilen özelliklerdendir (Greer, 2006).

1.6.2. Kesikli Gradasyonlu Karışım

Kesikli gradasyonlu karışımlarda, malzeme belirli elek aralarında fazla, belli elek aralıklarında çok azdır. Bu tür karışımlar pürüzlü bir yüzey oluştururlar (Orhan, 2012). Bu karışım temel olarak kaba agrega iskeleti ve harç olmak üzere iki kısımdan oluşur. Kaba agrega iskeleti kırılmış kaba parçacıklarından oluşur ve toplam agrega karışımının yaklaşık %70-80'ini oluşturur (NCHRP, 2011).

Taş mastik asfalt, kesikli gradasyonlu karışımlara yaygın olarak verilebilecek örnekler arasındadır. TMA, iri agregadan oluşmuş bir iskelet ile boşlukları dolduran ince agrega filler-bitüm harcının (mastik harç) karışımıdır. Mastik harç; ince agrega, filler ve bitümden oluşmaktadır ve kaba agregalar arasındaki boşlukları doldurarak yüksek bitüm oranı içeriğiyle durabiliteyi artırır. Kaba agrega; yüksek dane içeriği ve iç kenetlenme ile trafik yüklerini taşır. Kaba agrega (>2.36 mm elek) agrega ağırlığının %70-80'ini, ince agrega %12-17'sini ve filler fraksiyon %8-13'ünü oluşturur (Hainin vd., 2012).

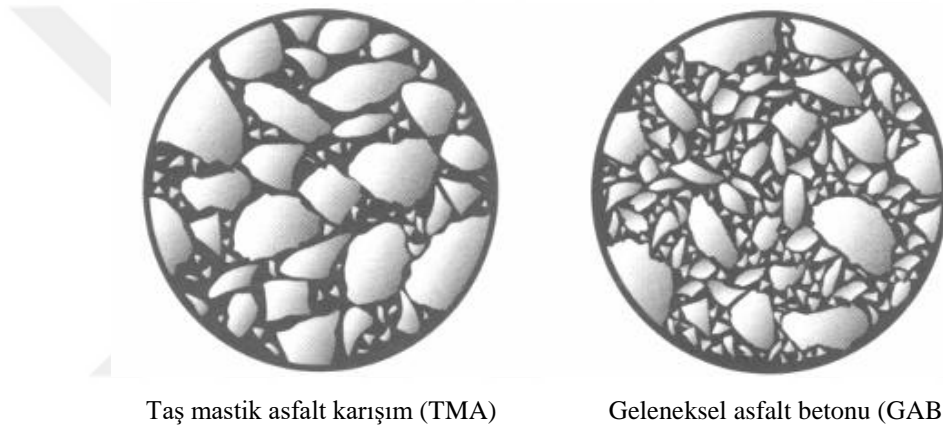
1.6.3. Yoğun Gradasyonlu Karışım

Asfaltın en yaygın tipi asfaltik beton olarak da bilinen yoğun gradasyonlu asfalt karışım, sürekli gradasyonlu agrega, kum, filler ve bitümlü bağlayıcının karışımı olarak birbirine kenetlenmiş bir yapı oluşturan karışımı içermektedir. Bu yapı, serilmiş malzemenin dayanımına ve performansına büyük katkıda bulunmaktadır. Yoğun gradasyonlu asfaltın çevresel bozulmaya karşı dayanımı ve direnci, çoğunlukla, %3-7 oranında hava boşlukları ve bağlayıcı içeriği ile belirlenir ve bunların servis koşulları için en uygun şekilde kullanılması önemlidir. Maksimum dayanım, hemen hemen tüm boşlukları doldurmak için yüksek bir bağlayıcı içeriğine, su ve oksijen geçirgenliğini azaltmaya, agrega-agrega kenetlenmesi ve trafik talepleri altında iyi agrega kenetlenmesi için deformasyona karşı direnç sağlamaya ihtiyaç duyar. Bağlayıcı türü, agrega özellikleri, filler türü ve katkı maddesi kullanımı, bunların hepsi yapısal sertlik, yorulma, deformasyon direnci, yüzey dokusu ve işlenebilirliğe katkıda bulunur (Greer, 2006).

1.6.4. Ünlorm Gradasyonlu Karışım

Ünlorm gradasyonlu karışımnda, parçacıkların çoğu çok dar bir boyut aralığında bulunmaktadırl. Karışım içindeki agrega parçacıkların boyuttu birbirine çok yakındır (McAsphalt Industries Limited, 2012).

Kesikli gradasyona sahip taş mastik asfalt karışımı, kaba agrega oranının yüksek olması ve ince agrega oranının daha az olmasından dolayı yoğun gradasyonlu geleneksel asfalt karışımlara nazaran daha yüksek boşluk yüzdesine sahiptir. Şekil 3'de TMA karışımıyla GAB karışımının gradasyon karşılaştırması verilmiştir.



Taş mastik asfalt karışım (TMA)

Geleneksel asfalt betonu (GAB)

Şekil 3. Kesikli gradasyonlu karışım ve yoğun gradasyonlu karışımın karşılaştırması (Myers, 2007).

1.7. Asfalt Karışımlarda Kullanılan Katkı Malzemeleri

Trafik yüklerinde meydana gelen artışlar, deformasyonların oluşması, bakım ve onarım maliyetlerinin yüksek oluşu gibi problemlere karşı bitümlü karışımların dayanımlarının artırılması gerekmektedir. Bu problemlerden dolayı bitümlü bağlayıcıların performanslarının iyileştirilmesi için katkı maddeleri kullanılmaktadır (Orhan, 2012).

Bitüm katkı maddelerinde aranan özellikler (Ilıcalı vd., 2001):

- Asfalt karışım sıcaklığında özelliklerini kaybetmemelidir,
- Asfaltla homojen olarak karıştırılabilmelidir,
- Düşük sıcaklıklarda asfaltın çok kırılğan veya sert olmamasını sağlamalıdır,

- Asfaltı yüksek karıştırma ve serme sıcaklıklarında, çok fazla viskoz hale getirmeden, yüksek yol sıcaklıklarında akışkanlığa karşı dirençlerini arttırmalıdır.

Bitüme katılabilen çok sayıda katkı maddeleri bulunmakta ve bu katkılar karışım performansını farklı yönde etkilemektedir. Tablo 3’de bitüm maddelerinin sınıflandırılması Tablo 4’de karışımlarda kullanılan kimyasal katkıların etkileri Tablo 5’de modifiyelerin sağladığı özellikler verilmektedir.

Tablo 3. Bitüm katkı maddelerinin genel sınıflandırılması (Büyüksaraçoğlu, 2009).

Tip	Özellikler	Asfalt çimentosunun kıvamına genel etkisi
1.Filller	<ul style="list-style-type: none"> • Mineral filler Taş tozu Kireç Portland çimentosu Uçucu kül • Karbon siyahı • Sülfür 	Sertleşme
2.Extender	Sülfür Ligrin(odun özü)	Sertleşme
3.Kauçuk Doğal lateks(kauçuk ağacı özsuğu) Yapay lateks Blok kopolimer İşlenmiş kauçuk	Doğal kauçuk Strene butoiden (SBR) Strene butoiden strene (SBS) Dönüştürülmüş kauçuk	
4.Plastik	Polietilen Polipropilen Bil-viri-lasetat,EVA Polviril klorid,PVC	Sertleşme
5.Bileşim	3 ve 4’deki polimerlerin karışımı	
6.Fiber	Doğal: Asbest Taş yünü Yapay: Polipropilen Polyester Fiberglas	Sertleşme
7.Oksidan	Marganze tuzu	Sertleşme
8.Antioksidan	Kurşun karışımları Karbon Kalsiyum tuzu	Yumuşama
9.Hidrokarbon	Yeniden kullanım ve gençleştirme yağları Serleştirme ve doğal asfaltlar	Yumuşama veya sertleşme
10.Soyulma önleyici	Aminler Kireç	Yumuşama

Tablo 4. Bitümlü karışımlarda kimyasal katkıların etkileri (Büyüksaraçoğlu, 2009).

Kimyasal katkıları	Yaşlanma sertliğini azaltma	Su hassasiyetini azaltma	Agrega bağlayıcı değışikliği	İşlenebilirlik gelişimi	Adezyon gelişimi	Stabilitede artma	Tekerlek izi direncinde artma	Soyulma direncinde artma	Gevreklikte artma
Hidrate kil	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓
Portland çimentosu				✓	✓	✓	✓		✓
Manganez modifiyesi			✓	✓	✓		✓	✓	✓
Katyonik yüzey aktif ajanları	✓	✓		✓	✓	✓			
Sülfür				✓		✓	✓		✓
Organik polimerler				✓		✓	✓		

Tablo 5. Modifiyerler ve değışiklik sağladığı özellikler (Çubuk, 2007).

Kimyasal Katkı	Kimyasal Katkıların Rolü
Yağ	Bitümün yapısı, bağlayıcılık, viskozite, penetrasyon değeri, yumuşama
Filler tozu	Yumuşama noktası, viskozite, sertlik, yoğunluk, maliyet, mekanik sağlamlık
Fiberler	Tiksotropik, çatlak direnci, viskozite
Balmumu	Viskozite(sıcak), sertlik(soğuk), bağlayıcılık, adezyon
APP (Ataktik polipropilen)	Sertlik, penetrasyon değeri, Frass kırılma noktası, yumuşama noktası
EVA(Etilen vinil asetat)	
SBS (Stiren butadien stiren)	Penetrasyon, yumuşama noktası, elastik geri dönüş, düşük sıcaklık kırılabilirliği
Solvent	Viskozite
Emülsifikasyon	Viskozite, ıslatma kabiliyeti, uygulama sıcaklığı
Islatma ajanları	Islatma kabiliyeti,adezyon

1.8. Modifikasyon Yöntemi

Kaplamalarda karşılaşılan problemleri en aza indirmek ve kaplama performansını artırmak v.b. özelliklerden dolayı modifikasyon yapılır. Temel olarak modifikasyonun amacı aşağıdaki gibidir (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 agrega kopmasını azaltmak,
- Kaplamanın düşük sıcaklık çatlaklarını azaltmak,
- Karışımın yorulma dayanımını iyileştirmek,
- Marjinal asfalt çimentolarının kalitesini yükseltmek,
- Yaşlanmış asfalt bağlayıcıyı tekrar gençleştirmek,
- Asfalt bağlayıcının ömrünü uzatmak,

Modifikasyon genel olarak iki şekilde yapılabilmektedir. Birinci yöntem bitümün modifikasyonudur. Katkı maddesinin, bitüme katılmasıyla modifiye bitüm elde edilir. Bitümün modifikasyonunda, modifiye bitüm çeşitli standart test yöntemleri uygulanarak bitüm özelliklerindeki değişimlerin belirlenmesi mümkün olabilmektedir. Böylece, modifiye bitüm özelliklerinin belirlenmesi ve değerlendirilmesi yapılabilmektedir. Ancak bitümün modifiye edilmesi yönteminde, bu işlem için genellikle ek ekipmanlar gerekmektedir (Ilıcalı vd., 2001).

Bitümün modifikasyonu şantiye alanında ek ekipmanlarla yapılabildiği gibi önceden merkezi modifikasyon değirmenlerinde de yapılabilir. Yapılan bir çalışmada laboratuvar ortamında polimer modifiye bitümler üretilmiş ve önceden üretilmiş modifiye bitümlerle birlikte asfalt karışım üretilmiştir. Yapılan sünme testlerinden elde edilen sonuçlar önceden hazırlanan modifiye bitümün daha başarılı sonuçlar verdiğini ortaya koymuştur (Aksoy ve İskender, 2008). Bu durum modifikasyon şeklinin ve sürecinin önemini ortaya koymaktadır.

İkinci yöntem ise karışımın modifikasyonudur. Katkı maddesinin asfalt plentinde doğrudan karışıma katılmasıyla modifiye karışım elde edilir. Katkı maddesi asfalt plentinde karışıma katılabildiğinden ek karıştırma ekipmanı gerekmemekte, depolama, taşıma vb. sorunlarla karşılaşılmamakta; ancak bu durumda da karışımdan modifiye bitümü çekerek özelliklerinin belirlenmesi ve değerlendirilmesi uygun olmamaktadır (Ilıcalı vd., 2001). Normal karışım hazırlanırken katkıları mikser içerisinde ilave edilir ve özel karıştırma tekniğine ihtiyaç yoktur. Geleneksel karışım sıcaklıklarını 5°C-10°C

çıkarmak yeterlidir ve bitümle uyumsuzluk sorunu çıkarmazlar. Karışıma katıldıklarından dolayı bekleme süresi problemleri yoktur. Katkılar asfalt plenti mikserine basit bir tertibatla veya elle direkt olarak konulabilir (İskender, 2008).

1.9. Atık ve Çeşitleri

İnsanların faaliyetleri sonucunda işe yaramaz hale gelen ve artık kullanılmayan yaşadığımız ortamdan uzaklaştırılması gereken maddelere atık denilmektedir. Katı, sıvı ve gaz olmak üzere 3 atık çeşidi vardır. Katı atıklar, oluştukları yere göre yedi bölüme ayrılmaktadır. Bunlar; evsel atıklar, endüstriyel atıklar, tehlikeli atıklar, özel atıklar, tıbbi atıklar, tarımsal ve bahçe atıkları, inşaat artığı ve moloz atıkları v.b. olarak sınıflandırılmaktadır (Gündüzalp ve Güven, 2016).

Evsel Atıklar

Belediye hizmeti ile toplanıp taşınan, evsel çöp depolama sahalarında ortadan kaldırılabilen, ayırma yolu ile geri kazanılabilen, yakılabilen evsel ve endüstri kökenli atıklardır (Gündüzalp ve Güven, 2016). Mutfak çöpleri, ambalaj atıkları, ofis çöpleri vb. evsel atıklara örnek olarak gösterilmektedir.

Tehlikeli Atıklar

Tehlikeli atıklar, Atık Yönetimi Genel Esasları Yönetmeliği; tehlikelilik özelliğine göre 15 sınıfa ayrılmıştır: Patlayıcı, oksitleyici, yüksek oranda tutuşabilenler, tahriş edici, zararlı, toksik, kanserojen, korozif, enfeksiyon yapıcı, üreme yetisini azaltıcı, mutajenik, havayla, suyla veya bir asitle temas etmesi sonucu zehirli veya çok zehirli gazları serbest bırakan madde veya preparatlarıdır. Yukarıda belirtilen karakterlerden herhangi birine sahip olan atıkların ortadan kaldırılması esnasında ortaya çıkan madde ve preparatlar, ekotoksik atıklardır (Gündüzalp ve Güven, 2016).

Endüstriyel Atıklar

Endüstriyel faaliyetlerden kaynaklanan atıklardır. Endüstriyel işlemler sırasında ve/veya endüstriyel işlemler sonucunda oluşan atıkları kapsamaktadır.

Tarımsal ve Bahçe Atıkları

Bitkisel ve hayvansal ürün elde edilmesi ve işlenmesi sonucunda ortaya çıkan atıklardır. Üretilen katı atıkların miktarı ve içerik özellikleri topluluk ya da toplumların sosyoekonomik özellikleri, beslenme alışkanlıkları, gelenekler, coğrafya, meslekler ve iklim gibi değişik şartlardan etkilenmektedir (Gündüzalp ve Güven, 2016).

Özel Atıklar

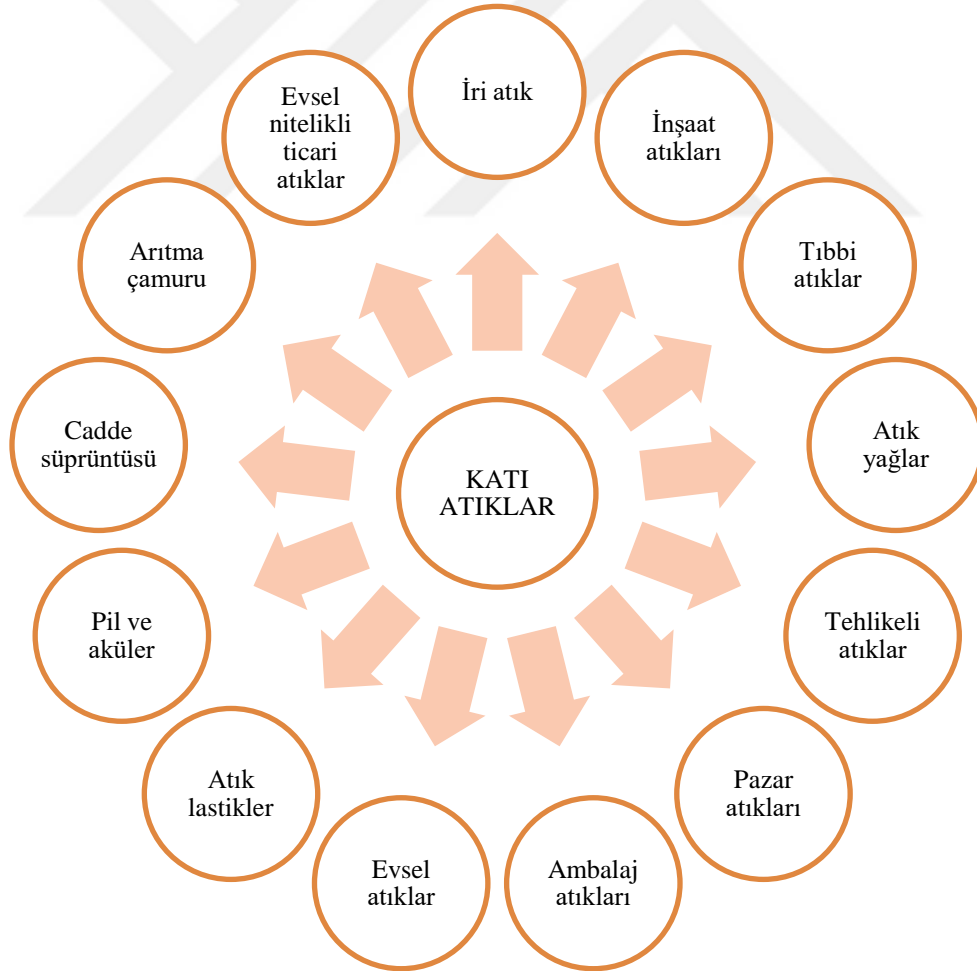
Uzaklaştırılması özel önem taşıyan atıklardır. Radyoaktif atıklar, tehlikeli endüstriyel atıklar, evsel atıklar içerisindeki boya, inceltici, temizlik maddeleri, piller vb. lastik tekerlekler, atık su çamurları, hastane atıkları v.b. bu gruptandır (Gündüzalp ve Güven, 2016).

Tıbbi Atıklar

Tıbbi Atıkların Kontrolü Yönetmeliği'ne (27555 sayılı) göre ünitelerden kaynaklanan, enfeksiyon, patolojik ve kesici-delici atıkları ifade etmektedir (Gündüzalp ve Güven, 2016).

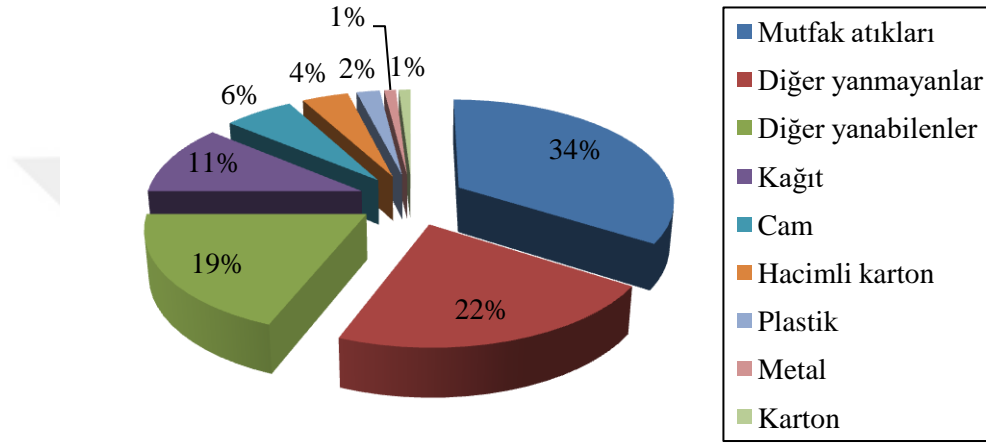
İnşaat Artığı ve Moloz Atıklar

Herhangi bir inşaatın yapılması sırasında artan ya da yıkılması sonucu ortaya çıkan atıklardır.



Şekil 4. Kentsel katı atık bileşimleri (MEB, 2011).

Kentsel katı atık bileşimleri Şekil 4’de verilmektedir. Katı, sıvı ve gaz atıkların yanında ambalaj atıkları da vardır. Sıvı atıklar; hastane kaynaklı olan kan, dişçilik yıkama suları, diyaliz makineleri suları, evsel kaynaklı olan temizlik suları, kanalizasyon suları vs. atıkları ifade etmektedir. Gaz atıklar ise; Nükleer enerji santralleri, sanayi tesis bacaları, yakma tesisleri, enerji amaçlı fosil yakıtların kullanımı, çöp depolama ve kompostlaştırma alanları vb. gaz atıkların kaynaklarını oluşturur (Gündüzalp ve Güven, 2016).



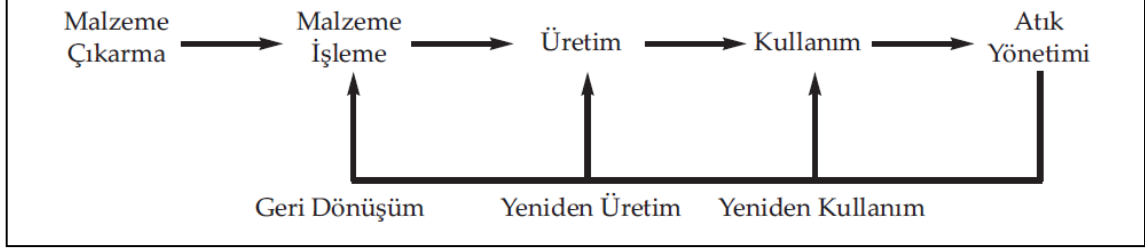
Şekil 5. Türkiye 2006 yılı katı atık oranları

Katı Atık Ana Planı Projesi kapsamında yapılan (Çevre ve Orman Bakanlığı, 2008) katı atık kompozisyon belirleme çalışmasının 2006 yılı katı atık oranlarının sonucu Şekil 5’de verilmekte, buna göre katı atıklar içerisinde en büyük orana sahip olan mutfak atıklarıdır.

1.10. Atık Yönetimi ve Atık Camların Geri Dönüşümü

Ülkemizde gerçekleşen hızlı ekonomik büyüme, teknolojik gelişme, sanayileşme, kentleşme, nüfus artışı ve refah seviyesinin yükselmesi üretilen atık miktarında artış yaşanmasına neden olmaktadır. Artan atık miktarı nedeniyle karşılaşılan zorluklar atıksız veya olabildiğince az atıklı üretimi ve tüketimi amaçlayan “atık yönetimi yaklaşımını” gerektirmektedir. Atık yönetimi kapsamında gerçekleştirilen süreçler arasında; tehlikeli ve tehlikesiz atıkların azaltılması, kaynağında ayrı toplanması, ara depolanması, atıkların

taşınması, geri kazanılması, geri dönüştürülmesi ve bertarafı yer almaktadır (Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, 2014).



Şekil 6. Atık yönetimi döngüsü (Şengül, 2010).

Atık yönetimi süreci Şekil 6’da verilmektedir. Yeniden kullanım; atıkların toplama ve temizleme dışında hiçbir işleme tabi tutulmadan aynı şekli ile ekonomik ömrü doluncaya kadar defalarca kullanılmasıdır. Cam şişelerin yıkanarak evlerde kullanılması tekrar kullanıma bir örnektir (Şengül, 2010).

Yeniden üretim; atıkların kırılmış veya eskimiş parçaları kapsamlı bir şekilde incelenip, ürün tamamen demonte edilerek yeni ürün kadar kaliteli ürün elde edilmesi için gereken işlemlerinin yapılmasıdır (Şengül, 2010).

Geri dönüşüm; kullanılmış üründen kullanılabilir ürün ve parçaları ayırarak orijinal ürünün üretiminde kullanma ve yararlanma işlemleridir. Geri dönüşüm işleminde ürünün yapısı korunmaksızın malzeme geri kazanılmaktadır. Atıkların yok olma sürelerinin uzun olmasından dolayı, bunların geri dönüşümlerinin sağlanarak tekrar kullanılabilir hale getirilmeleri gerekmektedir (Şengül, 2010).

Doğal kaynakların hızla tüketildiği günümüzde atık sorununun önemini anlayan ülkeler atıkların yeniden kullanılması ya da atıklardan yeniden yararlanılması girişimlerini artırmışlardır. Birleşmiş Milletler tarafından her yıl ortaya çıkan katı atık hacmi 200 milyon ton olarak tahmin edilmektedir. Cam her yıl ortaya çıkan bu katı atık hacminin % 7’sini oluşturmaktadır (Özünel ve İmat, 2016).

Cam, diğer geri dönüşüm malzemelerine kıyasla çok farklı bir yerde durmaktadır. Çünkü cam yüzde yüz oranında yeniden kazanılabilir bir malzemedir. Üstelik defalarca kere geri dönüşüm işlemi yapmaya müsait bir yapıdadır. Bu yönüyle de geri dönüşüm firmaları tarafından çok fazla tercih edilmektedir. Geri dönüşüm tesisine getirilen atık camlar ilk önce tesiste depolanır ve renklerine göre ayrılır. Bu ayırım işleminde ayrıca camların yapıları ve türleri de önemli bir yerde durmaktadır. Bu ayrıştırma işleminden

sonra atık camların geri dönüşümü camların yıkanması ve öğütülmesi işlemleriyle devam eder. Ayrıca camlar yıkama sonrası küçük parçacıklar haline getirilmek üzere kırma ve öğütme makinelerine girmektedir. Bu makinelerde istenen büyüklükte öğütülen cam atıklar istenen geri dönüşüm için ısı makinelerine sevk edilir. Burada yüksek ısı altında eritilen cam atıklar tekrar kullanım imkânı için sıvı hale getirilir. Atık camların geri dönüşümü işlemi bu şekilde sonuçlanarak tekrar kullanım alanı bulması için çeşitli şekillerde geri kazanım sağlanmış olur (URL-4, 2017). Farklı alanlardan toplanan atık camlar Şekil 7’de verilmektedir.



Şekil 7. Atık cam görüntüleri (URL-5, 2017).

Cam atıklar camın doğal yapısında bulunan soda, kireç ve kum unsurlarının da ayrışmasını temel almaktadır. Bu unsurlar camın ayrışması sırasında bir çeşit filtreleme sistemi ile ayrıştırılmaktadır ve neticede ortadan kaldırılmaktadır. Cam tüm bu işlemlerden sonra tekrar kullanım alanı bularak ekonomik anlamda değer kazanan önemli geri dönüşüm unsuru olmaktadır. Sürekli olarak geri dönüşüme girebilen cam atıklar hem ekonomik anlamda hem de çevreci anlamda çok büyük bir boşluğu doldurmaktadır. Cam geri kazanımıyla pek çok alanda tasarruf yapılmaktadır. Geri kazanımda sağlanan tasarruflar Tablo 6’da verilmektedir. Atık camların geri dönüşüm işlemleri çok maliyetli olmayan ve firmaya güzel bir gelir kazandıran ekonomik bir faaliyettir (URL-4, 2017).

Tablo 6. Cam geri kazanımıyla sağlanan tasarruflar (%100 geri dönüştürülmüş cam atık kullanımıyla) (TOBB, 2012).

Tasarruf türü	Tasarruf oranı (%)
Enerji tüketiminde azalma	25
Karbon emisyonlarında azalma	50
Maden atığında azalma	80
Su tüketiminde azalma	50
Korunan doğal kaynaklar	Kum, soda, kireç

1.10.1. Camın Yapısı ve Çeşitleri

Cam, yer kabuğunda bolca bulunan silika (kum), soda külü ve kireç, feldspat ve iz elementlerden üretilir. Bu ham maddelerden silika çok önemlidir ve temin edilmesi aslında sınırsızdır. Soda külü, tuz kullanımı ile kimyasal olarak üretilebilir ve doğal olarak mineral oluşumu ile bulunabilir. Kireç ise bolca bulunan bir maddedir (TOBB, 2012).

Cam, ani soğutulmuş alkali ve toprak alkali metal oksitleriyle, diğer bazı metal oksitlerin çözülmesinden oluşan akışkan bir malzeme olup amorf yapısını koruyarak katılaşır. Üretim sırasında hızlı soğuma nedeniyle kristal yapı yerine amorf yapı oluşur. Bu yapı cama sağlamlık ve saydamlık özelliğini kazandırır. Cam yapımı için kum, kalker, feldspat, dolomit, soda ve sodyum sülfat üretilmek istenen cama göre belli reçetelerde bir silo içinde karıştırılıp cam fırınlarında 1500°C-1600°C'de eritilir. Bu akışkan malzeme, üfleme, dökme-silindirleme, pres, haddeleme, yüzdürme, savurma veya akıtma yöntemlerinden biri kullanılarak istenen şekle sokulur. Biçimlendirme sonrasında üretilen cam, kullanılacak niteliklere sahip olmayabilir, bunu takiben kesim, temperleme, renklendirme gibi işlemlere tabi tutulur.

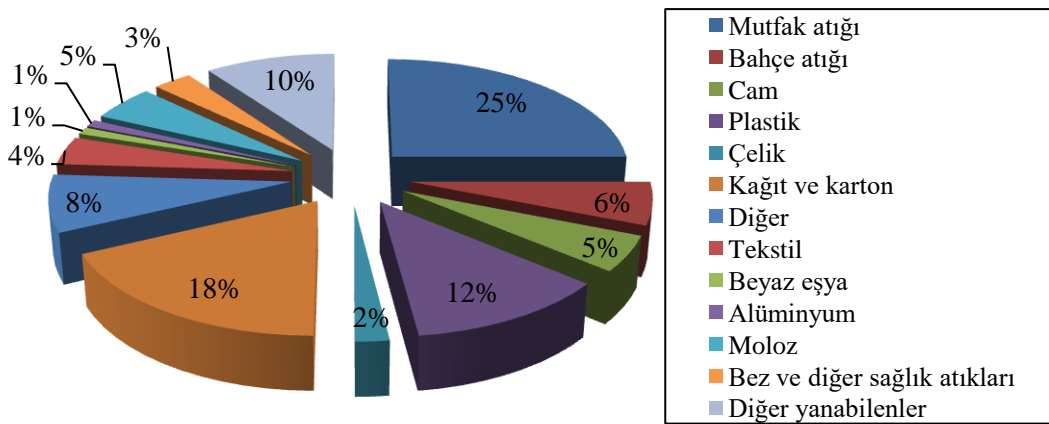
Camlar ana üretim alanlarına göre şu şekilde sınıflandırılabilir (TOBB, 2012):

- Mimari Camlar: Düzcam, Kaplamalı Camlar, Isıl İşlem Uygulanmış Camlar, Yalıtım
- Camı Üniteleri, Laminasyonlu Camlar, Opaklaştırılmış Camlar, Buzlu Camlar, Aynalar, Telli Camlar, Cam Tuğla, Cam Parke
- Otomotiv Camları: Lamine Camlar, Temperli Camlar, Özel Camlar
- Enerji Camları

- Beyaz Eşya Camları
- Cam Ev Eşyası
- Cam Ambalaj
- Cam Elyafı (cam yünü, cam keçe, fitil, iplik, kırılmış demet vb)
- Diğer (cam kırığı, cam bilya, cam ampüller, elektrik lambaları, katod ışın tüpleri, camdan iç gövdeler, sinyalizasyon camları ve camdan optik elemanlar, saat ve gözlük camları, cam tuğla, karo, kiremit, mozaik, camdan laboratuvar ve eczane eşyası, cam boncuk vb)

1.10.2. Dünyada Atık Camların Geri Dönüşümü

Cam malzemelerin kullanımındaki artış, ortaya çıkan atık camların da artmasına neden olmaktadır. Avrupa Birliği ülkeleri yaklaşık olarak 33 Mt cam üretimi yaparken, ABD 20 Mt ve Çin 32 Mt cam üretmektedir. Geri dönüşüm oranları incelendiğinde ise, Türkiye’de yıllık 120.000 ton camın, 80.000 tonu geri dönüştürülmektedir. Portekiz’de ise 425.000 ton atık camın yalnızca 192.000 tonu yeniden kullanılmaktadır (Dikmen ve Savcı, 2015). 1997 yılında, Birleşik Krallık’ta cam endüstrisinde 425.000 ton cam geri dönüştürülmüştür. Geri dönüştürülme oranı diğer ülkelerle (ABD, Japonya, Almanya sırasıyla geri dönüştürme oranları %20, %78, %85) kıyaslandığı zaman Hong Kong’da (%1) nispeten daha düşüktür (Tam ve Tam, 2006).

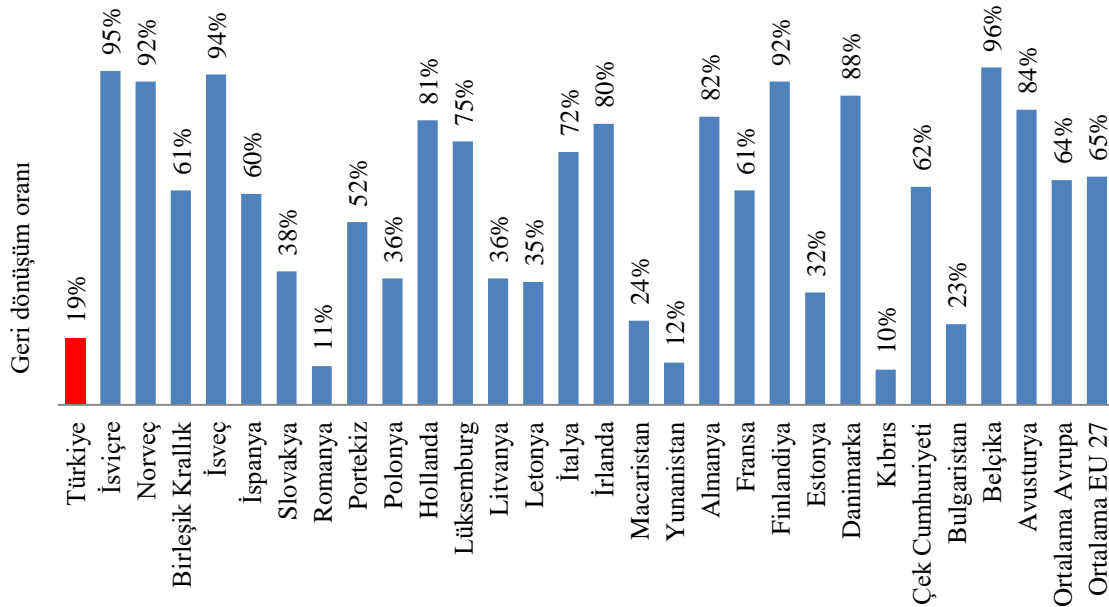


Şekil 8. AB 27 belediye katı atık bileşimi (URL-6, 2017).

Şekil 8’de AB 27 belediye katı atık bileşimleri verilmektedir. AB 27’deki belediye katı atık üretime göre; en büyük miktarı %25 oranla mutfak atıkları oluştururken, ikinci en büyük miktarı %18 oranla kağıt ve karton onun peşine de %12 oranla atık plastikler oluşturmaktadır. Cam atıklar ise tüm atıklar içerisinde %5’lik bir değere sahiptir.

Avrupa Birliği İstatistik Kuruluşu Eurostat’ın verilerine göre AB 27 ülkelerinde 2008’da üretilen 2.5 milyar ton atığın yaklaşık yarısı, düzenli depolama sahalarına dökülmüştür. Diğer yarısı geri kazanılmış, geri dönüştürülmüş, yeniden kullanılmış veya yakılmıştır. İyi bir atık yönetiminin, çevre üzerindeki etkileri azalttığı ve ekonomik fırsatlar sunduğu söylenebilmektedir. AB’de üretilen yaklaşık 2.5 milyar ton atığın 1.150 milyon tonunu temel geri dönüştürülebilirler (kağıt ve karton, plastik, demir ve çelik, alüminyum, bakır ve nikel, metaller, cam, elektronik atıklar, inşaat ve yıkıntı atıkları) oluşturmaktadır. Bu miktarın 680 milyon tonu geri dönüştürülmektedir (Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, 2014).

Şekil 9’da verilen AB 27’deki toplam cam geri dönüşüm yüzdeleri verilmektedir. 2008 yılında cam dönüşümünde en büyük yüzdeler %96 ve %95 oranla Belçika ve İsviçre sahipken, Türkiye %19 oranla son sıralarda yer almaktadır.

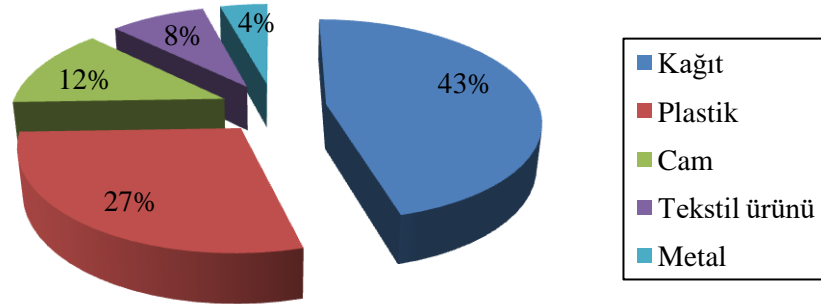


Şekil 9. AB 27 2008 yılı cam geri dönüşüm oranları (URL-7, 2017).

1.10.3. Türkiye’de Atık Camların Geri Dönüşümü

Atıkların depolanması, toplanması, taşınması gibi işlemler sırasında oluşan maliyetler ülke ekonomilerini olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Bu nedenle; bu maliyetleri en aza indirmek için geri dönüşüm oldukça önem kazanmaktadır (Gündüzalp ve Güven, 2016).

ABD ve Avrupa’da geri dönüşüm alanında çok uzun yıllar önemli mesafeler alınırken, Türkiye’de bu süreç 20 yılı biraz aşan bir geçmişe sahiptir (Yetim, 2014). Bugün yaklaşık olarak Türkiye’de yılda 25 milyon ton evsel atık, 1.2 milyon ton endüstriyel atık, 100 bin ton tıbbi atık ve 530 bin ton e-atık ortaya çıkmaktadır. 2010 yılına kadar % 35 olan geri dönüşüm oranı 2012 ve sonrasında % 40 civarına yükselmiş durumdadır. Bununla birlikte bir yılda çöpe atılıp geri dönüştürülemeyen atıkların değeri ise hala yaklaşık 1.5 milyar TL düzeyindedir (Yetim, 2014). Şekil 10’da geri dönüştürülen atıkların dağılımı verilmektedir. Geri dönüştürülen atıkların % 43’ünü kâğıt, % 27’sini plastik, % 12’sini cam, % 8’ini tekstil ürünleri, % 4’ünü de metal atıklar oluşturmaktadır.



Şekil 10. Atıkların geri dönüştürülme oranları (Yetim, 2014).

Türkiye’de cam geri kazanım çalışması için 6570 bin ton atık cam tekrar işlenerek geri kazanılmaktadır. Ülkemizde çöp içindeki geri kazanılabilir madde oranı yaklaşık olarak %12’dir. Cam şişelerin Türkiye genelindeki geri kazanım oranı ise %36’dır. Atık camların %64’ü ise değerlendirilememektedir. Camların toplanarak geri kazanılması, depolama sahalarının ömrünü uzatma ayrıca doğal kaynakları korunmasını sağlamaktadır. Kullanılan camların %64’lük bir kısmının geri dönüşüme katılmadığı dikkate alınacak

olursa, alternatif kullanım alanlarının oluşturulması ve ekonomiye olan katkısının artırılması büyük önem taşımaktadır (Özünal ve İmat, 2016).

1.11. Atık Camın Kullanım Alanları

Cam, inşaat endüstrisinde pek çok uygulamada kullanılabilir. Bu kullanım alanlarından bazıları aşağıda verilmektedir (Tam ve Tam, 2006):

Kırılmış cam, bitümlü kaplamada agrega olarak kullanılabilir. Ancak atık camın asfalt karışımlarda agrega olarak kullanılabilmesi için çok küçük parçalara kadar kırarak küçültmek gerekmektedir.

İsveç'te beton içinde ince agrega olarak cam kullanılmıştır. Beton veya asfalt üretimi için kullanılan ikincil agregadaki camın varlığı, elde edilen malzemenin dayanımını azaltabilmektedir. Mikrofiller; cam malzemesinin ayrılması ve yıkanmasıyla elde edilen temizleme adımlarından oluşan endüstriyel bir işlemin sonucudur. Daha sonra kurutulan, kırılan ve istenilen boyuta kadar öğütülen cam, çimento ile agreganın gradasyonu arasında tanımlanmaktadır. Cam, diğer bileşenlerle birlikte karıştırma işleminde betona eklenir ve puzolanik bir madde olarak rol alır. Mikrofiller'in ilavesi, sertleşmiş beton kadar taze betonun da özelliklerini iyileştirmektedir.

Dolgu maddesi: Birleşik Krallık uygulamaları geri dönüştürülmüş camı ince malzeme olarak 'ConGlassCrete' olarak adlandırılan çimento ile yer değiştirmiş ve bunu betonun dayanımını artırmak için kullanmıştır.

Kaldırım bloğu, ABD'de kırılarak geri dönüştürülmüş cam agregadan elde edilir. Hong Kong, cilalamadan sonra yüzey üzerinde etkileyici yansıma görünümü sağlayan, beton bloğun su emilimini azaltan, iyi bir basınç dayanımı sağlayan bu geri dönüşüm teknolojisini geliştirmektedir. Ancak agregaların keskinliği ve alkali silika reaksiyon genişlemesi problemlerinin çözülmesi gerekmektedir.

Malzeme özelliklerini artırmak için cam elyafın üretiminde geri dönüştürülen cam, ısı ve ses yalıtımlarında kullanılır; çimento, alçı veya reçine ürünleriyle güçlendirilerek karıştırılabilir. Japonya uygulamaları, cam yünü dahil; tesis için boru kaplaması ve ısı yalıtım levhası; endüstriyel ve ticari binalar için tavan tahtası ve ses yalıtım levhası; otomobil için cam yünü levhası ve bağlayıcı olmayan cam yünü örtüsü yalıtım malzemesi olarak geri dönüştürülen camdan faydalanmaktadır.

Belirten kullanımlarının yanında atık camlar, inşaat sektöründe özellikle tuğla ve beton parçalarının atık camlarla karıştırılması ile üretilen bina panellerinde, mozaik cam halinde dış yüzey kaplama malzemesi olarak kullanılabilir. İç mekânlarda dekorasyon amaçlı olarak, trafik - yol işareti ve yol çizgi malzemelerinde katkı olarak, cam yünü ve zımpara üretiminde yol kenarlarındaki yansıtıcı boyalarda ve yol kaplamalarında da kullanılabilirler (Dikmen ve Savcı, 2015).

1.11.1. Cam Katkılı Asfaltlar

Atık camın kullanım alanlarından biri de cam katkıli asfaltlardır. Agrega olarak cam kırıkları içeren asfalt karışımlar, cam katkıli asfalt (glassphalt) olarak adlandırılmakta ve 1960'lerden beri atık cam fazlasının imha edilmesi için yaygın şekilde denenmektedir. Cam katkıli asfalt esas olarak, geleneksel sıcak karışım asfalt ile aynıdır, ancak kaya ve/veya kum agregasının %5 ile %40'ı kırılmış cam ile yer değiştirilmektedir. Camın geleneksel agrega yerine kullanılmasının maliyet açısından etkinliği, yeri, yerel agregaların kalitesi ve maliyeti ve yararlı yeniden kullanım uygulamalarında geri dönüştürülmüş malzemeleri kullanmak için mevcut kredilere oldukça bağlı olmaktadır. Cam katkıli asfaltlar başlangıçta karışık renkli atık camın depolama alanında imha edilmesine alternatif olarak geliştirilmiştir. Yeni ürünlere dönüştürülmek için uygun olmayan karışık renkli cam, pek çok geri dönüşüm programı tarafından üretilmektedir. Karışık renkli camlar için alternatif yerel pazarlar yoksa ve diğer seçenek ücret karşılığı imha edilmesi ise işlenmiş camın asfaltta doğal agrega yerine kullanılması düşünülmeli gereken bir seçenek olmaktadır (CWC, 1996).

1960'ların sonu ve 1970'lerin başında, atık camın sıcak karışım asfaltta agrega ile yer değiştirmesi olarak kullanılma potansiyelini incelemek için Birleşik Devletler'de çeşitli çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu süre zarfında, test-kaplama şeritleri ABD ve Kanada genelinde yaklaşık 33 noktaya yerleştirilmiştir (Salem vd., 2017).

1970'lerin ortalarından 1980'lerin ortalarına kadar, Baltimore şehri sokak kaplamalarında, güneş ışığının veya sokak lambasının cam kaplamaya yansımından dolayı "parlama" etkisi yaratmak için en az 17 sokakta cam kullanılmıştır. 1980'li yılların ortalarında yapılan araştırmada, Long Island'da faaliyetler gerçekleştirilmiş ve kaplama uygulamalarında agrega yerine kullanılmak için 12600 metrik ton (14000 ton) karışık atık cam işleyen bir cam işleme tesisi tasarlanarak ve işletmeye başlanmıştır. Daha yakın

zamanlarda, çok sayıda kaplama projeleri dünya çapında atık cam kullanmaya başlamıştır. Bununla birlikte, büyük bir farkla en etkili program, New York'un Ulaştırma Departmanı tarafından üstlenilmiş, 1990'dan 1995'e kadar, yeniden yüzey kaplama uygulamalarında yaklaşık 225000 metrik ton (250000 ton) cam kullanılmıştır (Salem vd., 2017).

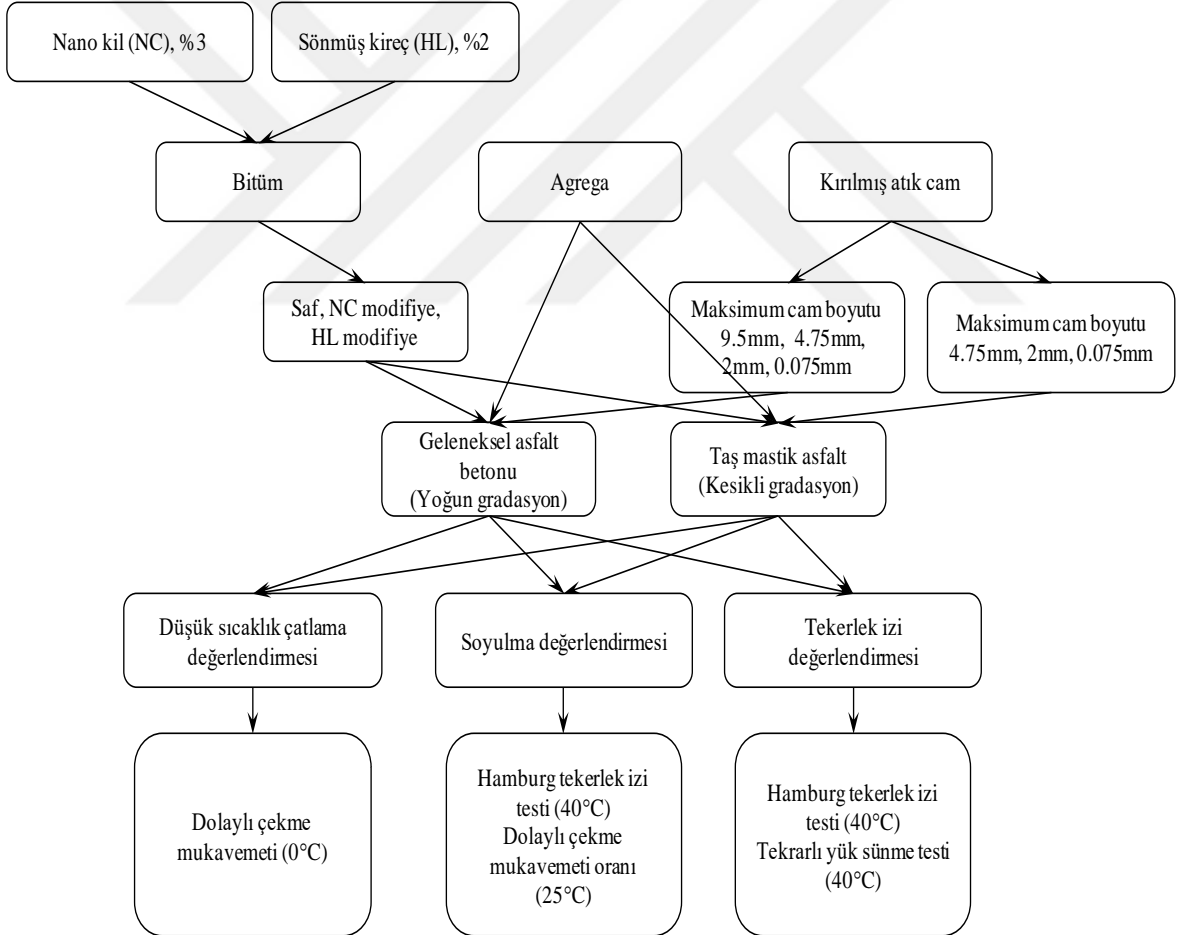
Ancak asfalt karışımında geri dönüştürülmüş kırık cam atıkları kullanıldığı zaman çeşitli problemlerle karşılaşmaktadır. Bağlayıcı ve cam arasında adezyon kaybı, özellikle kaba parçacıklarda kayma direnci kaybı, cam parçacıklarının kırılması, tekerlek patlatma ve soyulma direncinin azalması bu problemlere örnek olarak verilmektedir (Kandhal, 1992).

Bu olumsuz etkileri önlemek için cam içeriği ABD Federal Karayolu İdaresi'ne (2012) göre aşınma tabakasında %15 olarak sınırlandırılmış, hizmet sırasında cam kırıklarının parçalanması ve asfalt performansının korunmasıyla ilgili problemler de göz önünde bulundurularak kırılmış cam boyunun 4.75mm'den küçük olması gerektiği vurgulanmıştır.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Giriş

Bu bölümde çalışmada kullanılan bitüm, agrega, atık cam ve katkı malzeme özelliklerini belirlemede kullanılan deneyler, malzeme özellikleri ve karışım tasarımına ait bilgiler verilecektir. Malzeme tanımlama deneyleri yapıldıkları standartları ile birlikte sunulmaktadır. Şekil 11 'de yapılan çalışmanın genel özeti verilmektedir.



Şekil 11. Deneysel akış diyagramı

2.2. Çalışmada Kullanılan Malzemeler

2.2.1. Bitümlü Bağlayıcı ve Özellikleri

Çalışmada 50-70 penetrasyonlu bitüm kullanıldı. Tüpraş Kırıkkale tesislerinden temin edilen bitümün mühendislik özellikleri Tablo 7’de gösterilmiştir.

Tablo 7. Asfalt çimentosu 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. Agregas Özellikleri

Agregalar Trabzon İli, Araklı İlçesine bağlı bazalt taşocağından temin edilmiştir. Bazalt agregasının kimyasal bileşimi Tablo 8’de ve temel fiziksel özellikleri ise Tablo 9’da sunulmuştur.

Tablo 8. Bazalt agregasının kimyasal analiz sonuçları

Bileşim, %	Formül	Örnek 1	Örnek 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
Isıtma kaybı		4.68	3.01
Kalsiyum karbonat + Magnezyum karbonat	CaCO ₃ +MgCO ₃	5.30	2.80

Tablo 9. Bazalt agregasının temel özellikleri

Özellik	Deney metodu	Değer	Şartname limitleri
Özgül ağırlık (Kaba agregası)	ASTM C 127		
Hacim		2.684	
Zahiri		2.744	
Özgül ağırlık (İnce agregası)	ASTM C 128		
Hacim		2.656	
Zahiri		2.754	
Özgül ağırlık (filler)		2.821	
Parçalanma direnci (Los Angeles) (%) kayıp	TS EN 1097-2	12	En fazla 25
Yassılık indeksi, (%)	BS 812	14	En fazla 25
Soyulma direnci (katkısız) (%)	ASTM D-1664	35-40	
Cilalanma değeri, (%)	TS EN 1097-8		En az 50
Su emme, (%)	TS EN 1097-6	0.81	En fazla 2
Donma kaybı (NaSO ₄) (%)	ASTM C-88	0.92	En fazla 8
Kil toprakları ve ufalanabilir daneler, (%)	ASTM C 142		Bulunmayacak
İnce agregası için plastisite indeksi	TS-1900-1	Plastik değil	Plastik değil
İnce agregası için organik madde, (%)	TS EN 1744-1		Negatif

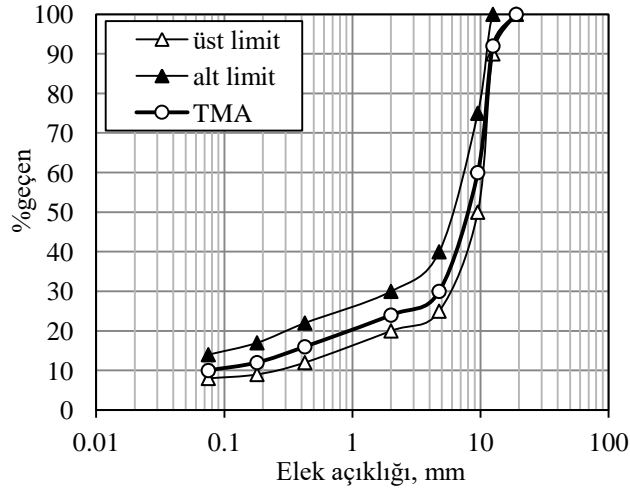
Karayolları Teknik Şartnamesine (2013)'e uygun olarak taş mastik asfalt (TMA TİP-1 A) ve asfalt betonu (TİP-1) aşınma tabakası tasarımı yapıldı. Her iki tasarımda da maksimum agregası boyutu 19mm olarak seçildi. Seçilen agregası gradasyon oranları TMA için Tablo 10'da ve geleneksel asfalt betonu (GAB) için ise Tablo 11'de gösterilmiştir. Bu oranlara bağlı olarak agregası gradasyon eğrileri de Şekil 12'de ve Şekil 13'de verilmiştir.

Tablo 10. Taş mastik asfalt karışımı ve agregası fraksiyon oranları

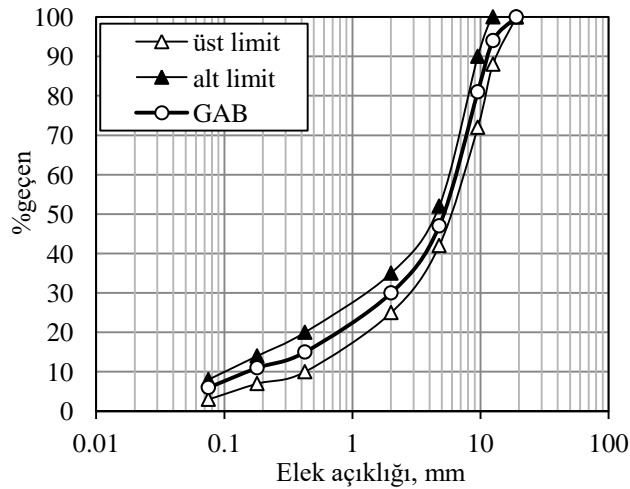
Elek Boyutu		Şartname Limitleri		Agregası gradasyonu (% geçen)	Agregası fraksiyonu ve oranları
İnç	mm	Alt limit	Üst limit		
3/4	19.0	100	100	100	Kaba agregası, %70
1/2	12.5	90	100	92	
3/8	9.5	50	75	60	
No. 4	4.75	25	40	30	İnce agregası, % 20
No. 10	2.00	20	30	24	
No. 40	0.425	12	22	16	
No. 80	0.18	9	17	12	
No. 200	0.075	8	12	10	Filler, % 10

Tablo 11. Geleneksel asfalt betonu karışımı ve agrega fraksiyon oranları

Elek Boyutu		Şartname Limitleri		Agrega gradasyonu (% geçen)	Agrega fraksiyonu ve oranları
İnch	mm	Alt limit	Üst limit		
3/4	19.0	100	100	100	Kaba agrega, %53
1/2	12.5	88	100	94	
3/8	9.5	72	90	81	
No. 4	4.75	42	52	47	İnce agrega, %41
No. 10	2.00	25	35	30	
No. 40	0.425	10	20	15	
No. 80	0.18	7	14	11	
No. 200	0.075	3	8	6	Filler, %6



Şekil 12. Taş mastik asfalt gradasyon eğrisi



Şekil 13. Geleneksel asfalt betonu gradasyon eğrisi

2.2.3. Cam Agregalar ve Özellikleri

Çalışmada, Trabzon ili Arsin Organize Sanayi Bölgesi cam işleme fabrikalarından temin edilen atık camlar kullanıldı. Atık camlar, renksiz formda olup temperli ve inşaat camlarının karışımından oluşmaktadır. Temin edilen camlardan bir görüntü Şekil 14’de gösterilmiştir. Camlar, laboratuvar ortamında mini konkasörde kırılarak standart ASTM eleklerinden elenmiştir. Elenen camlardan bir görüntü Şekil 15’de sunulmuştur. En büyük elek boyutu 3/8inç (9.5mm) olarak seçilmiştir. Bu boyutun altında kalan bütün standart eleklerden (4.75mm, 2.00mm, 0.425mm, 0.18mm ve 0.075mm) eleme yapılmıştır. Atık camların belirli bir boyuttan sonra daha fazla ince boyutlara öğütülmesinin zorluğundan dolayı mini konkasör yerine özel bilyeli öğütücü kullanılarak filler malzeme elde edilmiştir. Atık camlar agrega yerine karışıma karıştırılmıştır. Katılan her fraksiyon için agrega eksiltilmiş ve yerine cam agrega eklenmiştir. Cam agrega, kullanıldığı fraksiyonlarda, katılma kolaylığından dolayı %50 oranında katılmıştır. Kullanılan atık camların kimyasal analiz sonuçları Tablo 12’de, katılan agregaların toplam agreganın yüzdesi olarak miktarları Tablo 13’de gösterilmiştir.



Şekil 14. Toplanan atık camlardan bir görüntü



Şekil 15. Kırma ve öğütme sonrası elenen atık camlardan bir görüntü

Tablo 12. Cam atıklarının kimyasal analiz test sonuçları

Bileşim	Formül	Değerler (%)
Silisyum dioksit	SiO ₂	70.4
Alüminyum oksit	Al ₂ O ₃	0.11
Titanyum dioksit	TiO ₂	0.086
Demir oksit	Fe ₂ O ₃	0.205
Magnezyum oksit	MgO	5.03
Kalsiyum oksit	CaO	7.01
Sodyum oksit	Na ₂ O	12.95
Potasyum oksit	K ₂ O	0.51
Sülfür trioksit	SO ₃	0.23

Tablo 13. Cam atıklarının 1150 gr agrega içindeki kullanım oranları

	3/8 inç (9.5mm)	No4 (4.75mm)	No10 (2.00mm)	No40 (0.43mm)	No80 (0.18mm)	No200 (0.075mm)	Toplam agrega yüzdesi
Kesikli gradasyon (TMA)		34.5	46	23	11.5	57.5	%15
			46	23	11.5	57.5	%12
						57.5	%5
Yoğun gradasyon (GAB)	195.5	97.75	86.25	23	28.75	34.5	%40.5
		97.75	86.25	23	28.75	34.5	%23.5
			86.25	23	28.75	34.5	%15
						34.5	%3

2.2.4. Sönmüş Kireç ve Özellikleri

Sönmüş kirecin, asfalt karışımların su hasarını ve donma direncini artırmak için etkili bir katkı maddesi olduğu ifade edilmektedir. Mevcut test yöntemleri sönmüş kirecin yararlı etkilerini ortaya koymaktadır. Sönmüş kirecin, ABD’de son 40 yıldaki yaygın kullanımı göz önüne alındığında, bir su hasarı katkı maddesinden daha fazlası olduğu görülmüştür. Bitümün kimyasal yaşlanmasını azalttığı ve bitümün viskozlaştırıcı kısımları olan asfaltların oluşumunu önemli derecede azalttığı gözlemlenmektedir (Asphalt Task Force, 2010).

Genellikle 45-60°C aralığında ölçülen tekerlek izi direncinin, karışıma %75 oranda eklenen sönmüş kireç katkısı ile iyileştiği gözlemlenmiştir. Asfalt karışımlarda sönmüş kireç kullanımının, karışım durabilitesini arttırdığı belirlenmiştir. Kuzey Amerika Devlet kurumlarının saha tecrübesi, karışımda %1-1.5 (kuru agrega ağırlığı olarak) oranında sönmüş kireç kullanımı, asfalt karışımların dayanımını 2 ile 10 yıl, yani %20 ile %50 oranında artırdığını tahmin etmektedir (Asphalt Task Force, 2010). Şekil 16’da bitüme katılan sönmüş kirece ait bir görüntü verilmiştir.



Şekil 16. Kullanılan sönmüş kireçten bir görüntü



Şekil 17. Bitümün modifiye edilmesi

Deneyler kapsamında, SKK 80-T tipi sönmüş kireç, katkı maddesi olarak %2 oranında kullanılmıştır. Sönmüş kireç bitüme ilave edilerek modifiye bitüm elde edilmiştir. Modifikasyon high shear mikser kullanılarak yapılmıştır. 155°C sıcaklıkta 20 dakika süre ile 4500rpm karıştırma hızında yapılmıştır. Modifikasyon sırasından bir görüntü Şekil 17’de gösterilmiştir. Sönmüş kirecin kimyasal analiz sonuçları da Tablo 14’de verilmiştir.

Tablo 14. Kullanılan sönmüş kirecin kimyasal analiz sonuçları

Kimyasal özellikler	Deney standardı	Değer	Şartname limiti, % (TS 30, 1993)
Toplam CaO (%)	EN 459-2	84.66	≥80
Aktif Ca(OH) ₂ (%)	TS 32	82.23	
MgO (%)	EN 459-2	4.05	≤5
Toplam CaO+MgO (%)	TS	89.17	
Kızdırma kaybı (%)	EN 459	23.17	
Asitte çözünmeyen (%)	TS 32	1.39	≤1.5
R ₂ O ₃ (%)	TS 32	0.44	
SO ₃ (%)	EN 459	1.51	≤2
CO ₂ (%)	EN 459	3.77	≤7
Fiziksel özellikler			
90 mikron üzeri	EN 459	6	
Yoğunluk (kg/m ³)	EN 459	473	

2.2.5. Nanokil ve Özellikleri

Nano teknoloji, malzeme endüstrisi için yaratıcı ve umut verici bir teknik olarak görülmektedir. Nano malzemeler dünya çapında birçok uygulamada yaygın olarak kullanılmaktadır. Asfalt karışımları modifiye etmek ve iyileştirmek için farklı fırsatlar sunan çeşitli nano malzeme türleri mevcuttur. Asfalt uygulamalarında kullanılan nano malzemeler; nano tüpler, nano lifler, polimerleşmiş tozlar, nano boyutlu plastik tozlar, nano sönmüş kireç, nano silika ve nano kil gibi çok farklı seçeneklerde sunulmaktadır (İskender, 2016).

Killer katkı maddesi olarak nanokil üretimi için kullanılmaktadır. Nanokil (katmanlı silikatlar) doğal oluşan mineraldir ve yapısında doğal değişim gösterebilmektedir. Kilin saflığı nihai nanokompozitin özelliklerini etkilemektedir. En sık kullanılan kil türü montmorillonittir (Grim, 1959).

Nanokil, nano silika ve nano tüp gibi nano partiküllerin asfalt karışımlara eklenmesi, karışımın yorulma direncini ve tekerlek izini iyileştirirken, asfalt bağlayıcının viskozitesini de artırmaktadır. Nanokilin polimer modifiye asfalt karışımlarda ikinci modifiyer olarak kullanılması, düşük sıcaklıklarda asfalt karışımın özelliklerini geliştirirken, polimer modifiye asfalt (PMA) karışımların depolama stabilitesi ve yaşlanma direncini artırabilmektedir (Yang ve Tighe, 2013).

Üretilen nanokilin görüntüsü Şekil 18'de ve kimyasal özellikleri de Tablo 15'de sunulmuştur. Nanokil, bitüm ağırlığının %3'ü kadar kullanıldı. High shear mikser kullanılarak, 155°C sıcaklıkta 20 dakika süre ile 4500rpm karıştırma hızında bitüme ilave edilmiştir. Nanokil, Eskişehir bölgesi bentonitlerinden özel olarak üretilmiştir. Organik modifiyer olarak "dimethyl, dehydrogenated tallow, quaternary ammonium" kullanılmıştır.



Şekil 18. Kullanılan nano kilden bir görüntü

Tablo 15. Kullanılan nano kilin kimyasal analiz sonuçları

Bileşim	Formül	Oranı (%)
Alüminyum oksit	Al ₂ O ₃	8.394
Kalsiyum oksit	CaO	0.1531
Klor	Cl	0.4869
Bakır oksit	CuO	0.007995
Demir oksit	Fe ₂ O ₃	0.5189
Germanyum dioksit	GeO ₂	0.003939
Potasyum oksit	K ₂ O	0.1672
Magnezyum oksit	MgO	2.174
Mangan oksit	MnO	0.01927
Sodyum oksit	Na ₂ O	0.2342
Niyobyum oksit	Nb ₂ O ₅	0.005885
Nikel oksit	NiO	0.01105
Difosfor pentaoksit	P ₂ O ₅	0.008532
Rubidyum oksit	Rb ₂ O	0.002243
Sülfür trioksit	SO ₃	0.04875
Silisyum dioksit	SiO ₂	42.99
Titanyum dioksit	TiO ₂	0.04296
Çinko oksit	ZnO	0.007696
Zirkonyum dioksit	ZrO ₂	0.004362
Kızdırma kaybı		44.72

2.2.6. Selüloz Elyaf ve Özellikleri

Selüloz elyaf yalnızca taş mastik asfalt karışımlarda kullanıldı. Selüloz elyafların karışımın mekanik özellikleri üzerinde etkili olmadıkları, yalnızca karışımın üretilmesi sırasında, yüksek bitüm içeriklerinden dolayı, bitümün süzülmesini önlemek amacıyla kullanıldıkları bilinmektedir. KGM (2013) şartnamesine uygun olarak VIATOP Premium® marka selülozik elyaf kullanılmıştır. Pellet şeklinde olan süzülme önleyici katkıının daha iyi karışımının sağlanması için ezilerek kullanılmıştır. Yapılan testler sonucunda, selüloz elyafın %3 oranında kullanımının yeterli olduğu görülmüştür. Kullanılan selüloz elyaf Şekil 19’da, geleneksel özellikleri Tablo 16’da verilmiştir.

Tablo 16. Selüloz fiber geleneksel özellikleri

Özellik	Değer
Selüloz içeriği, (%)	66.7
Bitüm içeriği, (%)	33.3
Parlama sıcaklığı, (°C)	~500
Yoğunluk, (gram/litre)	480-530
Ortalama partikül kalınlığı, (mm)	4±1
Ortalama partikül boyutu, (mm)	2-8



Şekil 19. Süzülme önleyici selüloz fiber katkısı

2.3. Karışım Tasarımları

Yukarıda özellikleri verilen materyallerle, Marshall tasarım yöntemi (ASTM D 1559) ile geleneksel asfalt betonu ve taş mastik asfalt dizaynı yapıldı. Karayolları Genel Müdürlüğü, Karayolları Teknik Şartnamesi (KTŞ) esas alındı. Her iki karışım türü için hem saf bitüm ile hem de sönmüş kireç modifiye ve nanokil modifiye bitümler kullanılarak altı tasarım yapıldı. Tasarım sonuçlarından elde edilen karışım özellikleri ve ilgili karışımın şartname limitleri taş mastik asfalt karışım için Tablo 17’de, geleneksel asfalt betonu karışımı için Tablo 18’de sunulmuştur.

Taş mastik asfalt ve geleneksel asfalt betonu karışımı için başlangıçta değişik bitüm içeriklerinde altı grup Marshall briketi üretildi. Her bitüm içeriğinde üç örnek hazırlandı. Katkı maddesi eklenmesine bağlı olarak da katkısız (kontrol), nano kil katkılı ve sönmüş kireç katkılı modifikasyon için 3 farklı seçenekte her birinden 18 adet olmak üzere toplam 54 adet Marshall briketi yapıldı. Optimum bitüm içeriği; taş mastik asfalt için %3, asfalt betonu için %4 hava boşluğuna karşılık gelen bitüm yüzdesi olarak alındı.

Tablo 17. Taş mastik asfalt tasarım sonuçları

Tasarım parametreleri	Şartname limitleri	Geleneksel bitümlü (katkısız) karışım	Sönmüş kireç modifiye bitümlü karışım	Nanokil modifiye bitümlü karışım
Darbe sayısı, her bir yüze	50	50	50	50
Yoğunluk, gr/cm ³		2.381	2.375	2.396
Marshall stabilitesi, kg		3337.8	3638.4	3680.5
Hava boşluğu, V _h , %	2-4	2.983	3.008	2.999
Asfaltla dolu boşluk, V _f , %		85.128	85.117	85.191
Akma, mm		3.287	3.528	5.581
Bitüm içeriği, W _a , %	En az 5.8	6.65	7.03	6.9
VMA, %	En az 16	19.928	20.489	19.982
Elyaf miktarı, %	0.3-1.0	0.3	0.3	0.3
Schellenberg bitüm süzülme değeri, %	En fazla 0.3	0.19	0.15	0.18

Tablo 18. Geleneksel asfalt betonu tasarım sonuçları

Tasarım parametreleri	Şartname limitleri	Geleneksel bitümlü (katkısız) karışım	Sönmüş kireç modifiye bitümlü karışım	Nanokil modifiye bitümlü karışım
Darbe sayısı, her bir yüze	75	75	75	75
Yoğunluk, gr/cm ³		2.436	2.416	2.426
Marshall stabilitesi, kg	En az 900	4466.2	4565.2	4622.7
Boşluk, V _h , %	3-5	4.025	3.992	3.999
Asfaltla dolu boşluk, V _f , %	65-75	73.795	74.396	73.966
Akma, mm (10 ⁻² in)	2-4	2.309	1.348	2.727
Bitüm içeriği, (%)	4-7	5.30	5.63	5.63
VMA, %	14-16	14.859	15.534	15.526

Tasarım parametrelerine uygun olarak yapılan asfalt örnekleri Şekil 20’de ve karışımların pratik özgül ağırlıkları Tablo 19’da verilmektedir.



Şekil 20. Üretilen örneklerin bir bölümünden görüntü

Tablo 19. Karışımların pratik özgül ağırlıkları

Maksimum cam agregası boyutu	Taş Mastik Asfalt Karışım			Geleneksel Asfalt Beton Karışım		
	UM (saf bitüm)	NC (nanokil mod. bitüm)	HL (sönmüş kireç mod. bitüm)	UM (saf bitüm)	NC (nanokil mod. bitüm)	HL (sönmüş kireç mod. bitüm)
0	2.281	2.29	2.265	2.355	2.306	2.379
	2.272	2.292	2.274	2.338	2.295	2.354
	2.284	2.279	2.255	2.329	2.307	2.365
0.075mm	2.248	2.264	2.258	2.333	2.312	2.319
	2.255	2.239	2.279	2.35	2.317	2.343
	2.245	2.249	2.264	2.343	2.317	2.338
2.00mm	2.338	2.271	2.284	2.260	2.313	2.271
	2.319	2.285	2.257	2.278	2.275	2.278
	2.291	2.305	2.273	2.264	2.289	2.288
4.75mm	2.262	2.259	2.296	2.26	2.285	2.285
	2.246	2.27	2.292	2.269	2.275	2.281
	2.251	2.289	2.298	2.274	2.286	2.302
9.5mm				2.242	2.247	2.275
				2.232	2.249	2.266
				2.251	2.251	2.246

2.4. Yöntem

Laboratuarda hazırlanan karışımların performansını, arazi koşullarında üretilen ve hizmet veren kaplamaların performanslarıyla karşılaştırmak ve aralarında anlamlı ilişkiler kurarak değerlendirmek için performans deneyleri yapılmaktadır. Kaplamaların değerlendirilmesi genellikle düşük sıcaklık, orta sıcaklık ve yüksek sıcaklıkta gelişen problemlere yönelik olmaktadır. Daha çok düşük sıcaklıkta gelişen çatlama problemi dolaylı çekme mukavemeti testiyle, orta sıcaklıkta gözlemlenen yorulma problemi yorulma testleriyle, yüksek sıcaklıkta gelişen tekerlek izi problemi ise tekerlek izi testleri ve sünme testleriyle değerlendirilebilmektedir. Ayrıca, su hasarı problemi ise koşullama sistemleri ile uygulanan ve modifiye Lottman (AASHTO T 283) yöntemini de içeren testlerle irdelenebilmektedir. HWTT ise hem tekerlek izini hem de soyulma problemini değerlendiren eğrinin elde edildiği simülatif bir testtir. Bu çalışma kapsamında, dolaylı çekme mukavemeti testi, modifiye Lottman deneyi, tekrarlı yük sünme deneyi ve Hamburg tekerlek izi deneyi yapılmıştır. Hamburg tekerlek izi deneyi haricindeki testlerde koşullu örnekler kullanılmıştır. Bu cihaz kendi koşullama sistemini kendisi uygulamaktadır. Diğer testlerdeki koşullama sistemleri modifiye Lottman koşullamasında olduğu gibi yapılmıştır.

Bu bölümde önce koşullama sistemi kısaca anlatılmış, daha sonra da yapılan testlerde kullanılan parametreler açıklanmış ve test sonuçları sunulmuştur.

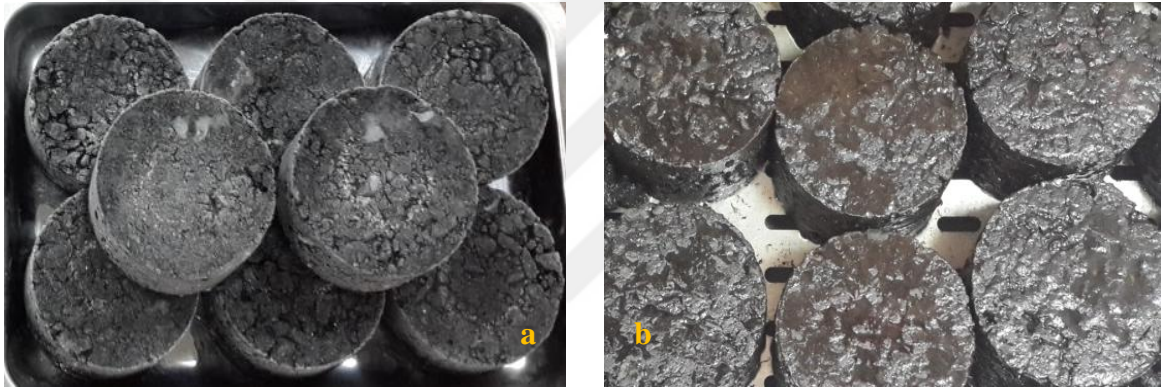
2.4.1. AASHTO T 283 Koşullama Sistemi

Sıcak karışım asfaltın nem hassasiyetini değerlendirmek için çeşitli laboratuvar testleri yapılmıştır. Laboratuvar testleri saha koşullarını tamamen simüle etmemektedir, buna rağmen AASHTO T 283 yöntemi bu anlamda yararlı bilgiler sağlamaktadır. Bu deney Lottman tarafından NCHRP projesi 4-08(3) kapsamında geliştirilmiştir. Sonraki çalışmalarla, D. G. Tunnicliff ve R. E. Root tarafından NCHRP projesi 10-17 kapsamında geliştirilmeye devam edilmiş ve AASHTO T 283 (Modifiye Lottman) yöntemi ortaya konmuştur. Bu yöntem karışımların su hasarına karşı direncini veya sıkıştırılmış HMA karışımların mukavemet kaybını değerlendirmektedir (Liang, 2008).

AASHTO T 283 prosedürü, Marshall sıkıştırma yöntemini kullanarak 6 tane sıcak karışım asfalt örneklerinin hazırlanmasını içerir. Bu test için kullanılan örnekler; koşulsuz ve koşullu olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Daha sonra numuneler vakumlu piknometre ile %55-80 oranında suya doygunluk derecesine ulaştırılmaktadır. Daha fazla doygunluğa ulaşan örnekler deforme olmuş sayılır ve sonraki testlerde kullanılmaz. Suyu doygun örnekler, suyun örnekten süzülmesini önlemek amacıyla streç film benzeri bir malzeme ile sarılarak -18°C'de 16 saat süre ile donma sürecine tabii tutulmaktadır. Donma sürecini tamamlayan örnekler bekletilmeden 60°C sıcaklıktaki su banyosuna yerleştirilir ve 24 saat boyunca bekletilir. Su banyosunda, örnekler tek sıra halinde dizilmeli, üst üste yerleştirilme yapılmamalıdır. Su seviyesi gözlemlenmeli, azalma varsa tamamlanmalıdır. Örneklerin deforme olmaması için, 24 saat sonunda su boşaltılmalı ve örnekler oda sıcaklığına kadar soğumadan kabinden alınmamalıdır. Bu işlemden sonra koşullama tamamlanmış olur. Koşullama sisteminin aşamaları Şekil 21'de ve koşullama sistemleri sırasında çekilmiş fotoğraflarda Şekil 22'de gösterilmiştir.



Şekil 21. AASHTO T 283 yönteminde koşullama aşamalarının gösterimi



Şekil 22. Donma döngüsü (a) ve sıcak suda bekletme döngüsü (b) uygulanmış örnekler

2.4.2. Modifiye Lottman (AASHTO T 283) Testi

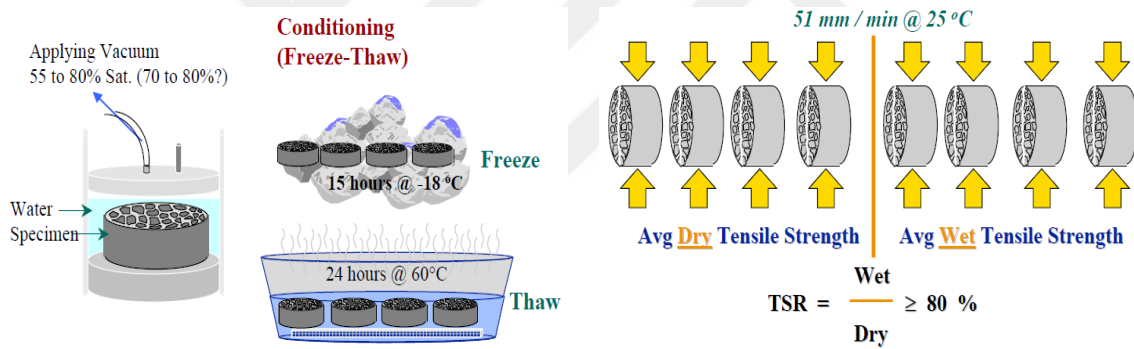
Bu yöntemde özdeş olarak üretilmiş altı Marshall briketi veya karot rastgele olarak üçerli iki gruba ayrılmaktadır. Birinci gruba, bölüm 2.4.1. de tasvir edildiği gibi AASHTO T 283 koşullaması uygulanmakta ve sonrasında 25°C sıcaklığa getirilmiş örnekler dolaylı çekme mukavemeti testi yapılmaktadır. İkinci gruptaki örneklere ise koşullama yapılmamaktadır. Bu örnekler 30 dakika 25°C sıcaklıktaki su havuzunda bekletilip dolaylı çekme mukavemeti testine tabi tutulmaktadır. Testten, briketin deney boyunca karşılayabileceği maksimum yük belirlenir. Örneklerin her birinin çekme mukavemeti değerleri Formül 1 ile hesaplanmaktadır.

$$ITS = \frac{2000 * P}{\pi t D} \quad (1)$$

Burada; ITS: Dolaylı çekme mukavemetini (kPa), P: Maksimum yükü (N), t: Örneğin testten önceki yüksekliğini (mm) ve D: Örneğin çapını (mm) ifade etmektedir. Birinci ve ikinci gruptaki örneklerin dolaylı çekme mukavemeti oranlarının ortalaması alınır ve Formül 2 yardımı ile dolaylı çekme mukavemeti oranları (ITSR) hesaplanır.

$$ITSR = \frac{\text{Koşullu örneklerin çekme mukavemeti ortalaması}}{\text{Koşulsuz örneklerin çekme mukavemeti ortalaması}} \quad (2)$$

ITSR değeri için genellikle 0.80 değeri eşik olarak kabul edilir. Bu değerden düşük olanlar su hasarına karşı dirençsiz, büyük oranlı karışımlar ise su hasarına karşı dirençli kabul edilmektedirler (Liang, 2008).



Şekil 23. AASHTO T 283 yöntemi ile su hasarının belirlenmesi (Solaimanian vd., 2003).

AASHTO T 283 yöntemini ifade eden şematik gösterim Şekil 23’de sunulmuştur. Çalışma kapsamında, taş mastik asfalt ve geleneksel asfalt betonu karışımları ile hazırlanan atık cam agregası içeren geleneksel ve modifiye bitümlü karışımlarla üretilmiş Marshall briketi kullanıldı. Koşulsuz örneklerin test sonuçlarının ortalama değerleri Tablo 20’de ve koşullu örneklerin test sonuçlarının ortalama değerleri ise Tablo 21’de verilmektedir.

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

Maksimum cam agregası boyutu	Taş Mastik Asfalt Karışım			Geleneksel Asfalt Betonu Karışım		
	UM (saf bitüm)	NC (nanokil mod.bitüm)	HL (sönmüş kireç mod.bitüm)	UM (saf bitüm)	NC (nanokil mod.bitüm)	HL (sönmüş kireç mod.bitüm)
0	820.053	880.582	811.143	1194.999	1323.104	1154.472
0.075mm	767.786	746.861	806.152	1307.040	1396.885	1498.060
2.00mm	886.901	915.196	868.886	1448.617	1325.503	1430.126
4.75mm	732.246	756.061	799.393	1186.448	1424.190	1475.476
9.5mm				1145.690	1046.460	1194.303

Tablo 21. Koşullu örneklerin ortalama dolaylı çekme mukavemeti değerleri (kPa)

Maksimum cam agregası boyutu	Taş Mastik Asfalt Karışım			Geleneksel Asfalt Betonu Karışım		
	UM (saf bitüm)	NC (nanokil mod.bitüm)	HL (sönmüş kireç mod.bitüm)	UM (saf bitüm)	NC (nanokil mod.bitüm)	HL (sönmüş kireç mod.bitüm)
0	726.866	1102.338	971.361	1028.257	1462.407	1253.305
0.075mm	362.571	647.858	211.750	1272.631	1461.996	1242.724
2.00mm	450.066	960.956	505.715	1125.647	1446.236	1314.201
4.75mm	82.318	693.580	252.440	911.286	1322.407	1335.183
9.5mm				211.581	864.028	861.841

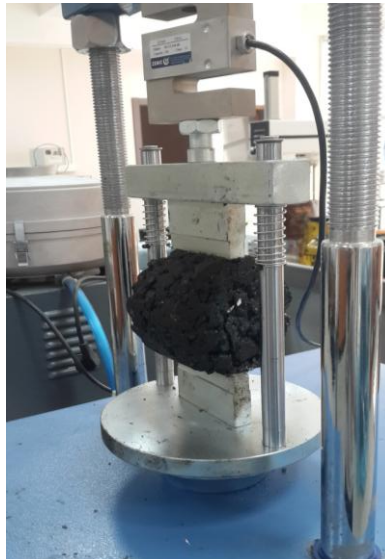
2.4.3. Dolaylı Çekme Mukavemeti Testi (ITST)

1990'ların ortalarında, AASHTO T322, Amerikan Karayolu Taşımacılığı Yetkilileri Birliği (AASHTO) tarafından, asfalt betonu karışımlarının dayanım ve sünme özelliklerini değerlendirmek için dolaylı çekme mukavemeti testi geliştirilmiştir. Dolaylı çekme dayanım değerleri, bitümlü karışımların göreceli kalitesini, laboratuvar karışım testleriyle birlikte değerlendirmek, koşullu ve koşulsuz örneklerde su hasar potansiyelini belirlemek için kullanılmaktadır. Bitümlü karışımın dolaylı çekme mukavemeti, silindir numunenin düşey çap düzlemi boyunca belirli bir deformasyon (50mm/dk) ve 25°C test sıcaklığında yüklenmesiyle yapılmaktadır. Düşük sıcaklıklarda karışımdaki asfaltın sünekliği düşmekte, çekme gerilmesine ulaşıncaya ve kopma meydana gelinceye kadar çekme dayanımı artmaktadır. Asfalt karışımların dolaylı çekme mukavemeti kullanımı ile ilgili olarak ele alınması gereken bir husus uygulanması gereken sıcaklıktır ki, 25°C sıcaklık çekme dayanımı ölçümü için uygun bulunmuştur (Vasconcelos vd., 2012).

Bu yöntem bitümlü karışımların ısı ve yorulma nedeniyle oluşan çekme gerilmelerini karakterize eder. Bunun için silindirik asfalt numunesine yüke dik doğrultuda; sabit bir deformasyon altında bozuluncaya kadar bir basınç yükü uygulanır. Deney aşamasında deformasyon, uygulanan yükte bir artışın olmadığı ya da en büyük yükün olduğu zaman olarak tanımlanır ve numunenin dayanabileceği en büyük yük dolaylı çekme mukavemeti olarak alınır. Bu deneyde, Marshall stabilitesi deney aleti ve dolaylı çekme gerilmesi deney (ASTM D4123) ekipmanları kullanılmaktadır (İlıcılı, 2001).

Deney sonucunda bulunan dolaylı çekme mukavemeti değeri ve bozulma deformasyonu, bitümlü karışımların yorulma çatlaklarının oluşma potansiyeli ve karışımın optimum bitüm içeriğinin belirlenmesinde kullanılır. Deneyde yatay ve düşey yönde oluşan yer değiştirmeler de saptanır. Deneyden elde edilen değerler karışımın sıcaklık, nem ve farklı dingil yükleri karşısında göstermiş olduğu davranış hakkında bilgi edinmek amacıyla da kullanılabilir (İlıcılı, 2001).

Bu deney kapsamında donma-çözülme ve suda bekletmeli döngü hasarına tabi tutulan örneklerden 3 adet alındı. Taş mastik asfalt karışım grubunda toplam 36, geleneksel asfalt betonu karışım grubunda toplam 45 briket kullanıldı. Koşullamaları yapılan örneklerin daha sonra içsel sıcaklığı 0°C'ye ulaşıncaya kadar dondurucuda bekletildi. Test cihazı olarak Marshall stabilite deney aleti ve dolaylı çekme gerilmesi deney (ASTM D4123) ekipmanları kullanıldı. Dolaylı çekme mukavemeti testine ait görüntü Şekil 24'de, karışımların test sonucuna ait dolaylı çekme mukavemeti değerleri Tablo 22'de verilmiştir.



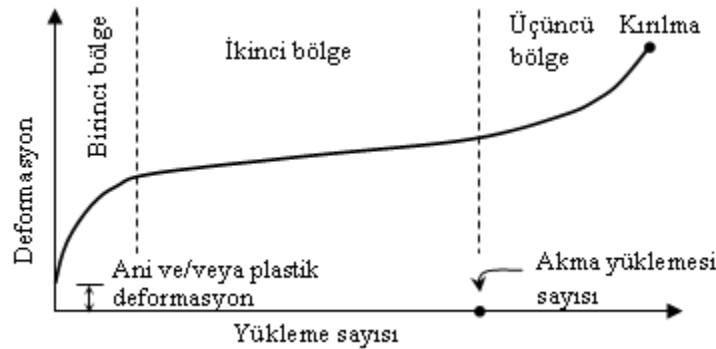
Şekil 24. Düşük sıcaklıkta örnekte meydana gelen çatlama

Tablo 22. Düşük sıcaklıkta örneklerin dolaylı çekme mukavemeti değerleri (kPa)

Maksimum cam agrega boyutu	Taş Mastik Asfalt Karışım			Geleneksel Asfalt Betonu Karışım		
	UM (saf bitüm)	NC (nanokil mod. bitüm)	HL (sönmüş kireç mod. bitüm)	UM (saf bitüm)	NC (nanokil mod. bitüm)	HL (sönmüş kireç mod. bitüm)
0	2805.688	2447.790	3052.032	2449.194	2815.845	3501.266
	3044.285	3404.600	2918.974	2424.156	2744.643	3847.112
	2715.180	3342.088	3228.821	2316.720	3319.629	2508.912
	580.5824	2424.592	638.5442	3300.721	2969.516	3247.808
0.075mm	400.3971	853.5483	693.1836	2115.374	3600.190	3840.035
	312.8028	650.6497	665.8638	3305.879	3416.101	3612.143
	2031.369	3055.935	902.4522	3565.745	3933.855	3356.825
2.00mm	749.3215	2157.706	1472.381	2869.152	3135.888	3643.083
	429.4974	2470.918	1416.648	2833.356	3641.449	2444.508
	594.0082	1737.084	885.6488	2626.543	2477.439	2777.980
4.75mm	418.9829	1683.733	931.3264	2721.787	3196.357	2908.197
		1966.742	1062.055	2647.664	3234.637	2891.898
9.5mm				1487.336	2021.933	1979.127
				711.0084	1805.947	2574.274
				1002.551	2485.487	1927.832

2.4.4. Tekrarlı Yük Sünme Testi (RCT)

Sünme testi (koşullu veya koşulsuz) sıcak asfalt karışımların tekerlek izi potansiyelini tahmin etmek için kullanılmaktadır. Dinamik ve statik sünme testi olarak iki şekilde yapılabilmektedir. RCT aksel gerilme ve yük vuruş sayısı arasında bir ilişki sağlamaktadır. Dinamik sünme testinin statik sünme testinden temel farkı hareketli trafik yükünü temsil etmesidir. Tekrarlı sünme testi; farklı sıcaklık, koşullu gerilmeler, yükleme gerilmesi, vuruş periyodu, test süresi ve vuruş sayısı gibi test koşullarında yapılabilmektedir (Aksoy ve İskender, 2008).



Şekil 25. Asfalt betonunun tekrarlı yük altında sünme davranışı

Şekil 25’de kümülatif kalıcı deformasyon ile yük tekrür sayısı arasındaki ilişki ifade edilmektedir. Test sonucunda yük tekrür sayısına karşılık gelen deformasyon miktarı belirlenerek grafiklenmektedir. Daha fazla deformasyon miktarı tekerlek izi direncine karşı daha dirençsiz karışım veya tekerlek izi potansiyeli daha yüksek karışım anlamına gelmektedir.

Kümülatif kalıcı deformasyon eğrisi genellikle birinci, ikinci ve üçüncü bölge olmak üzere üç bölge olarak ifade edilmektedir. Birinci bölgede kalıcı deformasyon hızlı bir şekilde birikmekte olup, yük kaldırılmazsa malzeme azalan oranda deforme olmaya devam eder. İkinci bölgede kalıcı deformasyondaki artış hızı sabittir. Deformasyon eğrisinin eğimi doğrusal (sabit) olup bu bölgedeki deformasyonlar geri dönüşümsüzdür. Üçüncü bölgede, kalıcı deformasyonun artış hızı tekrar artar ve kalıcı deformasyon hızla birikir. Üçüncül bölgenin başladığı yükleme sayısı, akma yükleme sayısı olarak ifade edilmektedir. Üçüncül bölgenin ilerlemesi sonucunda kırılma meydana gelmektedir (İskender, 2008).

Bu çalışma kapsamında EN-12697-25(A) test standardına uygun olarak koşullu ve koşulsuz asfalt briketlerine tekrarlı yük sünme deneyi yapıldı. Test parametreleri Tablo 23’de gösterilmiştir. Toplamda 81 örnek test edildi. Bu deneyde uygulanan koşullama da diğer testlerde olduğu gibi AASHTO T 283 metoduna göre yapıldı. 4 inç (100mm) çaplı Marshall briketleri kullanıldı. Briketlerin içsel sıcaklığının da test sıcaklığı olan 40°C’ye ulaşması için 24 saat önceden briket asfalt test cihazına yerleştirildi. Deneyde kullanılan cihaz Şekil 26’da verilmiştir.

Tablo 23. 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	24000



Şekil 26. Üniversal asfalt deney cihazı (NAT)

Koşulsuz geleneksel asfalt betonu ve taş mastik asfalt briketlerinin test sonuçlarının ortalaması Tablo 24 ve Tablo 25’de ve koşullu örneklerin test sonuçlarının ortalaması da Tablo 26 ve Tablo 27’de verilmiştir.

Tabloda karışım türlerini ifade etmek için kodlama kullanılmıştır. Her bir kod ismi üç terimden oluşmaktadır. Birinci terim karışımın türünü, ikinci terim kullanılan maksimum cam agregası boyutunu ve son terim de kullanılan bağlayıcı türünü ifade etmektedir. Bu terimler: GAB: geleneksel asfalt betonu; TMA: taş mastik asfalt; A: cam agregası içermeyen; B: 0.075mm maksimum cam agregası boyutu; C: 2.00mm maksimum cam agregası boyutu; D: 4.75mm maksimum cam agregası boyutu; E: 9.5mm maksimum cam agregası boyutu; UM: geleneksel bitüm; NC: nanokil modifiye; HL: sönmüş kireç modifiye olarak belirlenmiştir. Örneğin; GAB A-UM kod ismi geleneksel bitüm ile hazırlanmış cam agregası içermeyen geleneksel asfalt betonu karışımını temsil etmektedir.

Tablo 24. Koşulsuz geleneksel asfalt betonu karışımların ortalama deformasyon değerleri

Yük tekrerrür sayısı	GAB A-UM	GAB A-HL	GAB A-NC	GAB B-UM	GAB B-HL	GAB B-NC	GAB C-UM	GAB C-HL	GAB C-NC	GAB D-UM	GAB D-HL	GAB D-NC	GAB E-UM	GAB E-HL	GAB E-NC
2	0.46	0.49	0.23	0.40	0.27	0.36	0.66	0.64	0.46	0.35	0.66	0.52	0.41	0.34	0.60
100	0.61	0.61	0.30	0.49	0.36	0.46	0.83	0.85	0.59	0.45	0.78	0.63	0.53	0.47	0.76
500	0.70	0.68	0.33	0.55	0.41	0.50	0.93	0.94	0.65	0.50	0.84	0.68	0.59	0.54	0.83
1000	0.73	0.71	0.35	0.57	0.43	0.52	0.96	0.96	0.68	0.53	0.86	0.70	0.62	0.56	0.86
2000	0.76	0.74	0.36	0.59	0.45	0.54	0.99	0.99	0.70	0.56	0.89	0.71	0.66	0.59	0.89
5000	0.80	0.77	0.38	0.63	0.48	0.56	1.02	1.00	0.72	0.61	0.92	0.74	0.71	0.64	0.93
6500	0.81	0.78	0.39	0.64	0.48	0.57	1.03	1.01	0.73	0.63	0.92	0.75	0.73	0.65	0.93
11000	0.84	0.81	0.40	0.66	0.50	0.58	1.05	1.02	0.74	0.68	0.94	0.76	0.78	0.68	0.95
15000	0.85	0.83	0.41	0.67	0.51	0.59	1.06	1.03	0.75	0.72	0.96	0.78	0.82	0.71	0.96
20000	0.87	0.85	0.41	0.69	0.52	0.60	1.07	1.03	0.75	0.76	0.97	0.79	0.87	0.74	0.98
20500	0.87	0.85	0.41	0.69	0.52	0.60	1.07	1.04	0.76	0.77	0.97	0.79	0.88	0.74	0.98
22000	0.88	0.85	0.42	0.69	0.52	0.60	1.07	1.04	0.76	0.78	0.98	0.79	0.89	0.75	0.98
24000	0.88	0.86	0.42	0.70	0.52	0.60	1.08	1.04	0.76	0.80	0.98	0.79	0.92	0.76	0.98

Tablo 25. Koşulsuz taş mastik asfalt karışımların ortalama deformasyon değerleri

Yük tekrerrür sayısı	TMA A-UM	TMA A-HL	TMA A-NC	TMA B-UM	TMA B-HL	TMA B-NC	TMA C-UM	TMA C-HL	TMA C-NC	TMA D-UM	TMA D-HL	TMA D-NC
2	0.79	0.25	0.32	0.34	0.28	0.30	0.43	0.22	0.27	0.62	0.32	0.45
100	0.91	0.37	0.46	0.48	0.40	0.43	0.64	0.36	0.44	0.89	0.47	0.60
500	0.97	0.44	0.53	0.58	0.47	0.51	0.75	0.44	0.53	1.09	0.60	0.71
1000	1.00	0.47	0.57	0.64	0.51	0.55	0.80	0.48	0.57	1.21	0.71	0.78
2000	1.04	0.51	0.61	0.72	0.56	0.61	0.85	0.53	0.62	1.40	0.88	0.88
5000	1.10	0.57	0.67	0.87	0.65	0.72	0.94	0.61	0.70	1.94	1.47	1.12
6500	1.13	0.60	0.68	0.94	0.69	0.77	0.97	0.64	0.73		1.96	1.25
11000	1.18	0.65	0.73	1.16	0.79	0.92	1.05	0.72	0.81			1.92
15000	1.22	0.70	0.76	1.42	0.87	1.06	1.12	0.79	0.86			
20000	1.27	0.75	0.79	1.90	0.97	1.25	1.21	0.88	0.94			
20500	1.28	0.76	0.80	1.97	0.98	1.28	1.22	0.89	0.94			
22000	1.29	0.78	0.81		1.01	1.35	1.25	0.91	0.96			
24000	1.31	0.80	0.82		1.06	1.45	1.30	0.95	0.99			

Tablo 26. Koşullu geleneksel asfalt betonu karışımların ortalama deformasyon değerleri

Yük tekrerrür sayısı	GAB A-UM	GAB A-HL	GAB A-NC	GAB B-UM	GAB B-HL	GAB B-NC	GAB C-UM	GAB C-HL	GAB C-NC	GAB D-UM	GAB D-HL	GAB D-NC	GAB E-UM	GAB E-HL	GAB E-NC
2	0.77	0.50	0.53	0.51	0.52	0.42	0.49	0.50	0.37	0.63	0.35	0.46	0.68	0.85	0.52
100	0.90	0.63	0.65	0.63	0.68	0.54	0.62	0.66	0.50	0.80	0.51	0.62	0.87	1.10	0.68
500	0.97	0.71	0.71	0.70	0.77	0.61	0.70	0.73	0.57	0.89	0.60	0.70	1.03	1.22	0.78
1000	1.00	0.74	0.73	0.73	0.80	0.64	0.73	0.77	0.60	0.92	0.64	0.73	1.18	1.27	0.82
2000	1.03	0.78	0.75	0.75	0.83	0.67	0.75	0.80	0.62	0.95	0.67	0.77		1.33	0.87
5000	1.07	0.82	0.78	0.78	0.86	0.70	0.78	0.84	0.65	1.00	0.72	0.82		1.44	0.95
6500	1.09	0.84	0.78	0.79	0.87	0.71	0.79	0.85	0.66	1.01	0.73	0.84		1.50	0.98
11000	1.12	0.86	0.80	0.81	0.89	0.72	0.81	0.88	0.68	1.04	0.76	0.88		1.92	1.05
13500	1.13	0.88	0.80	0.81	0.89	0.73	0.81	0.89	0.68	1.05	0.77	0.90		3.55	1.09
17000	1.14	0.89	0.81	0.82	0.90	0.74	0.82	0.90	0.69	1.07	0.79	0.93			1.15
20500	1.15	0.90	0.82	0.82	0.91	0.74	0.83	0.92	0.70	1.08	0.80	0.96			1.22
22000	1.16	0.91	0.82	0.83	0.91	0.75	0.83	0.92	0.70	1.08	0.81	0.97			1.25
24000	1.17	0.91	0.82	0.83	0.91	0.75	0.83	0.93	0.71	1.09	0.81	0.99			1.30

Tablo 27. Koşullu taş mastik asfalt karışımların ortalama deformasyon değerleri

Yük tekrerrür sayısı	TMA A-UM	TMA A-HL	TMA A-NC	TMA B-UM	TMA B-HL	TMA B-NC	TMA C-UM	TMA C-HL	TMA C-NC	TMA D-UM	TMA D-HL	TMA D-NC
2	0.47	0.57	0.35	0.85	0.51	0.45	0.64	0.71	0.30	0.92	0.81	0.39
100	0.64	0.72	0.49	1.24	0.72	0.59	0.97	0.94	0.44	2.07	1.45	0.58
300	0.71	0.79	0.55	1.55	0.82	0.66	1.11	1.05	0.49	3.23	2.01	0.67
500	0.75	0.81	0.58	1.77	0.88	0.69	1.18	1.10	0.51		2.53	0.71
1000	0.82	0.86	0.61	2.24	0.98	0.74	1.31	1.20	0.55		3.83	0.79
2000	0.91	0.90	0.65	3.44	1.10	0.80	1.52	1.35	0.58			0.89
5000	1.10	0.97	0.71		1.54	0.91	2.49	1.83	0.63			1.11
6500	1.20	0.99	0.73		1.96	0.95	2.89	2.22	0.64			1.21
11000	1.54	1.05	0.78			1.06			0.68			1.56
15000	2.12	1.10	0.82			1.16			0.70			1.98
20000		1.15	0.86			1.29			0.73			2.86
22000		1.17	0.87			1.34			0.74			3.42
24000		1.20	0.89			1.40			0.75			4.25

2.4.5. Hamburg Tekerlek İzi Deneyi (HWTT)

Hamburg tekerlek izi deney aleti 1970 yılında, Almanya'nın Hamburg şehrinde ESSO tarafından, kauçuk bir lastiğe sahip olan İngiliz aletine dayalı olarak geliştirilmiş ve

orijinal olarak 'ESSO tekerlek izi deney aleti' olarak bilinmektedir. Bu tekerlek izi deney aleti; suya daldırılmış olan asfalt beton örneği üzerinde, bir yandan bir yana çelik bir silindirik tekerleğin geçişiyle, tekerlek izinde oturma ve su hasarı problemlerinin etkilerini ölçmektedir. Sıcak karışım asfaltın tekerlek izi duyarlılığını ölçmek için kullanılmıştır. 40°C veya 50°C sıcaklıkta hazırlanan örnek, 9540 tekerlek geçişiyle birlikte uygulanmış ve oluşan tekerlek izi derinliği geçti/kaldı ölçütü kullanılarak karışım performansı değerlendirilmiştir (City of Hamburg, 1991).

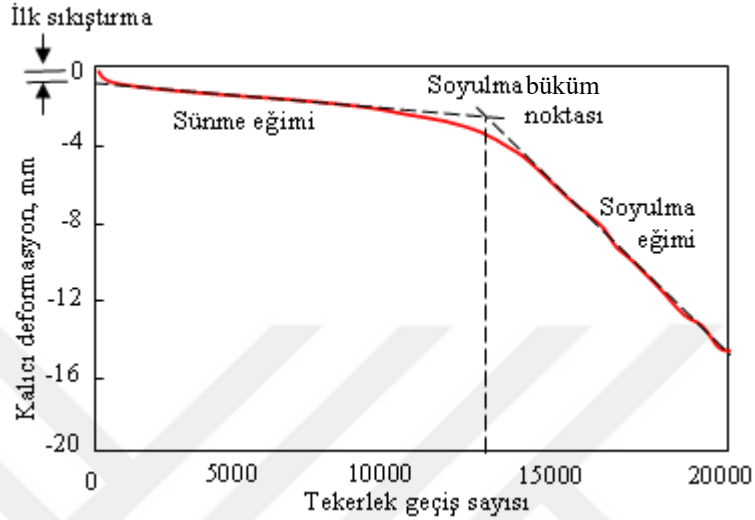
Daha sonra Helmut-Wind tarafından Hamburg'ta üretilen bu test cihazı, çevresel hava kabının yerine su, istenilen sıcaklık düzeyinin elde edilmesi için kullanılmıştır. Hamburg Şehri sonra, tekerlek geçiş sayısını 19200 değerine artırmış ancak, bazı karışımların su hasarından dolayı bozulmaya başladığı tespit edilmiştir. Genellikle, su hasarının etkilerini gösterebilmek için, 10000 tekerlek geçişinden daha büyük geçişlere gereksinim duyulmaktadır (Aschenbrener, 1995).

320mm uzunluğunda, 260mm genişliğinde ve 40-80-120mm kalınlıklarında olan cihazda, aynı anda iki asfalt briket örnekleri test edilebilmektedir. 150 mm asfalt briket kalınlığına sahip örneklerde test yapılabilmektedir. 250 mm minimum çapa sahip olan kaplama karotlarını da test edebilmektedir. Briketlerin yüklenmesi, 203.5 mm çapında ve 47 mm genişliğinde bir çelik tekerleğin dakika başına 50 geçiş oranında 705±22 N sabit bir yük uygulanmasıyla gerçekleştirilmektedir. Laboratuarda hazırlanan örneklerin, istenilen hava boşluğu düzeyi, Hamburg Şehri süreci tarafından verilmemektedir. Turner-Fairbank Karayolu Araştırma Merkezi'nde Federal Karayolu İdaresi, yoğun gradasyonlu sıcak karışım asfaltlar için %7±1 hava boşluk düzeyini, taş mastik asfalt için ise %5.5±0.5 değerini ölçü almaktadır (Aschenbrener, 1995).

Amerika'da uygulanan tekerlek izi geçiş sayısı, 100000 tekerlek geçişi uygulanabilmesine rağmen 20000'dir. Colorado Ulaşım Bölümü (CDOT); yoğun gradasyonlu sıcak karışım asfaltlarda, su hasarı ve test sonuçları arasındaki korelasyona dayalı olarak, 10000 tekerlek geçişinde maksimum izin verilebilen tekerlek izi derinliğini 4mm ve 20000 tekerlek geçişinde ise 10mm olarak önermektedir. Hamburg şehri, maksimum izin verilebilen tekerlek izi derinliğini 19200 tekerlek geçişinde, 4mm olarak sınırlamaktadır (Aschenbrener vd., 1994).

Test sıcaklığı yapılan deney sonuçlarını anlamlı bir şekilde ortaya koymak için büyük önem arz etmektedir. Farklı sıcaklıklarda suya batırılan örneklere yapılan tekerlek izi test sonuçlarına göre test sıcaklığının 70°C veya 60°C olması durumunda numunelerin

sertliğinin düşmesinden dolayı örneklerde dağılma meydana gelmiştir. Sıcaklığın düşük olması durumunda ise beklenen etki elde edilememiştir. Bu yüzden yapılan çalışmada test sıcaklığı 45°C olarak belirlenmiştir (Wu vd., 2003).



Şekil 27. Şematik Hamburg tekerlek izi test eğrisi

Şekil 27’de Hamburg tekerlek izi deneyine ait şematik bir eğri verilmiştir. Sünme eğimi, tekerlek izi duyarlılığını ölçmek için kullanılır. Sünme eğimi, ilk sıkıştırmadan sonra ve soyulmadan önce (eğer soyulma var ise), deformasyon eğrisinin lineer bölgesinin içinde deformasyon oranının tersidir. Soyulma eğimi, soyulma başlangıcından sonra, deformasyon eğrisinin lineer bölgesinin içinde deformasyon oranının tersidir. Soyulma büküm noktası (soyulma infleksiyon noktası) sünme eğimi ve soyulma eğiminin kesiştiği noktadaki tekerlek geçiş sayısıdır. Bu değer, HMA briketlerinin hasara neden olan suya karşı nispi direncini tahmin etmede kullanılmaktadır (Cooley vd., 2000).

Soyulma infleksiyon noktası ve soyulma eğimi (şevi) su hasarını ölçmek için kullanılmaktadır. Soyulma infleksiyon noktası; sünme eğimi ve soyulma şevinin arakesitinde, tekerlek geçiş sayısı olmaktadır. Bu da, su hasarının performansı etkilemeye başladığı tekerlek geçiş sayısı olmaktadır. CDOT; 10.000 tekerlek geçişinin altında, bir infleksiyon noktasının, su hasarını işaret etmekte olduğunu vurgular (Aschenbrener vd., 1994).

Çalışma kapsamında Hamburg tekerlek izi deneyi AASHTO TP 324 standardına göre yapıldı. 6 inç (150mm) çapındaki örnekler yoğurmalı pres (gyratory compactor) ile

sıkıştırıldı. Hamburg tekerlek izi kalıbına yerleştirilmesi için, örneklerin kenarları, asfalt testeresi ile zarar verilmeden, düzgün yüzeyli olarak kesildi. Deney standardında ikili karot (double core) olarak tanımlanan süreçte testler gerçekleştirildi. Diğer test parametreleri Tablo 28’de verildiği şekilde seçildi ve su dolu kabin içerisinde deneyler yapıldı. Farklı maksimum agrega boyutu içeriklerindeki karışımlar Hamburg deneyi ile değerlendirildi.

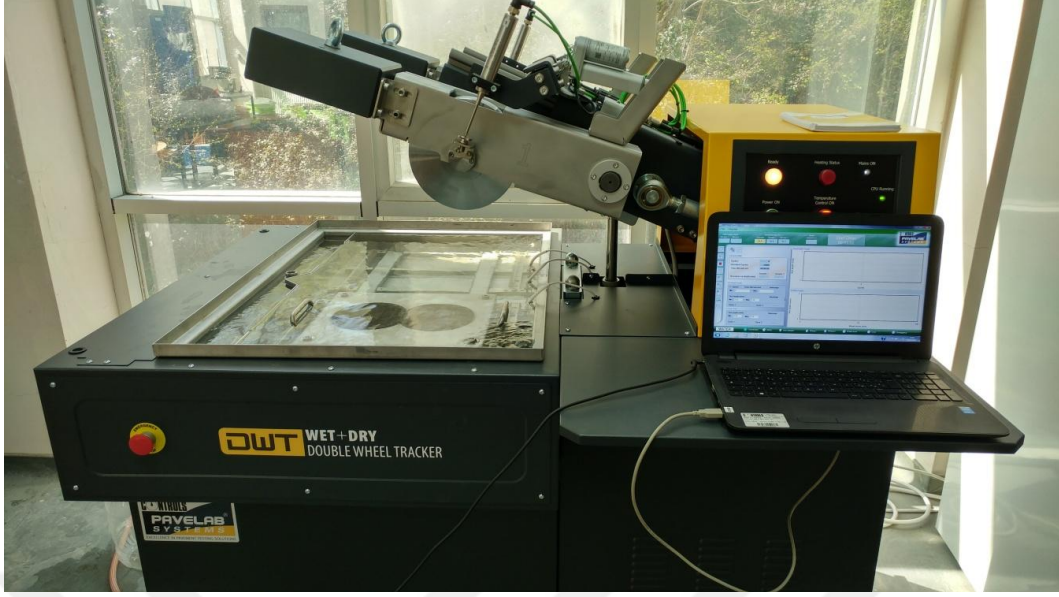
Tablo 28. Hamburg tekerlek izi deneyinde uygulanan parametreler

Deney ölçütü	Değer
Deney sıcaklığı (°C)	40
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

Hamburg test cihazı için kenarları kesilerek hazırlanan karot örneği Şekil 28’de ve kullanılan test cihazı Şekil 29’da verilmektedir.



Şekil 28. Kenarları kesilerek HWT cihazı kalıbına yerleştirilen 150mm çaplı ikili örnek



Şekil 29. Hamburg tekerlek izi deney cihazı

Hamburg tekerlek izi deneyine ait sonuçlar geleneksel asfalt betonu karışımı için Tablo 29’da, taş mastik asfalt karışımı için Tablo 30’da özetlenmiştir.

Tablo 29. Geleneksel asfalt betonu karışımların ortalama tekerlek izi derinlikleri (mm)

Tekerlek geçiş döngüsü	GAB B-UM	GAB B-NC	GAB B-HL	GAB C-UM	GAB C-NC	GAB C-HL	GAB D-UM	GAB D-NC	GAB D-HL
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0.25	0.21	0.09	0.25	0.21	0.18	0.35	0.21	0.35
100	0.98	1.20	1.13	1.39	1.06	1.06	0.91	0.68	1.06
500	2.20	1.80	1.90	2.51	2.38	2.01	2.25	1.15	2.05
1000	2.70	2.09	2.12	3.22	3.14	2.75	3.01	1.60	2.47
2000	3.30	2.36	2.50	4.15	3.86	3.59	3.45	2.03	2.95
3000	3.80	2.60	2.70	4.81	4.37	4.14	3.78	2.30	3.30
4000	4.30	2.80	2.90	5.44	4.78	4.67	4.19	2.54	3.66
6000	5.00	3.20	3.30	6.40	5.36	5.29	5.36	3.19	4.40
8000	5.74	3.70	3.90	7.56	5.76	5.51	6.22	4.09	5.04
10000	6.25	4.10	4.20	8.47	5.97	5.82	7.54	4.91	6.00
12000	6.90	4.60	4.70	9.31	6.30	6.28	10.27	6.04	7.35
14000	7.60	5.15	5.10	10.42	6.86	6.86	13.91	8.16	8.66
16000	8.50	5.80	5.90	12.45	7.61	8.23	16.93	11.28	10.99
18000	10.00	6.50	6.45	14.66	9.47	10.15	20.15	14.55	12.30
20000	12.00	7.54	7.26	17.15	12.00	12.46		19.23	13.79

Tablo 30. Taş mastik asfalt karışımların ortalama tekerlek izi derinlikleri (mm)

Tekerlek geçiş döngüsü	TMA B-UM	TMA B-NC	TMA B-HL	TMA C-UM	TMA C-NC	TMA C-HL	TMA D-HL	TMA D-NC	TMA D-UM
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0.14	0.24	0.09	0.18	0.16	0.18	0.41	0.41	0.56
100	0.85	1.10	0.90	1.03	0.94	1.16	1.58	0.95	1.94
500	2.01	1.70	1.50	2.11	1.88	1.64	2.90	2.21	3.14
1000	2.80	2.20	2.30	2.97	2.86	2.45	3.81	2.72	3.79
2000	3.70	2.50	2.90	3.88	3.91	3.38	4.14	3.67	4.55
3000	4.20	2.70	3.10	4.51	4.26	3.77	4.81	4.30	4.98
4000	4.60	3.00	3.30	4.99	4.64	4.11	5.00	4.75	5.24
6000	5.10	3.40	3.50	6.07	4.95	4.32	6.35	5.52	6.33
8000	5.60	3.80	3.60	6.88	5.23	4.75	7.28	6.02	7.64
10000	6.00	4.20	4.00	7.65	5.57	5.13	8.37	6.57	9.97
12000	6.50	4.60	4.30	8.52	5.98	5.86	9.28	7.12	13.05
14000	7.10	5.00	4.70	10.00	7.11	6.63	10.14	7.71	16.18
16000	8.00	5.50	5.10	11.71	8.03	7.81	11.02	8.63	19.02
18000	9.00	6.00	5.60	14.01	9.54	9.47	11.69	11.75	
20000	10.12	6.56	6.17	16.31	12.13	12.10	13.42	14.47	

3. BULGULAR VE İRDELEME

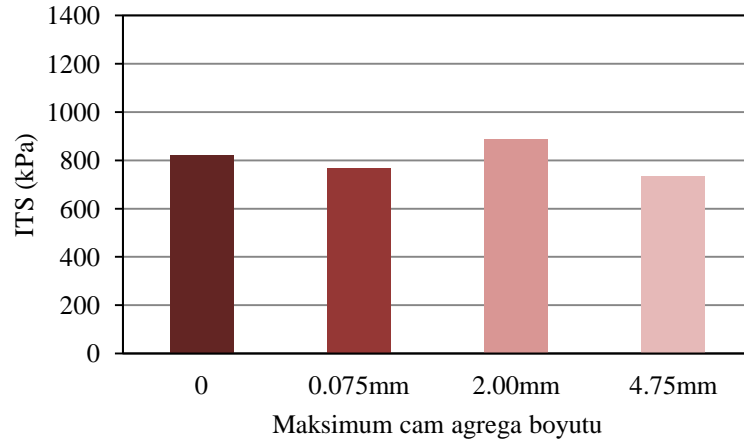
3.1. Giriş

Bu bölümde, deney sonuçlarının düşük sıcaklık çatlama, soyulma ve tekerlek izi yorumlaması için gerekli şekillerin sunulması, karışımların performanslarının değerlendirilmesi, cam agrega oranlarının ve maksimum boyutlarının değerlendirilmesi, test sonuçlarının karşılaştırılması amacıyla yapılan çalışmalardan elde edilen veriler işlenmiş ve yorumlanması daha kolay olan tablo ve grafiklere dönüştürülmüştür. Bu bölümde irdelenen temel problemler ayrı başlıklar altında değerlendirilmiş ve literatürle karşılaştırılmıştır.

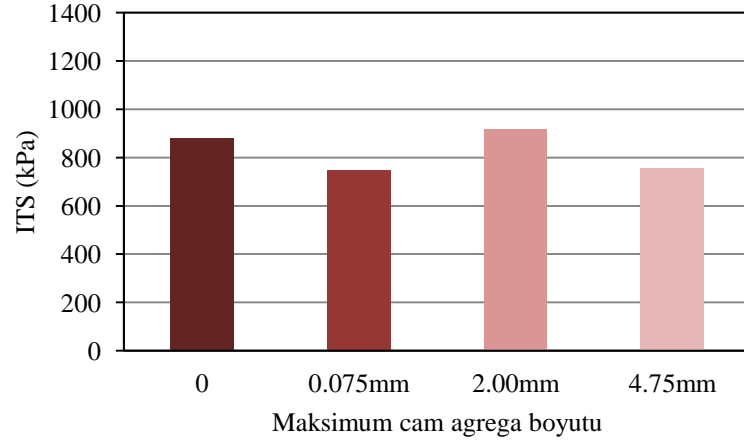
3.2. Modifiye Lottman (AASHTO T 283) Testine Ait Bulgular ve İrdeleme

Modifiye Lottman testi geleneksel asfalt betonu ve taş mastik asfalt karışımların su hasarına karşı dirençlerini belirlemek için kullanıldı. Her karışım türünde, koşullu ve koşulsuz özdeş örneklere dolaylı çekme mukavemeti yapıldı. Her bir seçenek için üç örnek kullanıldı ve üç örnekten elde edilen değerlerin ortalaması esas alındı. Üç özdeş briketin ortalaması alınıp, maksimum cam agrega boyutuna bağlı olarak, koşulsuz taş mastik asfalt karışımların dolaylı çekme mukavemeti değerleri Şekil 30 – Şekil 32’de sunulmuştur. Geleneksel asfalt betonu karışımları için ise koşulsuz dolaylı çekme mukavemeti değerleri Şekil 33 – Şekil 35’de gösterilmiştir.

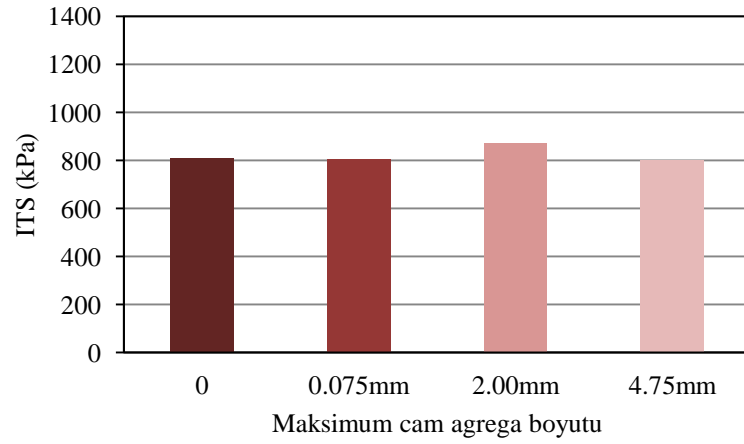
Şekil 30 – Şekil 32’den görüldüğü üzere, cam agrega ilaveli taş mastik asfalt karışımların çekme mukavemeti değerlerinde önemli düzeyde düşüşler görülmemiştir. Bununla birlikte, cam agrega maksimum boyutunun artmasıyla çok az da olsa dolaylı çekme mukavemetinde düşüş eğilimi olduğu görülmüştür. Bu durum geleneksel bağlayıcılı ve hem nanokil modifiye hem de sönmüş kireç modifiye karışımlar için benzerdir. Fakat 2.00mm maksimum cam agrega boyutunun kullanıldığı karışımlarda durum daha farklıdır. Bu karışımlarda dolaylı çekme mukavemetleri cam agrega kullanılmayan karışımlara göre daha yüksek çıkmıştır.



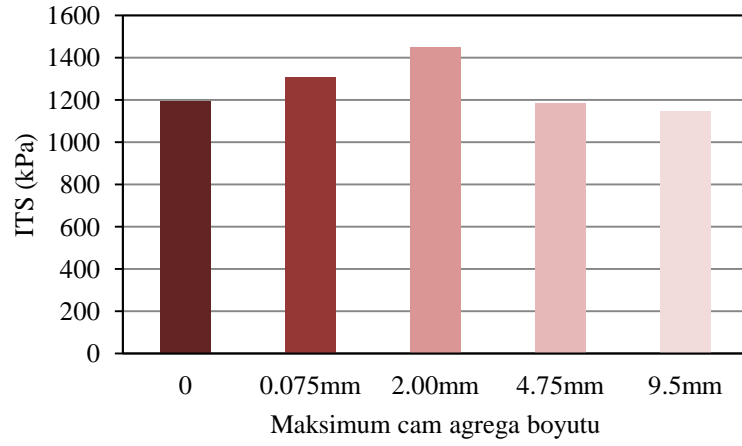
Şekil 30. Geleneksel bağlayıcı TMA karışımların koşulsuz ITS değerleri



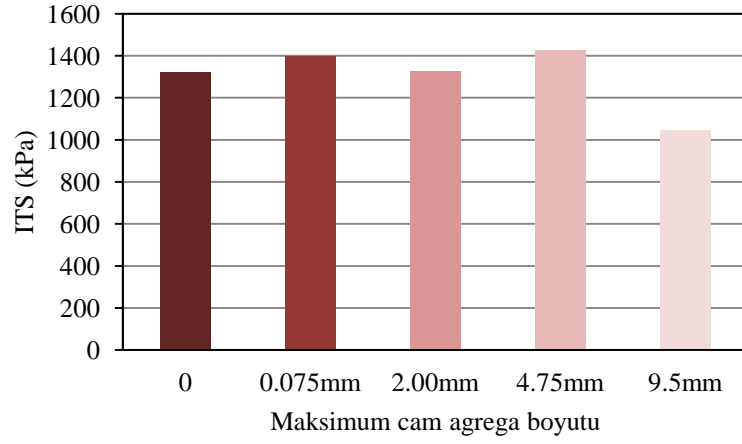
Şekil 31. Nanokil modifiye TMA karışımların koşulsuz ITS değerleri



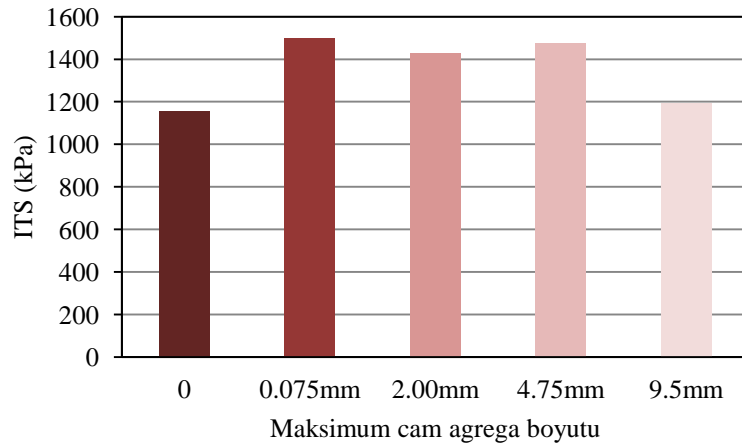
Şekil 32. Sönmüş kireç modifiye TMA karışımların koşulsuz ITS değerleri



Şekil 33. Geleneksel bağlayıcılı GAB karışımların koşulsuz ITS değerleri



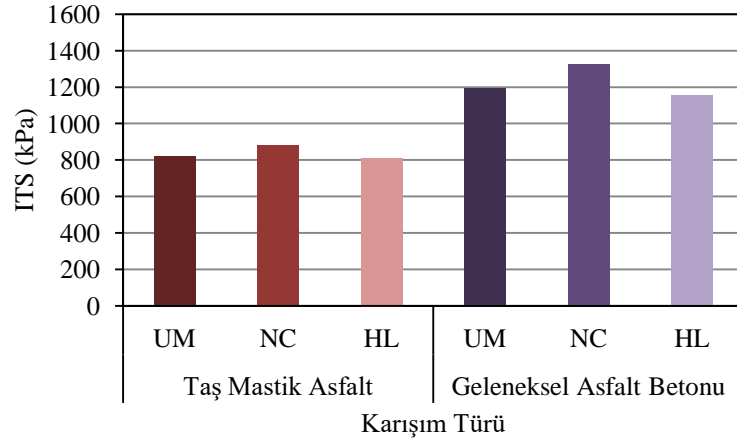
Şekil 34. Nanokil modifiye GAB karışımların koşulsuz ITS değerleri



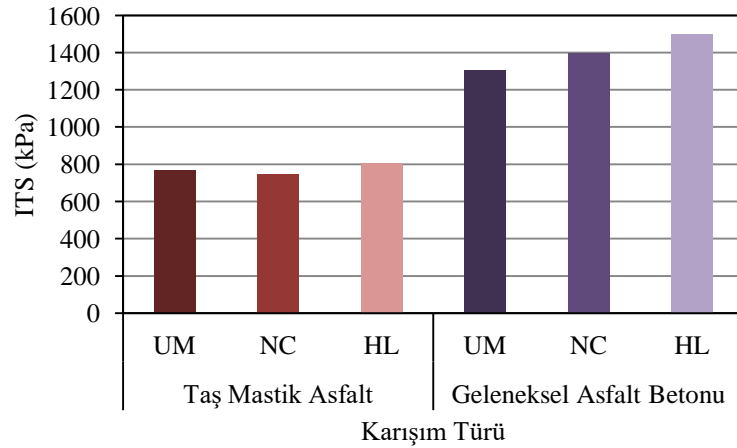
Şekil 35. Sönmüş kireç modifiye GAB karışımların koşulsuz ITS değerleri

Şekil 33 – Şekil 35’den görüldüğü üzere, geleneksel asfalt betonu karışımların koşulsuz seçenekleri için yapılan dolaylı çekme mukavemeti testlerine göre, cam agregası boyutunun artmasıyla önce çekme mukavemetlerinde bir artış ardından da azalma gözlenmiştir. Daha küçük maksimum agregası boyutlarında (0.075mm; 2.00mm ve 4.75mm) gerek geleneksel ve gerekse modifiye bağlayıcı olsun, dayanımlar cam agregasız karışımlarinkine yakın veya daha yüksek seviyede gerçekleşmiştir.

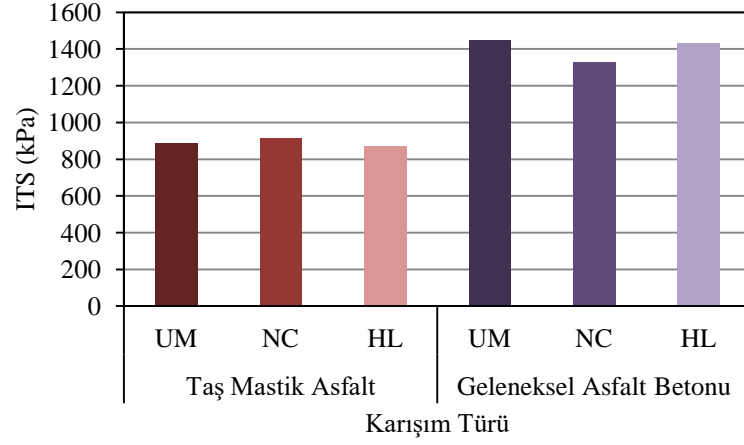
Dolaylı çekme mukavemeti değerlerinin karışım türüne bağlı olarak değerlendirilmesi amacıyla Şekil 36 – Şekil 40 hazırlanmıştır. Şekil 40’da, taş mastik asfalt karışımları için KGM KTŞ’ne göre kaba agreganın bazalt gibi dayanıklı agregalar olması gerektiğinden 9.5mm cam agregası boyutu kullanılmamıştır.



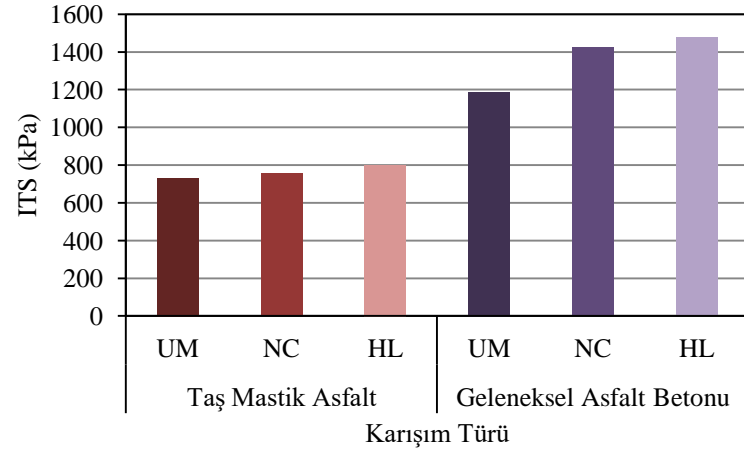
Şekil 36. Cam agregası içermeyen koşulsuz asfalt karışımlarının ITS değerleri



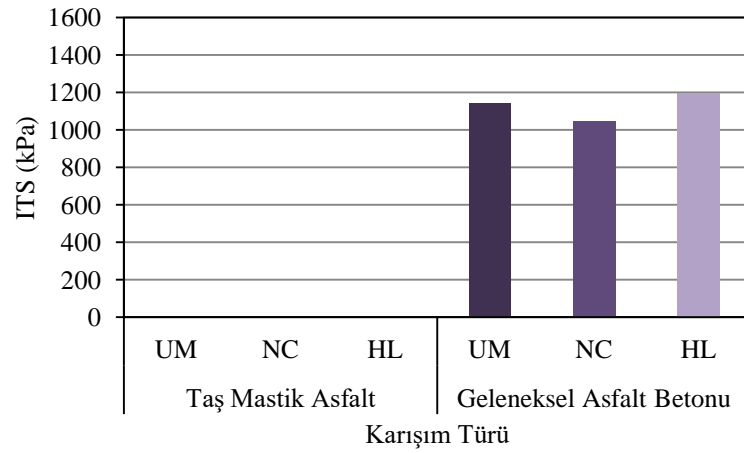
Şekil 37. 0.075mm maksimum boyutlu cam agregası içeren koşulsuz asfalt karışımlarının ITS değerleri



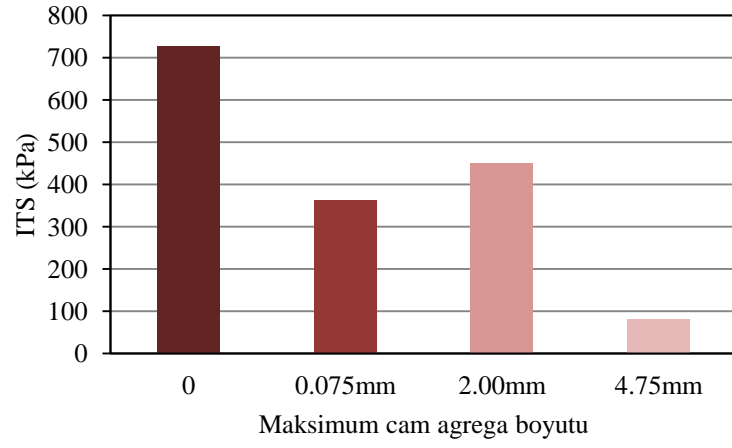
Şekil 38. 2.00mm maksimum boyutlu cam agrega içeren koşulsuz asfalt karışımların ITS değerleri



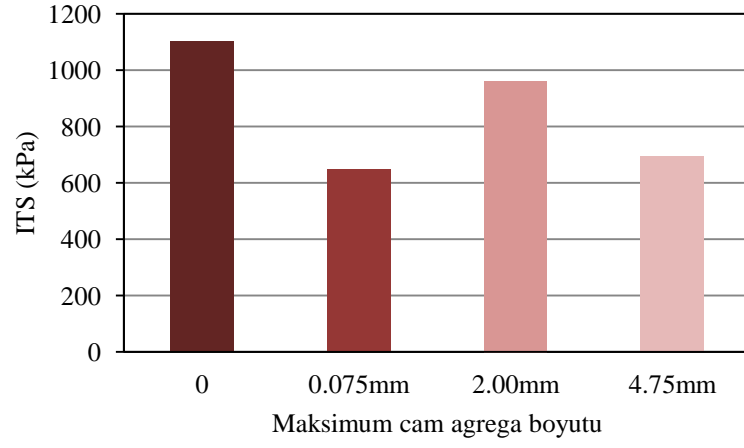
Şekil 39. 4.75mm maksimum boyutlu cam agrega içeren koşulsuz asfalt karışımların ITS değerleri



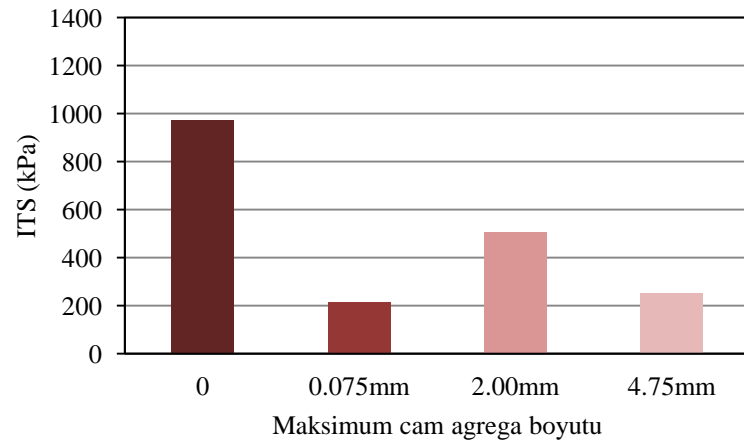
Şekil 40. 9.5mm maksimum boyutlu cam agrega içeren koşulsuz asfalt karışımların ITS değerleri



Şekil 41. Geleneksel bağlayıcılı TMA karışımların koşullu ITS değerleri



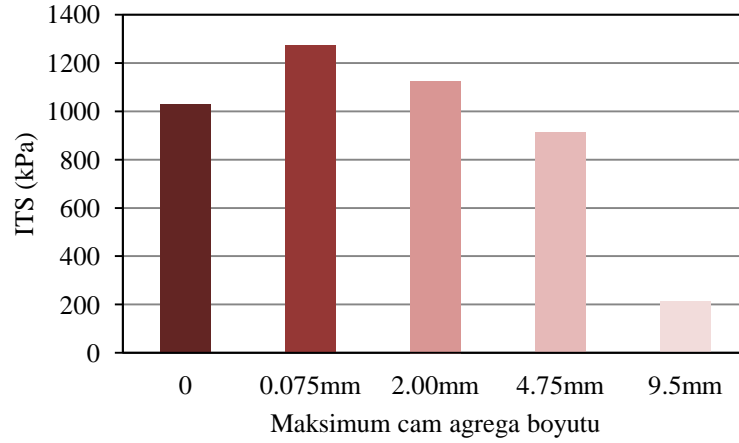
Şekil 42. Nanokil modifiye TMA karışımların koşullu ITS değerleri



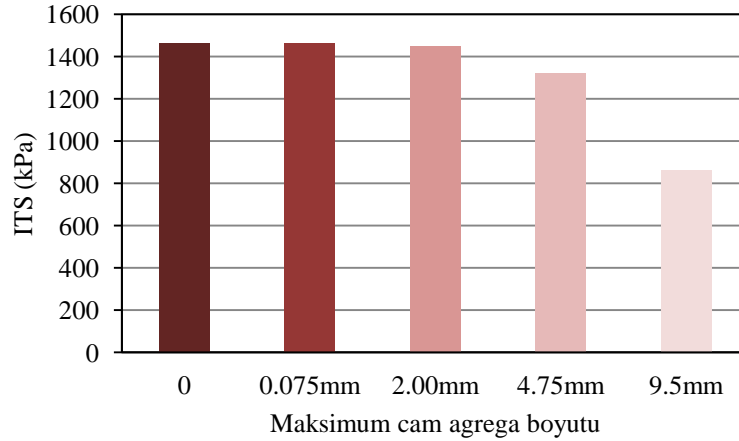
Şekil 43. Sönmüş kireç modifiye TMA karışımların koşullu ITS değerleri

Şekil 36 – Şekil 39’den görüldüğü gibi, taş mastik asfalt karışımların dolaylı çekme mukavemetleri geleneksel asfalt betonuna göre daha düşük çıkmıştır. Bağlayıcının modifiye edilmesi ile çekme mukavemetlerinde genelde bir artış olmuştur.

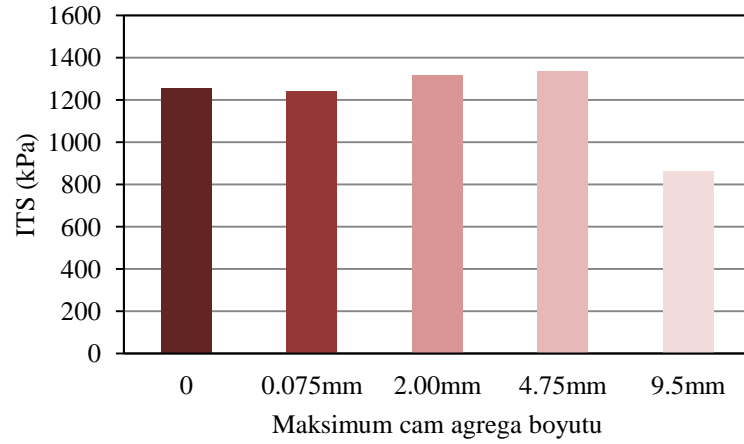
Şekil 41 – Şekil 43’den görüldüğü üzere, cam agrega ilaveli taş mastik asfalt karışımların koşullu çekme mukavemeti değerlerinde düşüşler görülmüştür. 2.00mm maksimum cam agrega boyutunun kullanıldığı nanokil modifiye karışım, 0.075mm ve 4.75mm boyutlarında cam agrega içeren geleneksel bağlayıcılı ve sönmüş kireç modifiye karışımlara göre daha fazla dolaylı çekme mukavemeti ortaya koymuştur. Bununla birlikte, cam agrega maksimum boyutunun artmasıyla dolaylı çekme mukavemetinde bir artış görülürken, 4.75mm maksimum cam agrega boyutunda farklı olarak azalma meydana gelmiştir. Bu durum geleneksel bağlayıcılı, nanokil modifiye ve sönmüş kireç modifiye karışımlar için benzerdir.



Şekil 44. Geleneksel bağlayıcılı GAB karışımların koşullu ITS değerleri

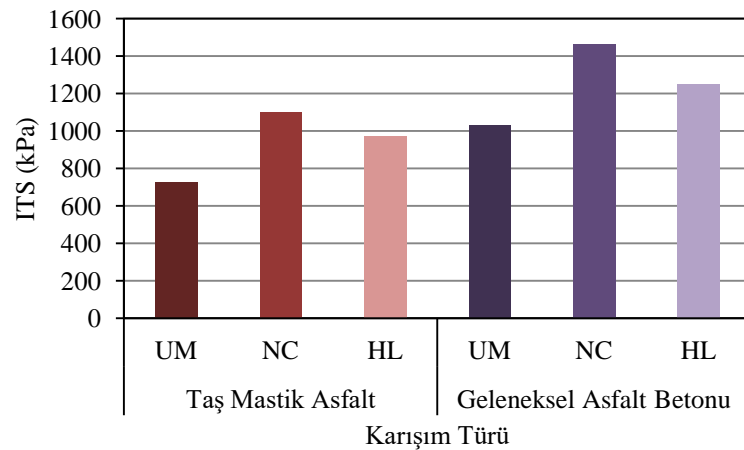


Şekil 45. Nanokil modifiye GAB karışımların koşullu ITS değerleri

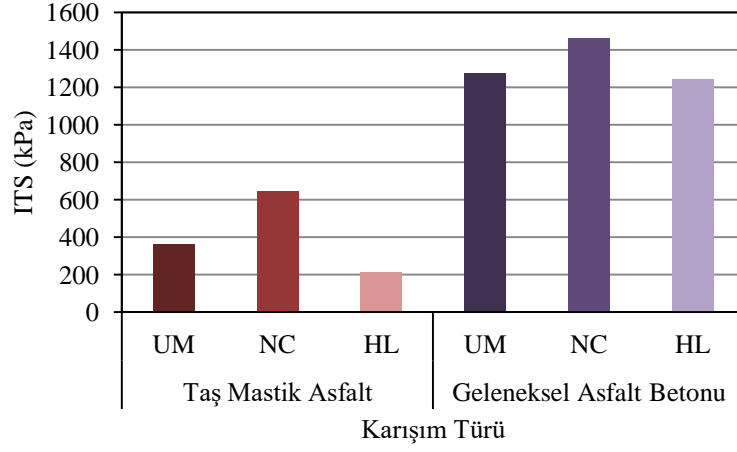


Şekil 46. Sönmüş kireç modifiye GAB karışımların koşullu ITS değerleri

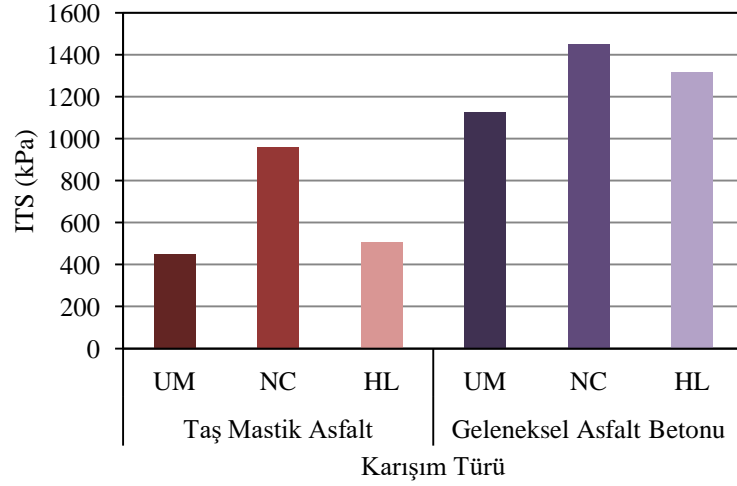
Şekil 44 – Şekil 46’den görüldüğü üzere, geleneksel asfalt betonu karışımların, koşullu seçenekleri için yapılan dolaylı çekme mukavemeti testlerine göre, cam agregası boyutunun artmasıyla geleneksel bağlayıcılı ve sönmüş kireç modifiye karışımlarda önce çekme mukavemetlerinde bir artış ardından da 9.5mm maksimum cam boyutunda bir azalma gözlenmiştir. Nanokil modifiye karışımlarda maksimum cam boyutunun artmasıyla çekme mukavemetlerinde sürekli bir düşüş meydana gelmiştir. Daha küçük maksimum agregası boyutlarında (0.075mm; 2.00mm ve 4.75mm) gerek geleneksel ve gerekse modifiye bağlayıcı olsun, dayanımlar cam agregasız karışımlarinkine yakın veya daha yüksek seviyede gerçekleşmiştir.



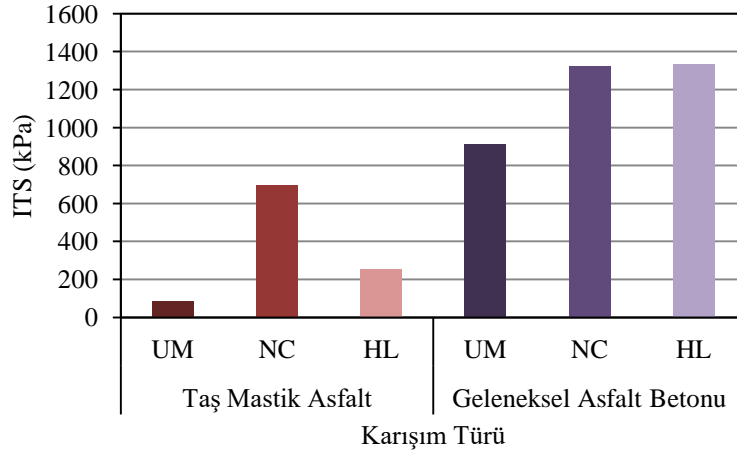
Şekil 47. Cam agregası içermeyen koşullu asfalt karışımların ITS değerleri



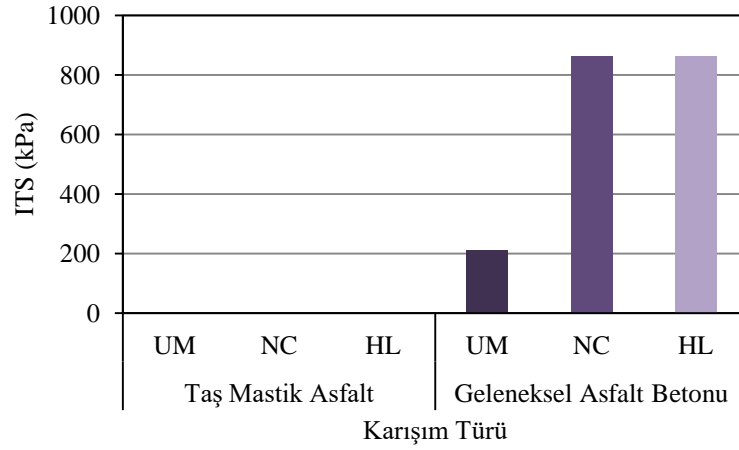
Şekil 48. 0.075mm maksimum boyutlu cam agrega içeren koşullu asfalt karışımların ITS değerleri



Şekil 49. 2.00mm maksimum boyutlu cam agrega içeren koşullu asfalt karışımların ITS değerleri



Şekil 50. 4.75mm maksimum boyutlu cam agrega içeren koşullu asfalt karışımların ITS değerleri



Şekil 51. 9.5mm maksimum boyutlu cam agrega içeren koşullu asfalt karışımlarının ITS değerleri

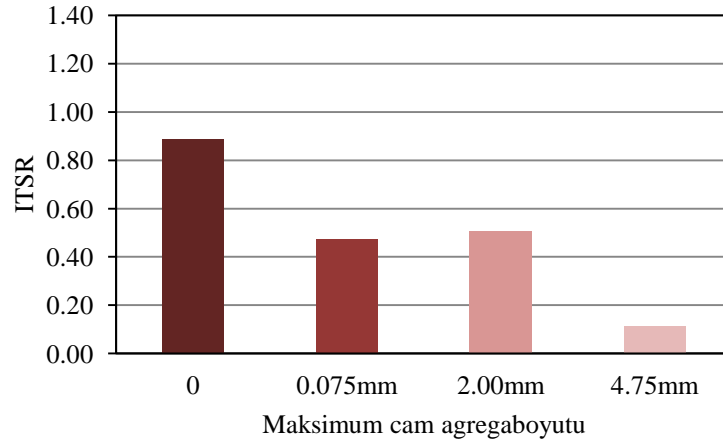
Şekil 47 – Şekil 50’den geleneksel asfalt betonunun koşullu dolaylı çekme mukavemetlerinin taş mastik asfalt karışımlara göre daha yüksek çıktığı görülmüştür. Bağlayıcının modifiye edilmesi ile çekme mukavemetlerinde genelde bir artış oluşmuştur. Her iki karışım türü için (GAB ve TMA), nanokil modifiye bağlayıcı ile üretilen örnekler sönmüş kireç modifiyeli olanlara göre (4.75mm maksimum boyutlu cam agrega içeren GAB seçeneği hariç) daha yüksek dolaylı çekme mukavemeti göstermiştir.

Üretilen karışımların su hasarı direncini belirlemek için koşullu ITS değerleri koşulsuz ITS değerlerine oranlanmış ve elde edilen dolaylı çekme mukavemeti oranları (ITSR) Tablo 31’de verilmiştir.

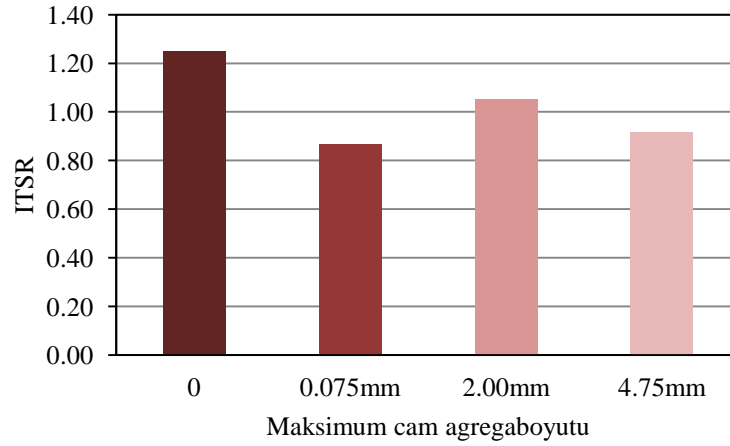
Tablo 31. GAB ve TMA karışımların dolaylı çekme mukavemeti oranları

Maksimum cam agrega boyutu	Taş Mastik Asfalt Karışım			Geleneksel Asfalt Betonu Karışım		
	UM (saf bitüm)	NC (nanokil mod.bitüm)	HL (sönmüş kireç mod.bitüm)	UM (saf bitüm)	NC (nanokil mod.bitüm)	HL (sönmüş kireç mod.bitüm)
0	0.89	1.25	1.20	0.86	1.11	1.09
0.075mm	0.47	0.87	0.26	0.97	1.05	0.83
2.00mm	0.51	1.05	0.58	0.78	1.09	0.92
4.75mm	0.11	0.92	0.32	0.77	0.93	0.90
9.5mm				0.18	0.83	0.72

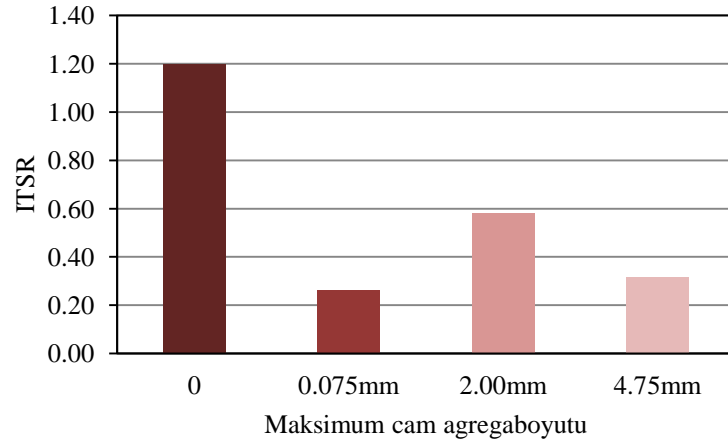
Literatürde genel düşünce ITSR değerlerinin 0.80'den daha büyük olması durumunda karışımın su hasarına karşı dirençli olduğu yönündedir. Bazı araştırmacılara göre 0.70 değerleri verilirken, KGM teknik şartnamesinde de hem asfalt betonu hem de taş mastik asfalt karışımlar için 0.80 değeri kriter olarak alınmaktadır. Tablodaki verilerin daha kolay yorumlanması için karışım türü – maksimum cam agrega boyutu ve bitümlü bağlayıcı türüne göre hazırlanan grafikler Şekil 52 – Şekil 62'de gösterilmiştir.



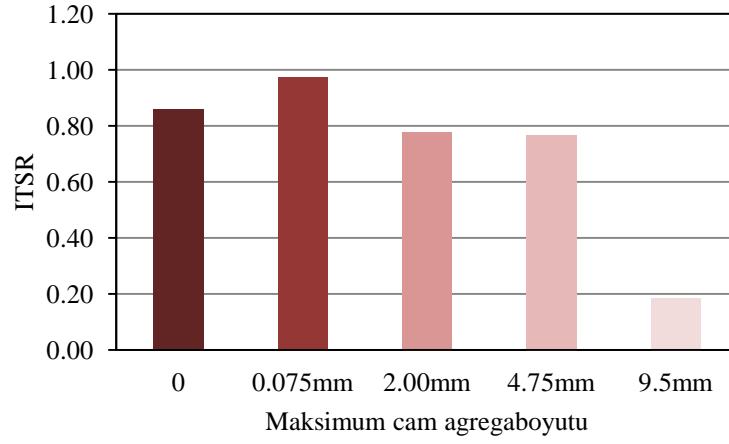
Şekil 52. Geleneksel bağlayıcılı TMA karışımların ITSR değerleri



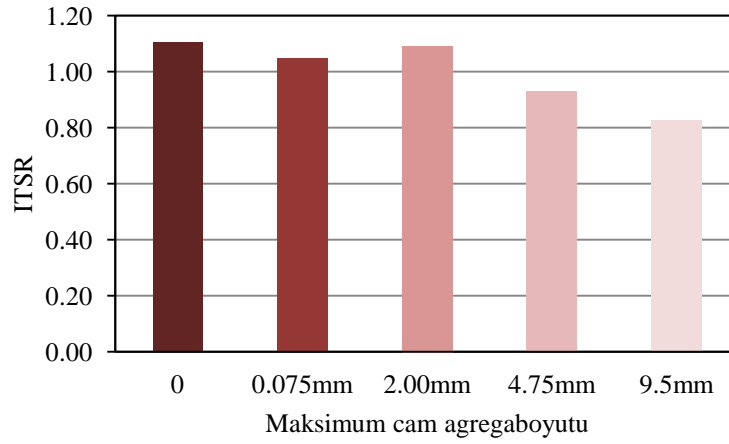
Şekil 53. Nanokil modifiye TMA karışımların ITSR değerleri



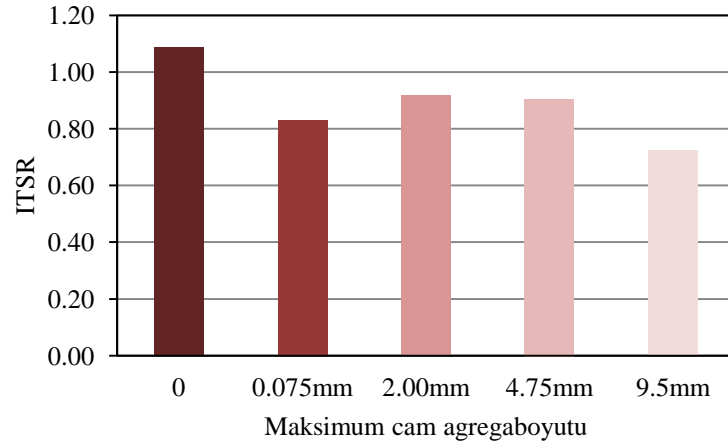
Şekil 54. Sönmüş kireç modifiye TMA karışımların ITSR değerleri



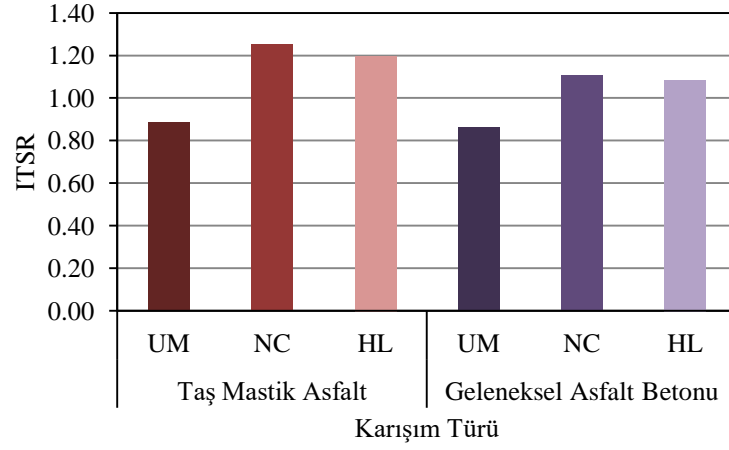
Şekil 55. Geleneksel bağlayıcı GAB karışımların ITSR değerleri



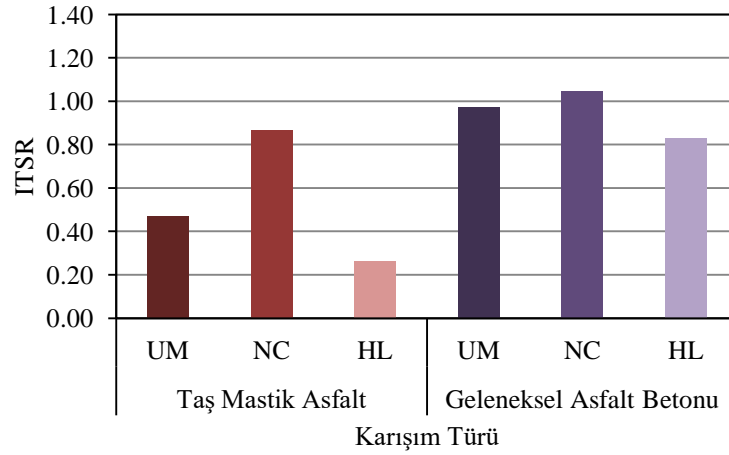
Şekil 56. Nanokil modifiye GAB karışımların ITSR değerleri



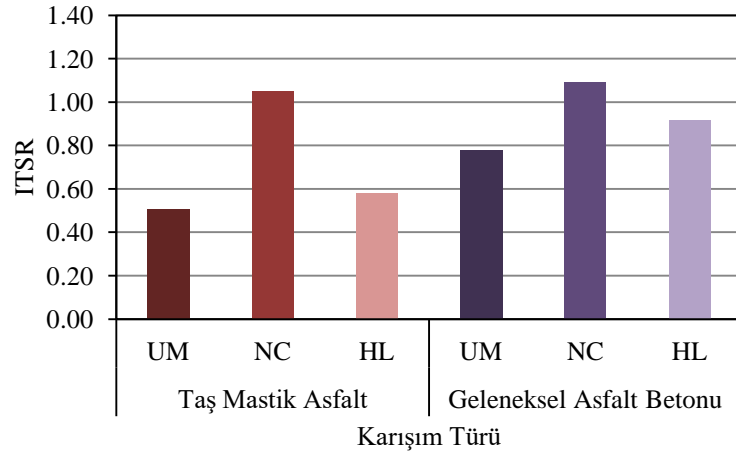
Şekil 57. Sönmüş kireç modifiye GAB karışımların ITSR değerleri



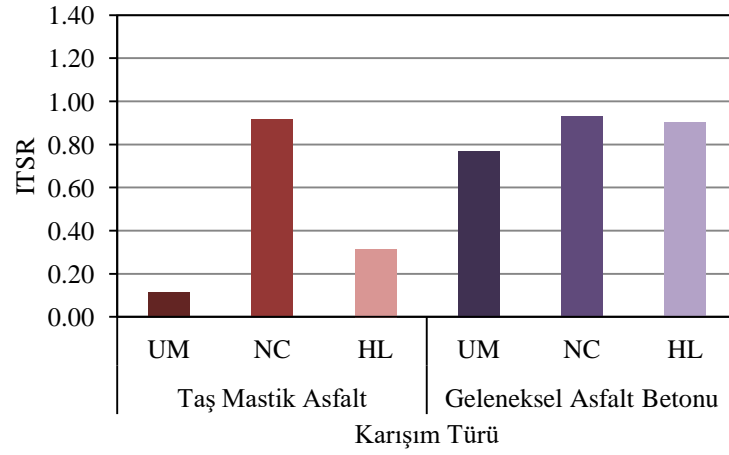
Şekil 58. Cam agrega içermeyen asfalt karışımların ITSR değerleri



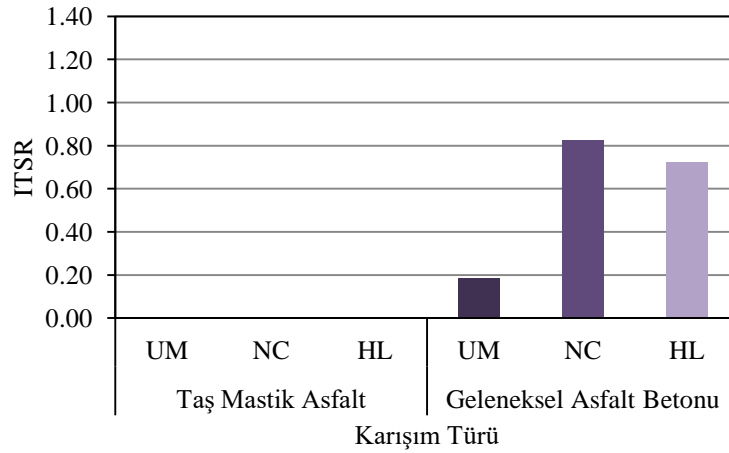
Şekil 59. 0.075mm maksimum boyutlu cam agrega içeren asfalt karışımların ITSR değerleri



Şekil 60. 2.00mm maksimum boyutlu cam agregası içeren asfalt karışımlarının ITSR değerleri



Şekil 61. 4.75mm maksimum boyutlu cam agregası içeren asfalt karışımlarının ITSR değerleri



Şekil 62. 9.5mm maksimum boyutlu cam agregası içeren asfalt karışımlarının ITSR değerleri

Şekil 52 – Şekil 62 ve Tablo 31’deki verilere göre, cam agregaya içermeyen taş mastik asfalt karışımlar cam agregaya içerenlerden daha büyük çekme mukavemeti oranları ortaya koymuştur. Geleneksel asfalt betonu karışımlarında da modifiye bağlayıcılı karışımlarda cam agregaya ilavesi ile birlikte ITSR değerlerinin düştüğü görülmüştür. Cam agregaya boyutunun 9.5mm seçilmesi durumunda yalnızca nanokil modifiye bitümlü karışımlar 0.80 ITSR değerini geçmiştir. Bu seçenekte, geleneksel bağlayıcılı ve sönmüş kireç bağlayıcılı karışımlar sırasıyla 0.18 ve 0.72 ITSR değerleri ile soyulma dirençleri düşük kalmıştır.

Taş mastik asfalt karışımların çekme mukavemeti oranları, geleneksel ve modifiye bitümlü seçeneklerde hiç cam içermeyen seçenekler için asfalt betonu karışımlardan daha yüksek ITSR değerleri gösterirken, cam agregaya ilavesi yapıldığında, geleneksel asfalt betonu karışımlar daha yüksek oranlar vermiştir.

Karışıma cam agregaya ilavesi yapıldığında, taş mastik asfalt karışımlar su hasarına karşı oldukça duyarlı hale gelmektedir. Buna karşın geleneksel asfalt betonunda 4.75mm maksimum cam agregaya boyutuna ulaşıncaya kadar çekme mukavemeti oranları kabul edilebilir seviyelerde kalmaktadır.

Nanokil modifiye bağlayıcılı GAB ve TMA karışımlarda 2.00mm maksimum cam agregaya boyutu diğer cam agregalı karışımlara göre daha iyi su hasarı dirençleri sağlamıştır. Sönmüş kireç modifiyeli TMA karışımlarda 2.00mm maksimum boyutlu cam agregaya ilave edilen seçenekler en yüksek su hasarı direncini gösterirken geleneksel asfalt betonu karışımlarda da en iyi ikinci seçenek olarak oluşmuştur.

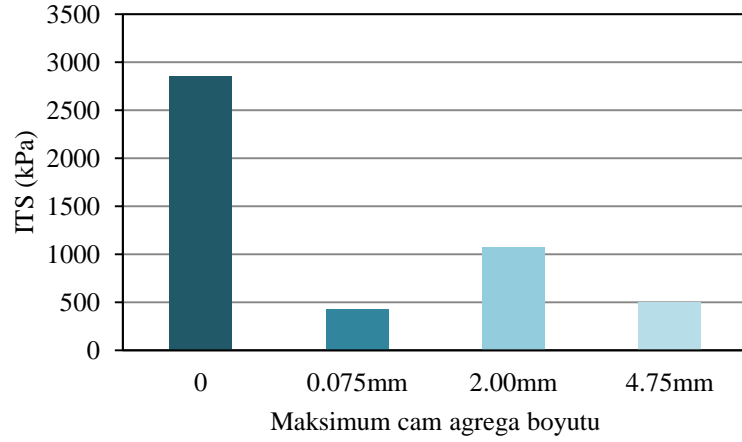
Bu karışımlarda donma çözülme ve sıcak suda bekletme koşullamasından sonra deforme olup dağılan örnekler Şekil 63’de sunulmuştur.



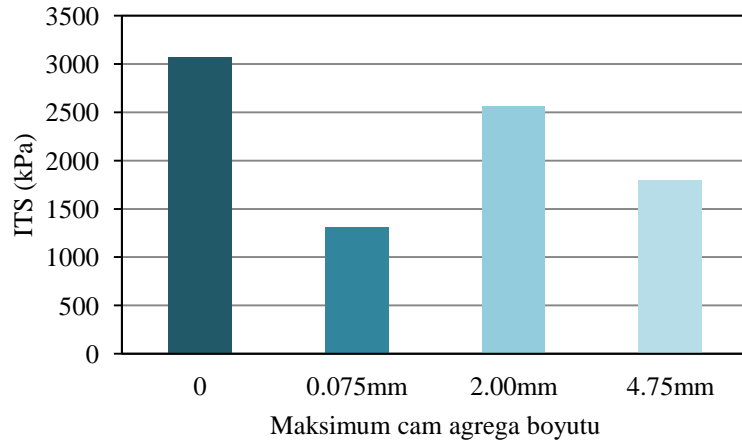
Şekil 63. Koşullaması sonrası dağılan örneklerden bir görüntü

3.3. Dolaylı Çekme Mukavemeti Testine Ait Bulgular ve İrdeleme

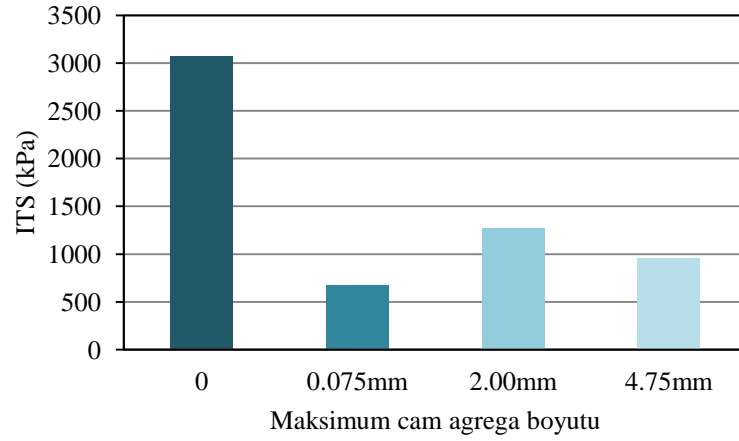
Dolaylı çekme mukavemeti testi, AASHTO T 283 koşullu örneklere, düşük sıcaklık çatlaması direncini belirlemek 0°C'de yapıldı. TMA ve GAB karışımlar için her seçenekte üçer adet özdeş Marshall briketi kullanıldı. Deney numunesi 18 saat süresince 0°C sabit sıcaklıktaki kabinde bekletildi ve ardından test yapıldı. Üçer örneğin ortalaması alınarak grafikler çizilmiştir.



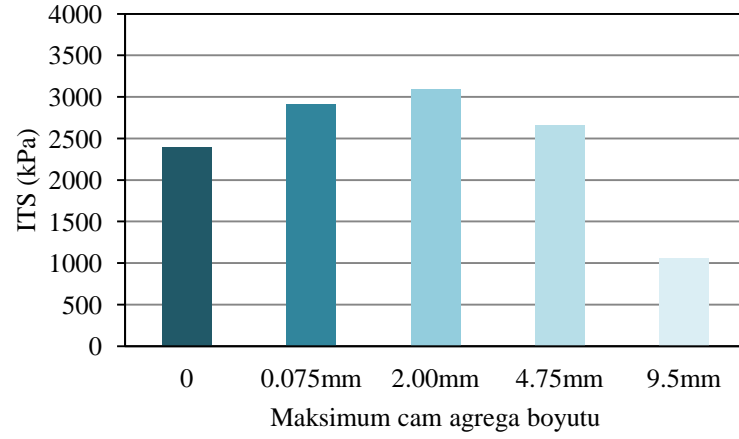
Şekil 64. Geleneksel bağlayıcılı TMA karışımların ITS değerleri



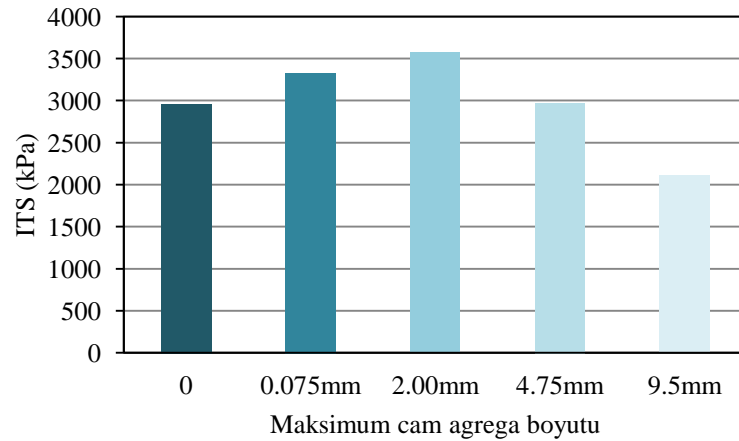
Şekil 65. Nanokil modifiye TMA karışımların ITS değerleri



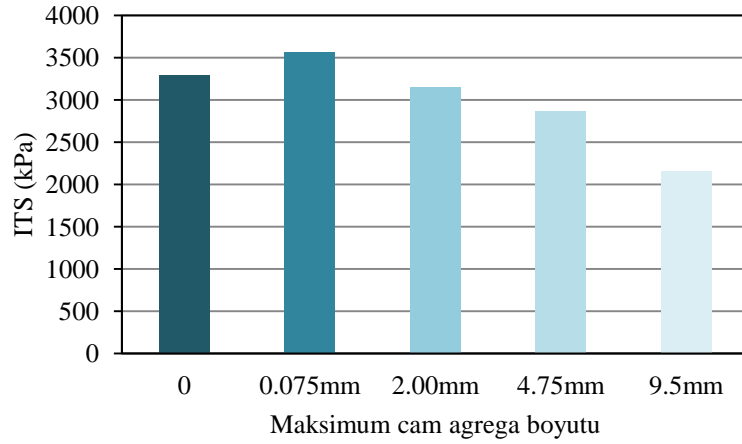
Şekil 66. Sönmüş kireç modifiye TMA karışımların ITS değerleri



Şekil 67. Geleneksel bağlayıcı GAB karışımların ITS değerleri



Şekil 68. Nanokil modifiye GAB karışımların ITS değerleri



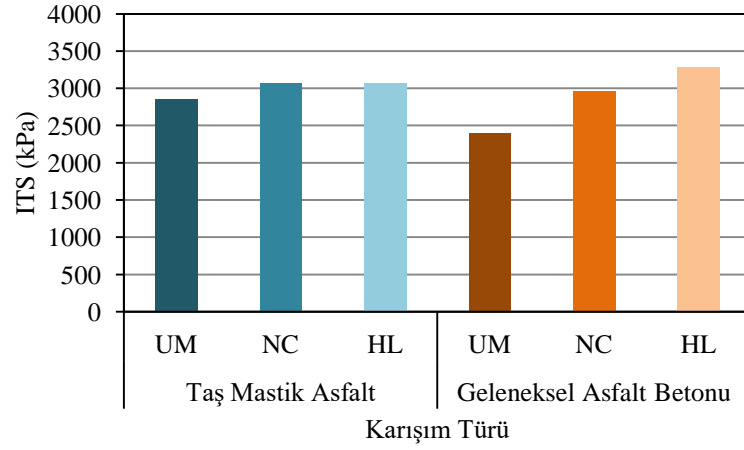
Şekil 69. Sönmüş kireç modifiye GAB karışımların ITS değerleri

Şekil 64 – Şekil 69’dan taş mastik asfalt karışımlarda cam agregası ilavesi yapıldığında çekme mukavemeti değerlerinin önemli oranda düştüğü görülmüştür. Kullanılan bitümün sönmüş kireç ya da nanokil modifiye olması durumunda da aynı eğilim oluşmuştur. Cam agregası ilavesiyle çekme mukavemetinin düşmesine rağmen, cam agregalı taş mastik asfalt karışımlarda en yüksek değerleri 2.00mm maksimum cam agregası boyutlu seçenekler vermiştir.

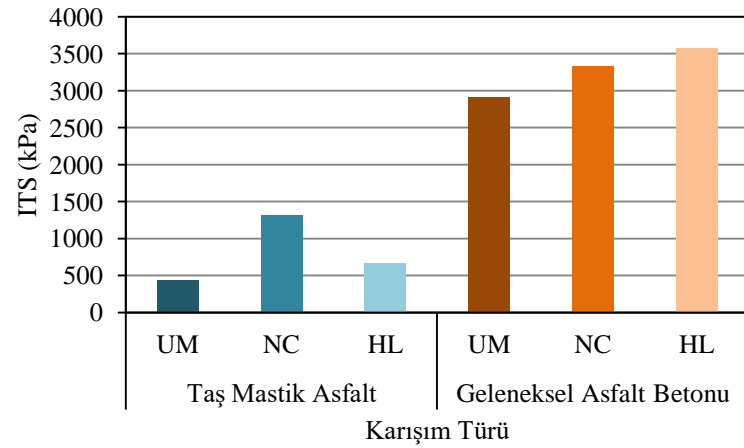
Geleneksel asfalt betonu karışımlarında ise cam agregası boyutunun yükseltilmesi ile çekme mukavemetinde önce artış görülmüş ve ardından azalma olmuştur. Geleneksel bağlayıcı karışımlarda 2.00mm ve 4.75mm boyutlu cam kullanılması durumunda en büyük çekme mukavemetleri oluşurken nanokil modifiye ve sönmüş kireç modifiye bitüm kullanıldığında ise sırasıyla en büyük değerler 2.00mm ve 0.075mm boyutlu cam agregaların kullanıldığı seçeneklerden elde edilmiştir. Bütün seçeneklerde 9.5mm maksimum cam agregası boyutunun kullanıldığı durumlarda en küçük çekme mukavemetleri meydana gelmiştir.

Taş mastik asfalt ve geleneksel asfalt betonu karışımlarının düşük sıcaklık davranışlarının karşılaştırılabilmesi için Şekil 70 – Şekil 74 hazırlanmıştır. Grafiklerden, cam agregası içermeyen geleneksel ve nanokil modifiye taş mastik asfalt karışımların çekme mukavemetlerinin geleneksel asfalt betonunkine göre daha yüksek olduğu ve sönmüş kireç modifiye TMA karışımlarının ise geleneksel asfalt betonunkilere göre daha düşük olduğu görülmüştür. Buna rağmen, karışımlara cam agregası eklenmesiyle, taş mastik asfalt karışımların çekme mukavemetlerinde dramatik bir düşüş oluşmuştur. Bu düşüşle birlikte, cam agregalı bütün seçeneklerde geleneksel asfalt betonu karışımların çekme mukavemeti

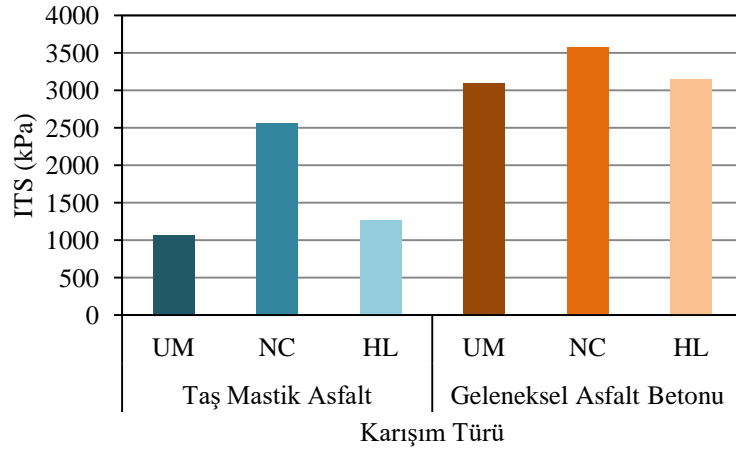
değerleri taş mastik asfaltlara göre daha iyi düzeyde gerçekleşmiştir. TMA karışımların cam içeren seçeneklerinde modifiye bitüm kullanmak düşük sıcaklık direncini artırmıştır. En büyük çekme dayanımları nanokil modifiye karışımlarda ve cam agrega boyutunun 2.00mm olduğu durumda görülmüştür. Geleneksel asfalt betonu karışımlarda sönmüş kireç kullanımının genellikle daha etkili olduğu anlaşılmıştır.



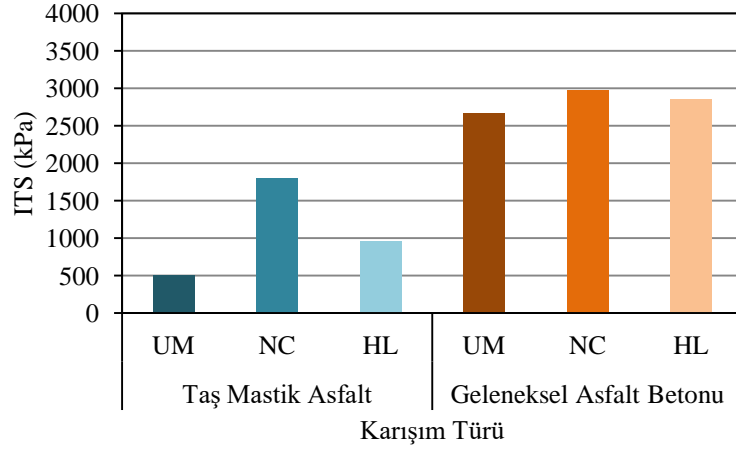
Şekil 70. Cam agrega içermeyen asfalt karışımların ITS değerleri



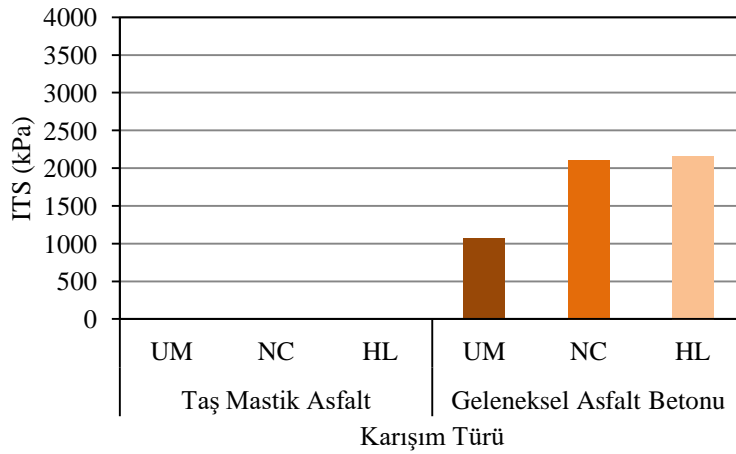
Şekil 71. 0.075mm maksimum boyutlu cam agrega içeren asfalt karışımların ITS değerleri



Şekil 72. 2.00mm maksimum boyutlu cam agrega içeren asfalt karışımların ITS değerleri



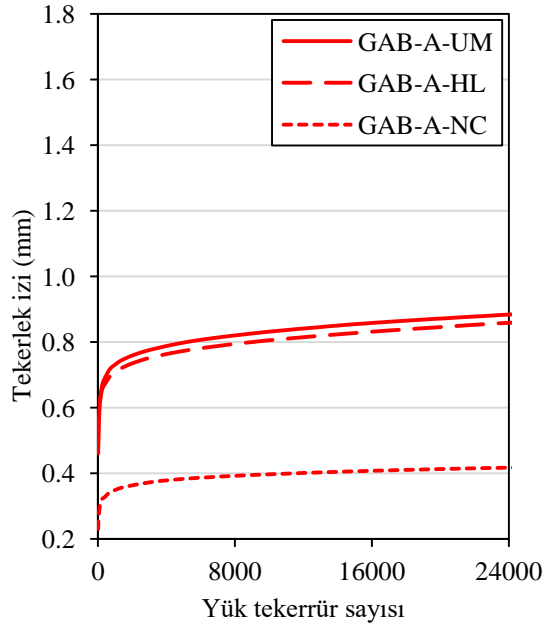
Şekil 73. 4.75mm maksimum boyutlu cam agrega içeren asfalt karışımların ITS değerleri



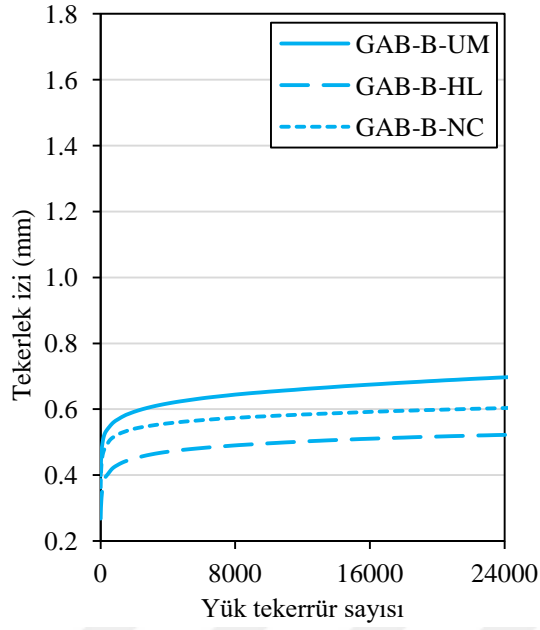
Şekil 74. 9.5mm maksimum boyutlu cam agrega içeren asfalt karışımların ITS değerleri

3.4. Tekrarlı Yük Sünme Testine Ait Bulgular ve İrdeleme

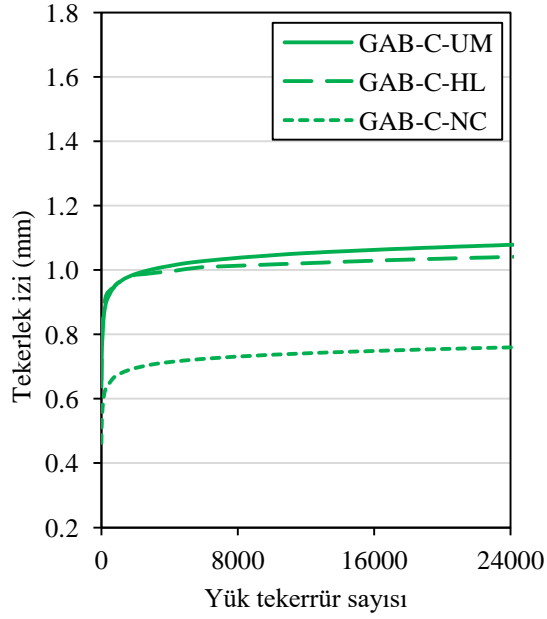
Tekrarlı yük sünme testi taş mastik asfalt ve asfalt betonu karışımlarının tekerlek izi potansiyelini değerlendirmek için kullanıldı. Her karışım türünde (TMA ve GAB), her bir seçenek (UM, NC, HL) ve cam içeriğinde koşullu ve koşulsuz örnekler üretildi. Asfalt test cihazı kullanılarak tekrarlı yük sünme testleri yapıldı. Çalışmada değerlendirilen parametrelerin sayısının fazla olmasından dolayı Şekil 75 – Şekil 85’de karışım türlerini ifade etmek için kodlama kullanılmıştır. Her bir kod ismi üç terimden oluşmaktadır. Birinci terim karışımın türünü, ikinci terim kullanılan maksimum cam agregaya boyutunu ve son terim de kullanılan bağlayıcı türünü ifade etmektedir. Bu terimler: GAB: geleneksel asfalt betonunu; TMA: taş mastik asfaltı; A: cam agregaya içermeyen; B: 0.075mm maksimum cam agregaya boyutunu; C: 2.00mm maksimum cam agregaya boyutunu D: 4.75mm maksimum cam agregaya boyutunu; E: 9.5mm maksimum cam agregaya boyutunu temsil etmektedir. UM: geleneksel bitüm; NC: nanokil; HL: sönmüş kireci ifade etmektedir.



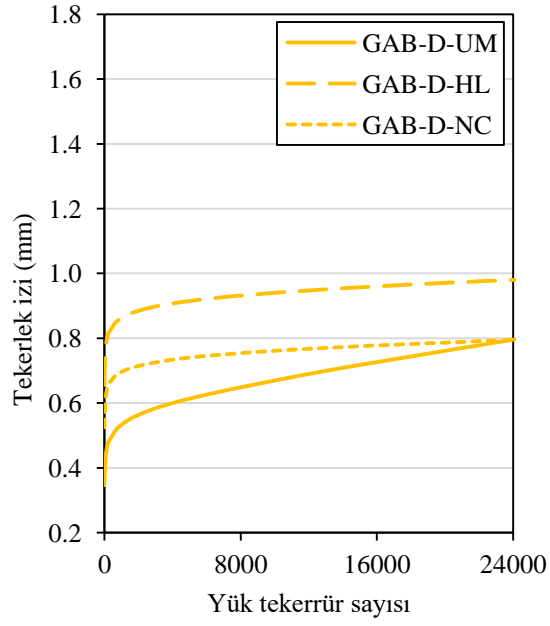
Şekil 75. Cam agregaya içermeyen koşulsuz geleneksel asfalt betonu karışımlarının tekrarlı yük sünme eğrileri



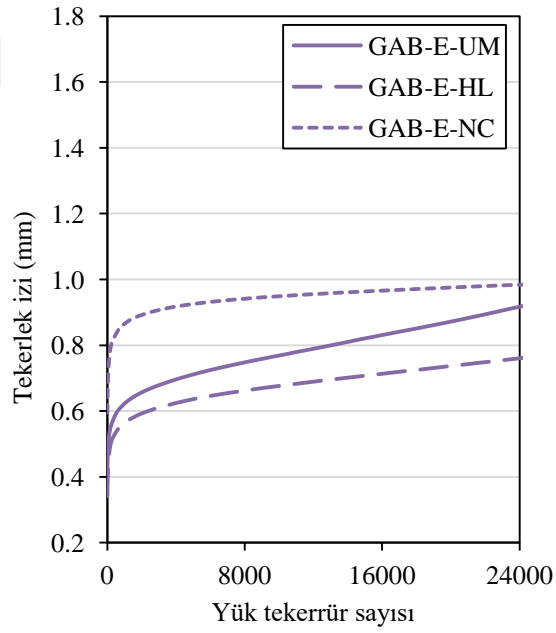
Şekil 76. 0.075mm maksimum boyutlu cam agrega içeren koşulsuz geleneksel asfalt betonu karışımların tekrarlı yük sünme eğrileri



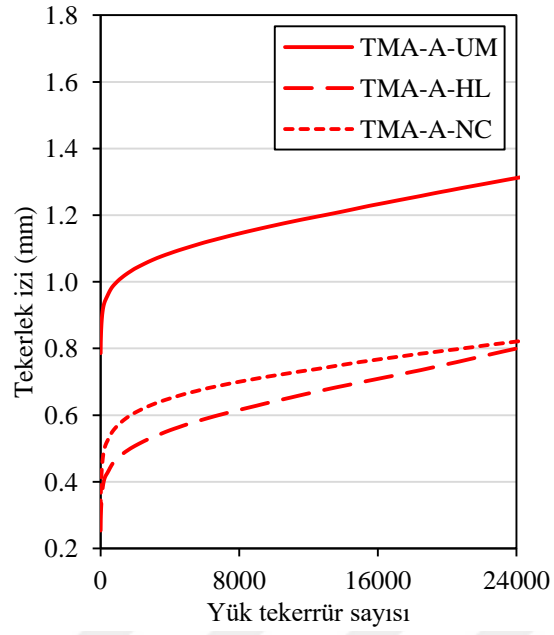
Şekil 77. 2.00mm maksimum boyutlu cam agrega içeren koşulsuz geleneksel asfalt betonu karışımların tekrarlı yük sünme eğrileri



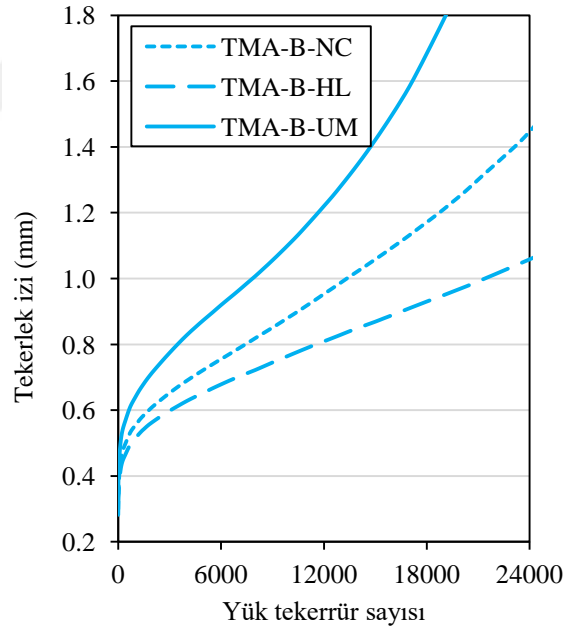
Şekil 78. 4.75mm maksimum boyutlu cam agregası içeren koşulsuz geleneksel asfalt betonu karışımlarının tekrarlı yük sünme eğrileri



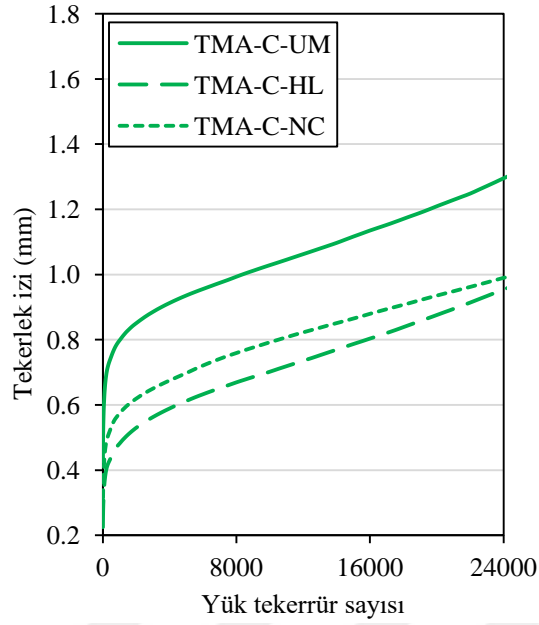
Şekil 79. 9.5mm maksimum boyutlu cam agregası içeren koşulsuz geleneksel asfalt betonu karışımlarının tekrarlı yük sünme eğrileri



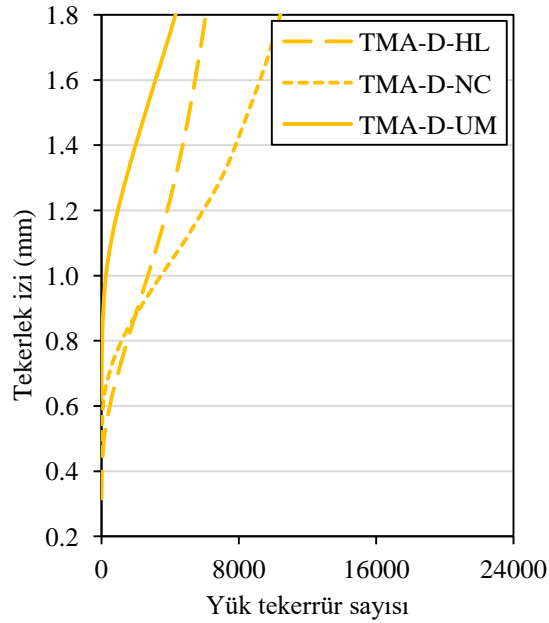
Şekil 80. Cam agrega içermeyen koşulsuz taş mastik asfalt karışımların tekrarlı yük sünme eğrileri



Şekil 81. 0.075mm maksimum boyutlu cam agrega içeren koşulsuz taş mastik asfalt karışımların tekrarlı yük sünme eğrileri



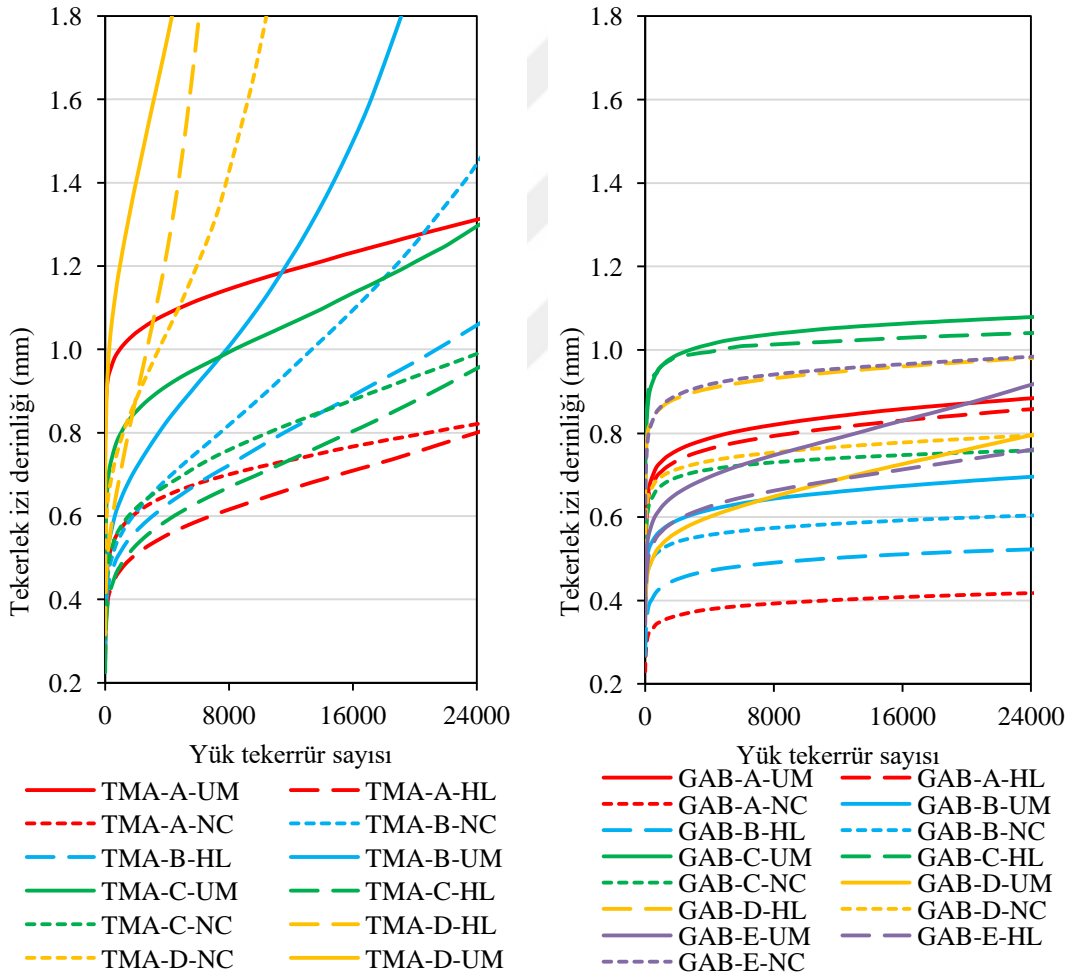
Şekil 82. 2.00mm maksimum boyutlu cam agregası içeren koşulsuz taş mastik asfalt karışımlarının tekrarlı yük sünme eğrileri



Şekil 83. 4.75mm maksimum boyutlu cam agregası içeren koşulsuz taş mastik asfalt karışımlarının tekrarlı yük sünme eğrileri

Şekil 80 – Şekil 83’den taş mastik asfalt karışımlarında 4.75mm maksimum boyutlu cam agregası içeren karışımlarda en büyük deformasyon değerleri oluşmuştur. Bu boyutta modifiye ve geleneksel karışımların tamamında üçüncül sünme bölgesi görüldü. Cam

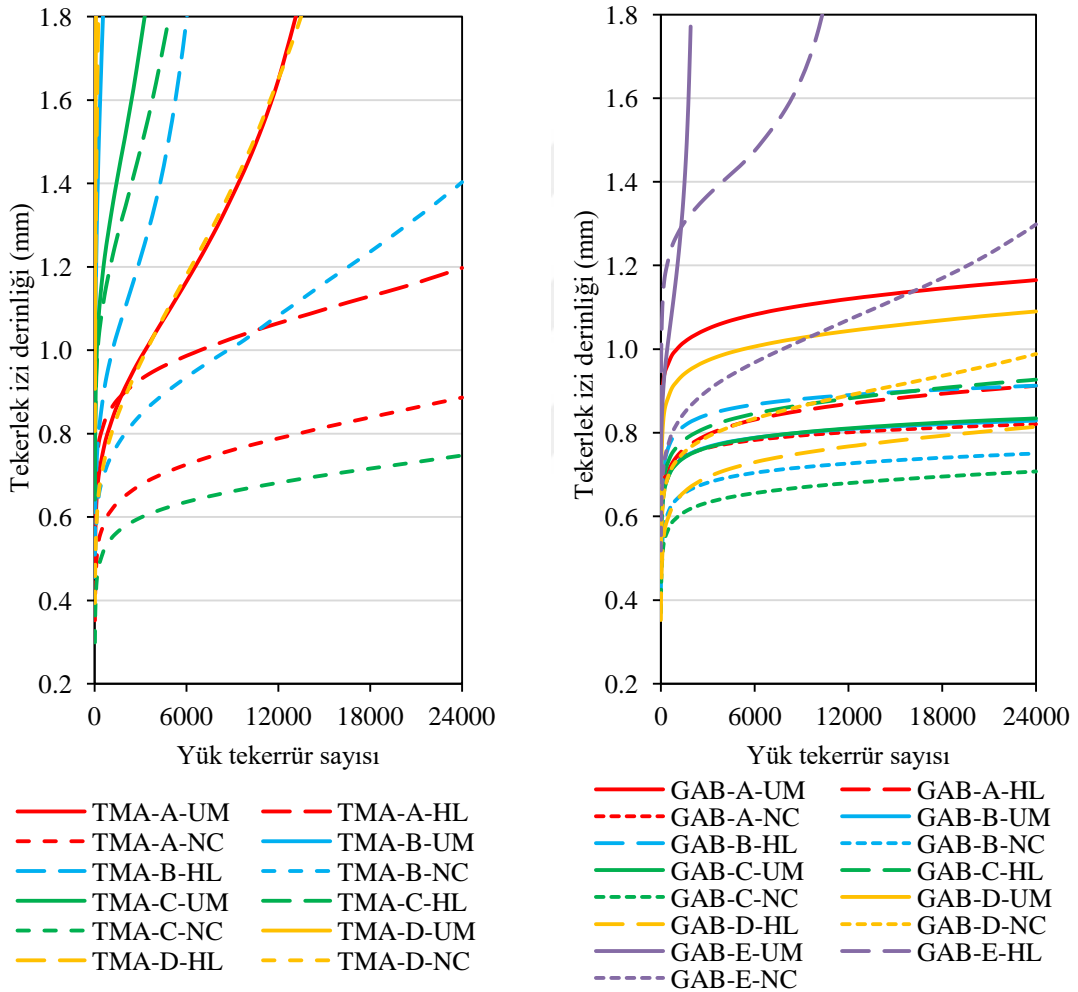
agrega içermeyen, filler boyutunda ve 2.00mm maksimum boyutta cam agrega içeren karışımların geleneksel bitümlü olanlar modifiye olanlara göre daha büyük deformasyonlar göstermiştir. Ancak filler boyutunda cam agrega içeren karışımlarda üçüncül sünme bölgesi oluşurken cam agregasız olanlar ve 2.00mm maksimum boyutlu olanlarda üçüncül sünme bölgesi görülmedi. Hem filler boyutunda hem de 2.00mm maksimum boyutta cam agrega içeren modifiye bitümlü TMA karışımların tamamı geleneksel bitümlü cam içermeyen TMA karışımdan daha yüksek deformasyon direnci göstermiştir. Sönmüş kireç ile modifiye edilen karışımlar 4.75mm maksimum boyutlu cam içeren karışımların haricinde en düşük deformasyon değerlerini ortaya koymuştur.



Şekil 84. Koşulsuz TMA ve GAB için bitüm türü ve cam agrega içeriklerine göre sünme eğrileri

Şekil 84'den geleneksel asfalt betonu karışımların deformasyon eğrilerinde üçüncül sünme bölgesi gözlemlenmemiştir. 9.5mm ve 4.75mm maksimum boyutta cam agrega

içeren geleneksel asfalt betonu karışımların deformasyon eğrilerinin eğimleri bariz bir şekilde diğer karışımlarınkine göre daha büyük olmuştur. Cam agregaya içermeyen, filler boyutunda ve 2.00mm'den daha küçük cam agregaya içeren karışımların test sonuçları daha kararlı sonuçlar oluşturmuştur. Bu üç karışımda modifiye bitümlü seçenekler daha iyi dirençler göstermiştir. Özellikle cam agregaya içermeyen karışımlar oldukça düşük deformasyonlar ortaya koymuştur. Filler boyutlu cam içeren karışımlarda ise sönmüş kireç modifiye bitümlü olanlar en küçük deformasyon değerini vermiştir.



Şekil 85. Koşullu TMA ve GAB için bitüm türü ve cam agregası içeriklerine göre sünme eğrileri

Uygulama koşullarını simüle edebilmek için koşullu örnekler üzerinde de tekrarlı yük sünme deneyleri yapıldı. Test sonuçları Şekil 85'de taş mastik asfalt karışım ve

geleneksel asfalt betonu karışımlar için ayrı ayrı gösterilmiştir. Testlerde her seçenek için ikişer özdeş örnek kullanıldı. Test sonuçlarının ortalaması kullanılarak grafikler hazırlandı.

Taş mastik asfalt karışımlarda nanokil modifiyeli olanlar, geleneksel olanlara ve sönmüş kireç modifiyeli olanlara göre daha büyük deformasyon direnci göstermiştir. Nanokil modifiyeli olan ve 2.00mm maksimum boyutta cam agregası içeren karışımlar en küçük deformasyonu göstermiştir. Onu sırasıyla cam agregasız nanokil modifiye karışım ve cam agregasız sönmüş kireç modifiye karışım izlemiştir. Nanokil veya sönmüş kireç kullanılmayan karışımlarda sünme eğrileri ani bir yükseliş göstermiş ve ikincil sünme bölgesi oluşmadan briketler önceden belirlenen maksimum deformasyon miktarına ulaşmış ve dağılmıştır.

Koşullu geleneksel asfalt betonu karışımlarında da taş mastik asfalt karışımlara benzer olarak 2.00mm maksimum boyutta cam agregası içeren nanokil modifiye karışımlar en küçük deformasyon değerini ortaya koymuştur. Onu filler boyutunda cam ilaveli nanokil modifiye karışım takip etmiştir. 4.75mm maksimum boyutta cam agregası ilaveli GAB karışımlarda en iyi sonucu sönmüş kireç modifiyeli olanlar göstermiştir. 9.5mm maksimum boyutta olan geleneksel asfalt betonu karışımlarında nanokil modifikasyonu ile en iyi sonuç elde edilmiş fakat diğer karışımlarda oluşmayan üçüncül sünme bölgeleri bu karışımlar için oluşmuştur.

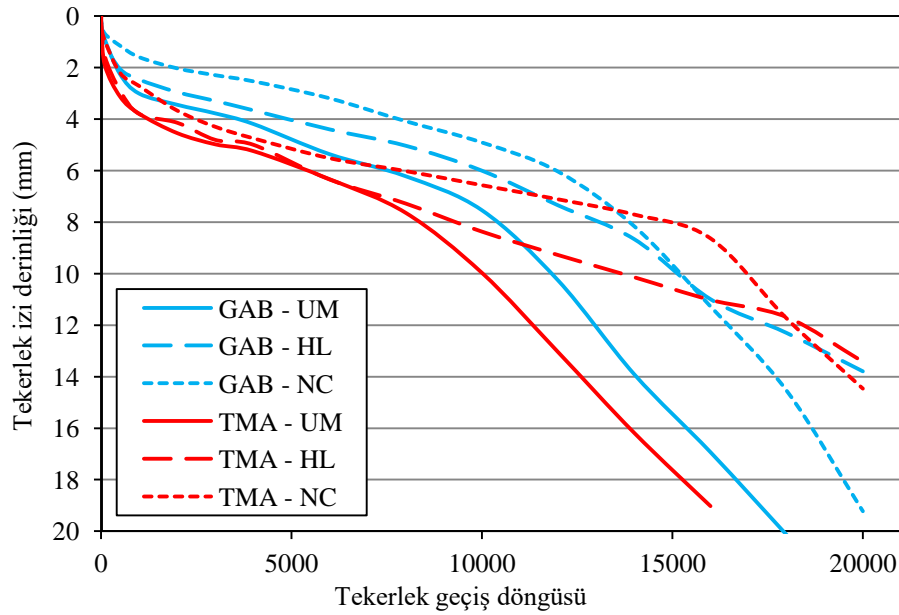
Hem GAB hem de TMA karışımlarda kendi içerisinde anlamlı bir ilişki oluşmuştur. Modifikasyon anlamında, sönmüş kireç veya nanokil kullanımının etkisi koşullama sisteminin uygulanmasıyla daha iyi gözlemlenebilmiştir. Koşullama uygulanmayan örneklerde oluşan yanıtıcı sonuçlar koşullu örneklerde görülmemiştir. Yine aynı şekilde 2.00mm cam boyutu kullanımı ve nanokil modifikasyonunun birlikte kullanıldığı seçenekler kalıcı deformasyon direnci açısından en etkili seçenek olarak görülmüştür.

3.5. Hamburg Tekerlek İzi Testine Ait Bulgular ve İrdeleme

Hamburg tekerlek izi testi taş mastik asfalt ve geleneksel asfalt betonu karışımlarının tekerlek izi ve su hasarı potansiyellerini değerlendirmek için kullanıldı. Suya duyarlılık, bağlayıcının agregadan soyulmasına neden olarak karışımların sökülmesine ve dağılmasına yol açan bir problem olmaktadır. TMA ve GAB karışımları için UM, NC, HL seçenekleri kullanılarak cihaz kabininde bulunan su içerisinde koşullaması yapılarak, tekerlek izi testleri yapıldı.

Bu testten elde edilen eğriler, üç bölgeye ayrılmaktadır. Son bölge, üçüncü bölge olarak anılmakta, burada örnek hızlı bozulma sürecine girmektedir. Hamburg deneyinden elde edilen eğrilerin üçüncü bölgeleri; viskoz akma şeklinde kendini gösteren ve kalıcı deformasyona neden olan sebeplerden başka başlıca su hasarı problemi ile ilgili olmaktadır. Su hasarına karşı dayanıksız olan karışımlar, soyulma infleksiyon noktasında, kaba agregaların yerinden çıkmasına neden olmaktadır.

Soyulma eğimi su hasarından dolayı kalıcı deformasyonların toplamının ölçüsüdür. HMA örneklerinin su kaynaklı hasarının nispi direncini tahmin etmek için kullanılmaktadır. Araç geçiş sayılarında su hasarı baskın performans göstermeye başlamaktadır. Daha yüksek sünme eğimi, soyulma noktası ve soyulma eğimi daha düşük su hasarını göstermektedir (Yıldırım vd., 2007).

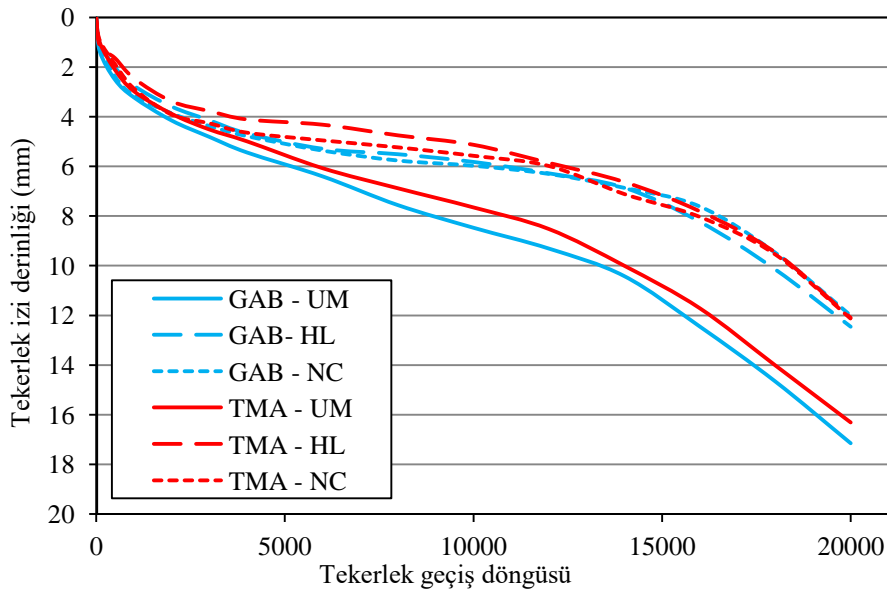


Şekil 86. 4.75mm maksimum boyutlu cam agregası içeren GAB ve TMA karışımlarının HWT eğrileri

Şekil 86'da verilen eğrilerinden yararlanılarak 4.75mm maksimum boyutlu cam agregası içeren taş mastik asfalt karışımlarında, sünme bölgesinde, geleneksel bağlayıcılı karışımlar en büyük eğim değerlerini göstermiştir. En düşük eğim değeri nanokil katkıli karışımlar olmuştur. Dolayısıyla, nanokil katkıli karışımlar en büyük deformasyon direncini ortaya koyarken en küçük direnci de geleneksel karışım göstermiştir. Geleneksel asfalt betonu karışımında ise TMA karışımındaki gibi katkısız karışım en düşük

deformasyon direncini göstermiş nanokil ve sönmüş kireçli karışımlar ise sünme eğimi açısından yakın değerler ortaya koymuştur.

Su hasarı değerlendirmesinde, soyulma infleksiyon noktası göz önüne alınarak yapılan değerlendirmede, hem GAB hem de TMA karışımlar birbirine paralel sonuçlar göstermiştir. En erken soyulmaya başlayan karışım geleneksel olanlar olurken, onu sırasıyla nanokil modifiye ve sönmüş kireç modifiye karışımlar takip etmiştir. Katkısız olan TMA karışım 10000 tekerlek geçişine ulaşmadan soyulma infleksiyon noktası ortaya koymuştur. CDOT tanımlamasına göre bu karışımlar su hasarına karşı hassas olarak değerlendirilmektedir.

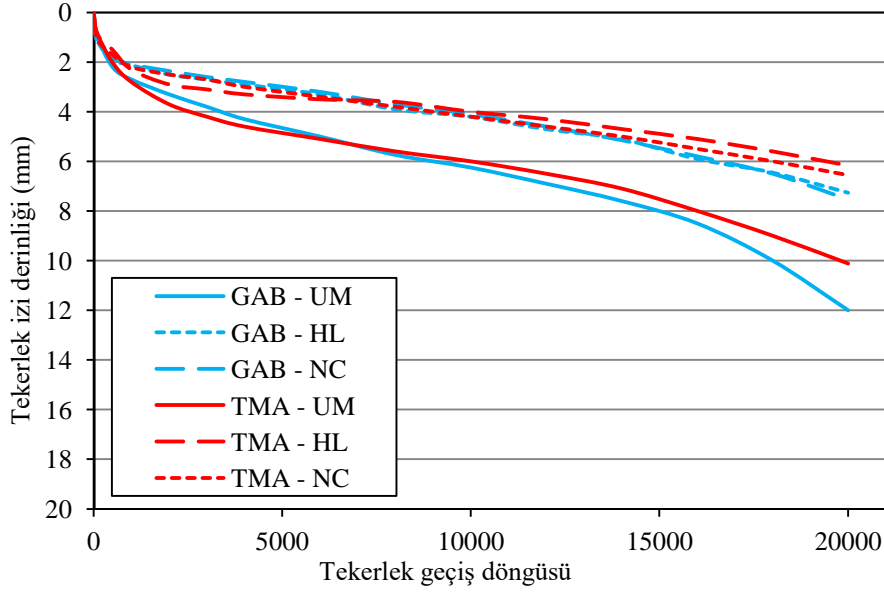


Şekil 87. 2.00mm maksimum boyutlu cam agrega içeren GAB ve TMA karışımların HWT eğrileri

Taş mastik asfalt ve geleneksel asfalt betonu karışımlarında 2.00mm maksimum boyutlu cam agrega içeren karışımların Şekil 87'de verilen grafiklerine göre; geleneksel bağlayıcı karışımda en yüksek tekerlek izi değerleri oluşmuştur. Sünme bölgesindeki (ikinci bölge) eğrilerin eğimleri aynı modifiyeli karışımlar için birbirine yakın olmakla birlikte, GAB karışımları daha küçük eğimler yani daha büyük deformasyon dirençleri göstermiştir. Her iki karışım türü için nanokil modifiyeli karışımlar sönmüş kireç modifiyeli olanlara göre çok az daha fazla deformasyon direnci göstermiştir.

TMA karışımların soyulma direnci GAB karışımlara göre daha düşük olmuştur. Geleneksel karışımların soyulma başlangıcı modifiye karışımlara göre daha erken

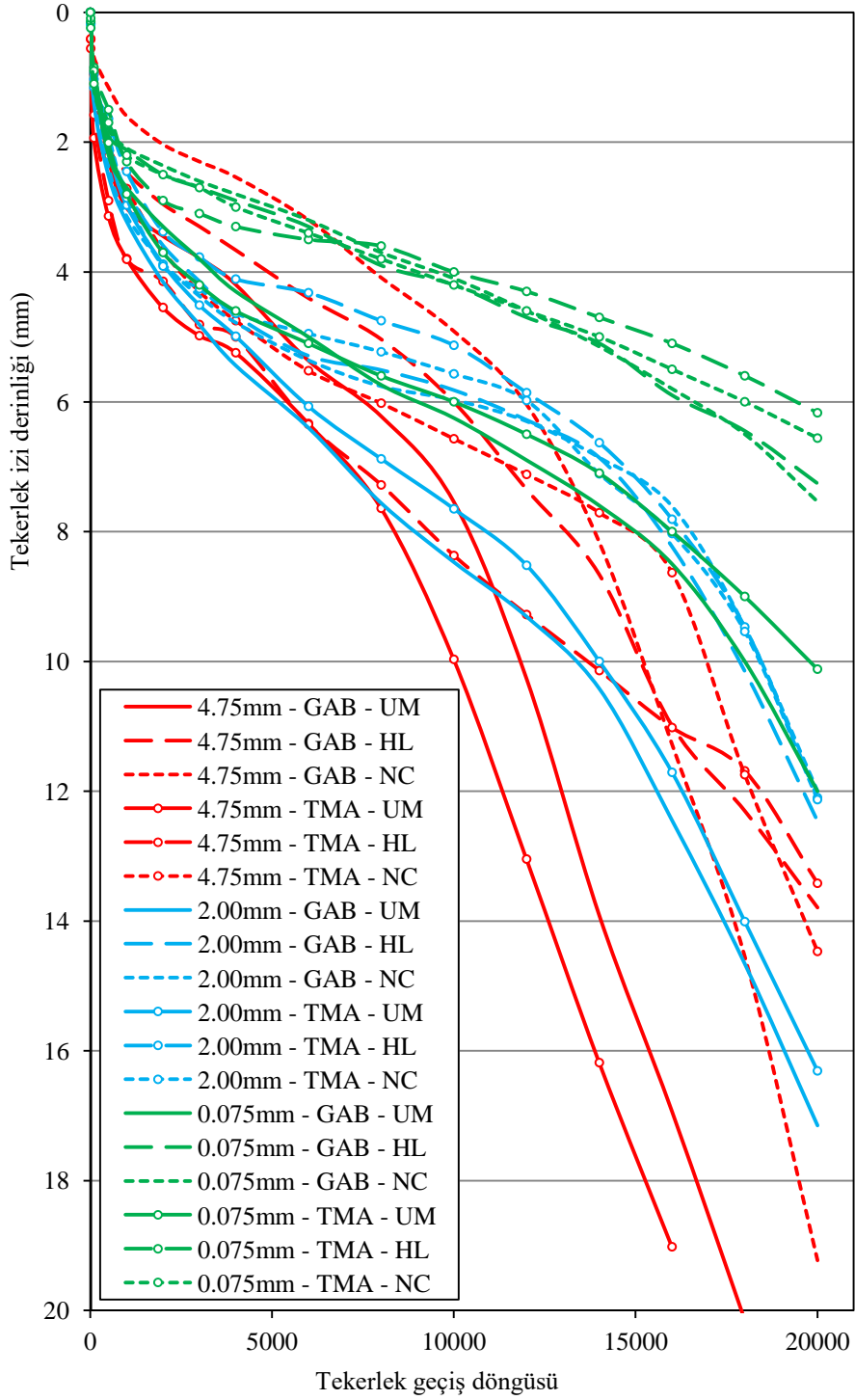
gelişmiştir. Modifiye bitümlü karışımlarda soyulma infleksiyon noktaları çok yakın geliştiğinden net bir göreceli farklılık oluşmamıştır.



Şekil 88. 0.075mm maksimum boyutlu cam agrega içeren GAB ve TMA karışımların HWT eğrileri

Şekil 88'de 0.075mm maksimum boyutlu cam agrega içeren taş mastik asfalt ve geleneksel asfalt betonu karışımların HWT eğrileri gösterilmiştir. Bu eğriler değerlendirildiğinde, GAB karışımların deformasyon açısından TMA karışımlara göre çok az, sönmüş kireç modifiyeli karışımlar nanokil modifiyeli olanlardan daha yüksek deformasyon direnci göstermiştir.

Geleneksel karışımlar yaklaşık 14000 tekerlek geçişinde soyulma infleksiyon noktası oluştururken modifiye bağlayıcı kullanılan karışımlarda net bir soyulma başlangıcı belirlenememiştir.



Şekil 89’da cam agrega boyutuna bağlı olarak HWT eğrileri grafiği çizilmiştir. Genel bir değerlendirilme yapıldığında, katkısız karışımlar için, büyük cam agrega boyutlarında daha büyük deformasyon eğiliminin olduğu, cam agrega boyutunun düşürülmesiyle birlikte

deformasyon direncinde de artma eğilimi olduğu anlaşılmaktadır. Fakat sönmüş kireç ve nanokil modifiye bitüm ile hazırlanan karışımlarda durum biraz daha farklıdır. Bu karışımlarda 4.75mm maksimum cam agregası boyutlu karışımlar en büyük sünme eğimlerini ve bu nedenle en büyük deformasyon potansiyelini ortaya koyarken 2.00mm maksimum cam boyutlu modifiye karışımlar 0.075mm (cam tozu filler) içeren karışımlara nazaran daha büyük deformasyon direnci göstermiştir. İkincil bölgeye baktığımızda, bu bölgede oluşan eğrilerin eğimleri, modifiye karışımlarda 2.00mm cam içeren karışımlar için daha düşük çıkmıştır. Fakat 2.00mm maksimum boyutlu cam içeren karışımların soyulma dirençleri cam filler içerenlere göre daha düşük olduğundan üçüncü bölgedeki deformasyon miktarları da daha fazla olmuştur.

Kalıcı deformasyon direnci açısından karışımlar Hamburg tekerlek izi ve tekrarlı yük sünme testleri ile karşılaştırılmıştır. Hamburg tekerlek izi testi karışımlar arasında anlamlı olduğu düşünülen bir ilişki ortaya koymuştur. Küçük boyutta cam agregası içeren karışımlarda daha az deformasyonlar gözlemlenmiş boyut arttıkça deformasyon miktarı da artmıştır. Modifiye olmayan karışımlar en büyük deformasyon değerlerini göstermiştir. Bütün karışımların performansı sıralandığında iki yöntem ile elde edilen sonuçlar birebir örtüşmemiştir. Ancak koşullu ve koşulsuz tekrarlı yük sünme deneyleri ve Hamburg tekerlek izi testlerinde 2.00mm ve 0.075mm maksimum boyutlarında cam agregası içeren ve sönmüş kireç veya nanokil modifiye bitüm kullanılan karışımların daha iyi performanslar gösterdiği görülmüştür.

TMA karışımlarda iki test yöntemi karşılaştırıldığında iki test yöntemi arasında en dikkat çekici nokta en iyi performansın 2.00mm maksimum boyutta kırılmış cam içeren karışımlardan elde edilmesidir. En iyi performanslar arasında geleneksel bitümlü karışımlar yer alamamış ve büyük boyutlarda cam agregası içeren karışımların deformasyon direnci de düşmüştür. TMA karışımlarda cam agregası kullanımı tez kapsamında belirlenen yöntemlerle geleneksel asfalt betonunda olduğu kadar etkili olamamıştır.

Su hasarı performans değerlendirmesinde Hamburg tekerlek izi testi ile modifiye Lottman testi arasında ilişki gözlemlenmiştir. Hamburg tekerlek izi testinde en iyi sonuçlar sırasıyla 0.075mm maksimum boyutta cam agregası içeren NC ve HL katkılı karışımlar, 2.00mm maksimum boyutlu cam agregası içeren NC modifiye karışımlar vermiştir. Modifiye Lottman yönteminde ise 2.00mm maksimum cam agregası boyutlu NC karışımlar ve 0.075mm cam agregası içeren NC karışımlar vermiştir. Sıraları değişik olmakla birlikte ilk iki sıradaki karışımlar iki yöntemde de aynıdır.

Hamburg tekerlek izi testlerinde kullanılan 150mm çaplı örnekler yoğurmalı presle sıkıştırılmıştır. Fakat hem tekrarlı yük sünme deneyleri hem de modifiye Lottman testleri Marshall tasarım yöntemiyle hazırlanmıştır. Bu örnekler 100mm çaplıdır. Bu küçük farklılıkların örnek hazırlama yöntemlerinin veya örnek boyutlarının farklılığından kaynaklanmış olabileceği düşünülmektedir.

Cam katkılı asfalt karışımının soyulma probleminin değerlendirildiği bir çalışmada iki yüzey karışımı belirlenmiş ve birisi soyulmaya orta derecede duyarlı iken, diğeri önceki soyulma testlerine bakılarak soyulmaya karşı daha çok hassas olarak seçilmiştir. Her bir karışımında tek bir kimyasal katkı ve sönmüş kireç kullanılmıştır. İzin verilen çekme mukavemeti oranı (TSR) 0.85 olarak kabul edilerek güvenle kullanılabilir maksimum cam miktarını belirlemek için kullanılmıştır. Soyulmaya orta derecede hassas olan karışımında, katkısız ile kimyasal katkılı karışımlarda cam yüzdesi arttıkça genel olarak TSR değerlerinin azaldığı görülmüştür. Cam yüzdesinin artmasıyla karışımında sönmüş kireç ilavesi önemli bir değişim göstermemiştir (Maupin, 1998).

Soyulmaya daha çok hassas olan karışımında ise, hem kimyasal hem de sönmüş kireç katkıları ile üretilen ortalama TSR değerleri, katkı içermeyen camın bütün içeriklerinde yaklaşık 0.15 daha fazla çıkmıştır. Sönmüş kireç ile yapılan karışımlar aynı zamanda soyulmaya orta derecede hassas olan karışımında olduğu gibi cam içeriği değiştiğinde TSR değeri en az miktarda değişmiştir. Bu sonuç, sönmüş kirecin belirli bir soyulma direnci seviyesinde daha tutarlı sonuçlar ortaya koyabileceğini yansıtmıştır. Her iki karışımında katkı maddesi kullanılmaksızın TSR 0.7 ile 0.8 aralığında olmuştur. Her iki karışımında %0 cam içeriğinde katkı kullanımında TSR değerleri yaklaşık 0.85 veya daha üzerinde olmuştur (Maupin, 1998).

Kırılmış cam ve %3-%5 oranında sönmüş kireç içeren asfalt betonu örneklerinin geleneksel sıcak asfalt karışımlara göre oldukça iyi yorulma performansı sergilediği belirtilmiştir. 5°C'de; %5 ve %10 kırılmış cam içeriği içeren numunelerin yorulma ömrü, aynı sıcaklıktaki geleneksel HMA'lara göre sırasıyla %50 ve %100 daha uzun olmuştur. Yorulma ömründeki bu artış, cam parçacıklarının yüksek köşeliliğinden dolayı, karışımın içsel sürtünme açısını arttırarak ve farklı bileşen parçacıkları arasındaki kenetlenmeyi geliştirerek asfalt kaplama tabakasının çatlamasını önleyebilmektedir. Sönmüş kirecin soyulma önleyici özelliklerinden dolayı bitüm, agrega ve cam agregalar arasında daha iyi adezyon sağlayacak, taş agregalarının görelî yer değiştirmesini en aza indirecek,

numunelerin yorulma ömrünü artıracak, ilk çatlamayı ve çatlak yayılımını yavaşlatacaktır (Arabani vd., 2012).

Bu tez kapsamında, bitüm %2 sönmüş kireç ile modifiye edilmiştir. Bu seviyede bir modifikasyonla performans artışı sağlanmakla birlikte, arzu edilen performansa ulaşılamamıştır. Sönmüş kireç miktarının arttırılması ile soyulma ve deformasyon direncinin de artabileceği değerlendirilmektedir. Arabani yaptığı çalışmada %3 ila %5 gibi oranlar önermiştir. Bu oranlar geleneksel karışımlarda önerilen oranların üzerindedir. Atık camların agrega olarak kullanılması durumunda karışımdaki silis oranı ve buna bağlı olarakta soyulma hassasiyeti artmaktadır. Bunun için daha yüksek oranlarda sönmüş kireç kullanımı daha iyi performansların elde edilmesini sağlayabilecektir.

Cam katkılı asfalt karışımında %3 oranında sönmüş kireç kullanıldığında soyulma önleyici katkı olarak davranmaktadır. Sönmüş kirecin soyulma önleyici özellikleri agrega ve cam parçacıkları ile bitüm arasında daha güçlü kohezyon oluşturmaktadır. Dahası, cam parçacıklarının yüksek köşeliliği geleneksel agregalarla kıyaslandığı zaman cam asfalt karışımının artan dinamik modül davranışında önemli bir rol oynamaktadır. %15 oranında kırılmış cam kullanıldığında, asfalt karışımının tekerlek izi açısından geleneksel yoğun gradasyonlu karışımdan daha iyi olabileceği ifade edilmiştir. 50°C’de yapılan tekerlek izi test sonucuna göre cam asfalt karışım daha yüksek akma sayısı göstermiş ve bu da tekerlek izine karşı daha düşük duyarlılığa sahip olduğunu ortaya koymuştur. Geleneksel karışım, cam katkılı asfalt karışımından çok az düzeyde daha iyi performans göstermesine rağmen yorulma performansları karşılaştırılabilmektedir. Bu yorulma davranışı, tipik saha koşullarında 20°C’lik sıcaklıkta, cam katkılı asfalt karışımının geleneksel karışımdan daha rijit olduğunu göstermiştir (Anochie-Boateng ve George, 2016).

Farklı kaynaklardan üretilen nano kil malzemelerin asfalt karışımlarda modifiyer olarak kullanılabilirliğinin araştırıldığı çalışmada, üç tip nano kil ürünü % 2, % 3.5 ve % 5 gibi farklı oranlarda kullanılmıştır. AASHTO T 283 su hasarı koşullamasına göre, nanokil katkı maddesinin oranına ve türüne bağlı olarak örneklerde daha yüksek tekerlek izi direnç artışı gözlemlenmiştir. Nanokil ile modifiye edilmiş TMA karışımlarda, kontrol karışımlara göre ortalama %50 daha fazla tekerlek izi direnci göstermiştir. %2 ve %3 oranında nano kil ile modifiye edilmiş karışımlar daha yüksek çekme mukavemeti göstermiştir. Yapılan mekanik test sonuçlarına göre %2 oranında nano kil içeriği soyulma, çatlama ve tekerlek izi problemine bağlı olarak bu problemleri iyileştirmede uygun bir oran olarak düşünülmüştür (İskender, 2016).

Soyulma ve su hasarı cam katkıli asfaltın bozulmasının en temel sebeplerindendir. Su hasarı, sıcak karışım asfaltta, adezyon ve kohezyon kaybından dolayı meydana gelmekte, kaplamanın rijitliğinin ve dayanımının azalmasına yol açmaktadır. Bu yüzden soyulma önleyici katkılar adezyonu iyileştirmek için karışıma eklenmektedir. Bunun için nano malzemeler karışıma eklenerek karışımın performansı iyileştirilmektedir. Cam katkıli asfalt karışım örneklerinde soyulma önleyici katkı olarak %4.5 nano zycosoil kullanıldığında örneklerin su hassasiyeti direnci geliştirdiği ifade edilmiştir. Nano zycosoil ilavesi örneklerin çekme mukavemeti değerlerinde önemli bir artış göstermiştir. Nano zycosoil ile modifiye edilmiş karışımlar statik yükleme altında dolaylı çekme mukavemeti testinde kırılma esnasında daha yüksek çekme mukavemeti değerine ulaşmıştır. Bunun da karışımın çatlama öncesi daha büyük çekme gerilmelerine dayanabildiğini ortaya koymuştur (Behbahani, 2015).

Nanoteknolojik zycosoil soyulma önleyici katkı olarak cam katkıli asfalt örneklerinde %2.5-4.5 oranında kullanıldığında, kontrol karışımla kıyaslandığı zaman su duyarlılığını geliştirmiştir. %2.5 nano zycosoil içeren cam katkıli asfalt karışımın TSR değerini kontrol karışıma kıyasla yaklaşık %8.6 oranında artırırken, %4.5 nano zycosoil ilavesi ise TSR değerini yaklaşık %21.3'e kadar artırmıştır. Bitümün %2.5 içeriğinden fazla nano zycosoil ilavesi camsız karışımlarla (%0) kıyaslandığı zaman cam katkıli asfalt karışımın performansını arttırdığını göstermiştir (Behbahani, 2015).

Kırılmış atık camın asfalt karışımında maksimum miktarının belirlenmesi için asfalt karışımın tekerlek izi direnci, termal çatlama direnci ve rijitlik modülü araştırılmıştır. İki farklı kırılmış cam boyutu 0-0.315mm ve 0.630-2.5mm seçilirken, bu iki cam boyutu kütlece %5, %10, %15, %20 ve %25 cam içeriklerinde agrega yerine kullanılmıştır. Yapılan test sonuçları geleneksel asfalt karışımı ile karşılaştırılmış ve asfalt karışımında geri dönüştürülmüş cam kullanılması, bağlayıcı içeriğini azaltmış, karışımın işlenebilirliğini arttırmış ve tekerlek izi direncini azaltmıştır. Asfalt karışımında %10 oranında camın kullanılması, karışımın rijitliği kadar termal çatlama direncini etkilemediği bulunmuştur. Öte yandan, soyulma direnci, camın varlığından olumsuz etkilenmiştir. Çalışmanın ikinci kısmında %10 cam içeriğindeki karışım (modifiye bağlayıcı içeriği) ve referans karışımın termo-mekanik performansı ve dayanıklılığı değerlendirilmiştir. Cam katkıli asfalt için bağlayıcı içeriği azalırken tekerlek izi direncinin arttığı gözlemlenmiştir. Düşük bağlayıcı içeriğindeki cam katkıli asfaltın tekerlek izi direnci, referans karışımından bile daha yüksek

çıkıştır. Asfalt karışımın cam ile termal çatlama ve karışım sertliğine karşı direncinin referans karışıminkine eşdeğer olduğu bulunmuştur (Lachance-Tremblay vd., 2016).

Cam katkılı asfaltın dinamik özelliklerinin araştırıldığı çalışmada daha fazla döngü uygulaması, daha az cam kırıkları içeren örneklerin gerilmesini arttırmıştır. Bu durum, cam kırıklarının yüzdesinin artmasıyla örneklerde daha çok köşelilik ve dolgun bir yapı dokusu etkisinin bir sonucu olmuştur. Daha fazla cam parçacıklarının eklenmesiyle, %15'den fazla cam kırıkları içeren örneklerde gerilme önlemleri artmaktadır. Düşük cam kırığı yüzdesine sahip örneklerde yorulmaya bağlı çatlaklar, çok daha erken meydana gelebilmektedir. Cam kırığının artması örneklerde çatlak oluşumunda, agrega ve cam kırıkları arasında artan bağlanma nedeniyle oluşmakta, mikron ölçeğinde daha büyük bir derinlikle yayılmasını önlemek için çatlak oluşumuna izin vermektedir. Cam parçacıklarının miktarının artması asfalt örneklerinin kalıcı deformasyonunu azaltmıştır. Rijitlik modülü bu deformasyonları azaltmaktadır. Agregalar ile daha kaba cam parçacıkları arasındaki daha iyi kenetlenme deformasyon miktarını yavaş bir şekilde azaltabilmektedir (Shafabakhsh ve Sajed, 2014).

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, atık camların asfalt karışımlarda agrega olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Geleneksel asfalt betonu (yoğun gradasyon) ve taş mastik asfalt (kesikli gradasyon) ile çalışılmıştır. Her iki karışımda da bazalt agregası temel agrega olarak kullanılmıştır. Cam agregalar laboratuarda konkasörde kırılarak standart ASTM eleklerden elenmiştir. Yoğun gradasyonlu karışımda maksimum cam boyutu olarak 9.5mm, 4.75mm, 2.00mm ve 0.075mm kullanılmıştır. Kesikli gradasyonda ise 4.75mm, 2.00mm ve 0.075mm maksimum boyutlarda cam agregalar kullanılmıştır. Kullanılan cam agregaların gradasyon eğrisi normal agregaların gradasyon eğrileri ile aynı seçilmiştir. Cam agregalar bazalt agregalarının yerine ikame olarak kullanılmıştır. Karışımlarda geleneksel 50/70 penetrasyon dereceli bitümün yanı sıra cam agregaların soyulma eğilimlerinden dolayı nanokil ve sönmüş kireç modifiye bitümler de kullanılmıştır. Nanokil bitüm ağırlığının %3'ü oranında ve sönmüş kireç de bitüm ağırlığının %2'si oranında high shear mikser ile bitüme ilave edildi. Her bitüm ve gradasyon türü için Marshall tasarım yöntemi ile bitüm içerikleri belirlendi. Belirlenen bitüm içeriklerinde 100mm çaplı Marshall briketleri hazırlanarak modifiye Lottman (AASHTO T 283), dolaylı çekme mukavemeti (ITS), tekrarlı yük sünme (RC), Hamburg tekerlek izi (HWT) testleri ile düşük sıcaklık çatlama, su hasarına karşı direnç ve kalıcı deformasyon potansiyelleri yönünden değerlendirme yapılmıştır. Testlerde koşullu ve koşulsuz örnekler kullanılmıştır. HWT testinde yoğurmalı pres ile hazırlanan 150mm çaplı briketler test edilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

Marshall tasarım yöntemi ile belirlenen optimum bitüm içerikleri nanokil ve sönmüş kireç modifiye bitümlerde geleneksel bitümlere göre daha yüksek çıkmıştır. Bu durumun, kullanılan modifiyerlerin yüksek yüzey alanlarından dolayı daha fazla bitüm tarafından sarılmasından dolayı olduğu düşünülmektedir. Taş mastik asfaltlarda geleneksel bağlayıcı, sönmüş kireç modifiye bitüm ve nanokil modifiye bitüm ile yapılan tasarımlarda sırasıyla 6.65, 7.03 ve 6.9 değerleri hesaplanırken yoğun gradasyonda 5.30, 5.63 ve 5.63 değerleri hesaplanmıştır. Yoğun gradasyonlu karışımlarda nanokil modifiye ve sönmüş kireç modifiye bitümler aynı sonucu vermiş fakat daha fazla filler içeren kesikli gradasyonda nanokilin daha ince yapısından dolayı optimum bitüm içeriği artmıştır.

Düşük sıcaklık çatlama testini değerlendirmek üzere 0°C sıcaklıkta AASHTO T 283 koşullarında yapılmış örnekler dolaylı çekme mukavemeti testi yapılmıştır. Test sonuçlarına göre, cam agregası içermeyen karışımlarda kesikli gradasyonlu karışımlar ile yoğun gradasyonlu karışımlar birbirine yakın değerler göstermiştir. Sönmüş kireç veya nanokil modifiyesi ile çatlama direnci de artmıştır. Kesikli gradasyonlu karışımlarda nanokil ve sönmüş kireç modifiyeli bağlayıcılar birbirine çok yakın performanslar sergilemiştir. Ancak yoğun gradasyonlu karışımlarda ise sönmüş kireç modifikasyonu ile daha iyi çatlama dirençleri oluşmuştur.

Düşük sıcaklık çatlama testinden, kesikli gradasyonlu karışımlara cam agregası ilavesi ile çatlama dirençlerinde düşüş görülmüştür. Modifiye bağlayıcı kullanılarak performans biraz artmasına rağmen cam agregasız olanların seviyesine çıkılamamıştır. Yoğun gradasyonlu karışımlarda ise cam agregası ilavesi ile çatlama direncinde 0.075mm ve 2.00mm maksimum boyutlarda artış sağlanmıştır. Geleneksel bağlayıcı ve nanokil modifiye bağlayıcılı olanlarda 2.00mm maksimum boyutta cam agregası kullanılan seçeneklerde en yüksek çekme mukavemetlerine ulaşılmıştır. Sönmüş kireç modifiyeli bitüm kullanılması durumunda 0.075mm boyutunda cam agregası kullanılması ile en yüksek performansa ulaşılmıştır.

Karışımların su hasarına karşı direnci modifiye Lottman deneyi ile belirlenmiştir. Kesikli gradasyonlu karışımlar su hasarına karşı yoğun gradasyonlu karışımlardan daha hassas olmuştur. Kesikli gradasyonlu karışımlarda geleneksel ve sönmüş kireç modifiye bağlayıcı kullanılması durumunda cam agregası ilavesi ile su hasarı direncinde dramatik bir düşüş görülmüştür. Ancak nanokil modifiye bağlayıcı kullanıldığında cam agregası eklenen bütün seçeneklerde ITSR değeri 0.80 eşik değerinin üzerinde çıkmıştır.

Yoğun gradasyonlu karışımlarda, hiç cam agregası kullanılmayan seçenekler, cam agregası kullanılanlara göre daha yüksek su hasarı direnci göstermiştir. Geleneksel bağlayıcı kullanıldığı durumda 0.075mm boyutta cam agregası kullanılması ile ITSR değeri 0.86'dan 0.97'ye çıkmıştır. Cam agregası boyutunun daha da arttırılması ile ITSR değeri şartname limitlerinin altına düşmüştür. Nanokil ve sönmüş kireç modifiye bitüm kullanılan cam agregalı seçeneklerde en yüksek ITSR değerleri 1.09 ve 0.92 ile 2.00mm maksimum cam agregası boyutlarında elde edilmiştir. Modifiye bitüm kullanılması durumunda yalnızca 9.5mm maksimum boyutta cam agregası kullanılan seçeneklerde şartname limitinin altında kalmıştır.

Koşulsuz örneklere 40°C sıcaklıkta yapılan tekrarlı yük sünme testlerinde, kesikli gradasyonlu karışımlarda cam agregaya boyutu artması ile deformasyon miktarları da artmıştır. En küçük deformasyon değeri sönmüş kireç modifiyeli ve cam agregaya içermeyen karışımda görülmüştür. Katkıların pozitif etkinliği bütün cam boyutlarında kendini göstermiştir. Yoğun gradasyonlu karışımlarda, 0.075mm maksimum boyutta cam agregaya ilavesi ile hem geleneksel bitümlü hem de modifiye bitümlü seçeneklerde deformasyon oluşumu potansiyelinde azalma görülmüştür.

Koşullu örneklere 40°C sıcaklıkta yapılan tekrarlı yük sünme testlerinde, kesikli gradasyonlu karışımlarda, nanokil modifiye bağlayıcı kullanılan seçeneklerde en küçük deformasyonlar oluşmuştur. Kesikli gradasyonlarda 2.00mm maksimum cam boyutu kullanılması ile en yüksek deformasyon direncine ulaşılabilmektedir. Yoğun gradasyonlu karışımlarda da benzer olarak 2.00mm maksimum boyutta cam agreganın nanokil modifiye bitümlü kullanıldığı durumda en büyük deformasyon direncine ulaşılmıştır. Daha sonra sırasıyla 0.075mm ve 4.75mm cam agregaların kullanıldığı seçenekler iyi deformasyon dirençleri oluşturmuştur. En kötü performansı 9.5mm maksimum boyutlu cam agreganın kullanıldığı karışımlar göstermiştir.

Tekrarlı yük sünme deneylerinin etkinliği koşullu örneklerde daha iyi görülmüştür. Bu durum muhtemelen sönmüş kireç ve nanokil etkinliğinin koşullama ile ortaya çıkması ile ilgilidir.

Hamburg tekerlek izi testi 40°C sıcaklıkta, su içerisinde yapıldı. Geleneksel bitüm ile hazırlanan karışımlarda cam agregaya boyutunun artmasıyla doğru orantılı olarak deformasyon miktarları da artmıştır. Fakat modifiye bitüm kullanılması durumunda sırasıyla en iyi deformasyon dirençlerini 2.00mm, 0.075mm ve 4.75mm maksimum boyutlarda cam agregaya içeren karışımlar göstermiştir.

Hamburg tekerlek izi testi sonuçlarına göre kesikli gradasyonlu karışımlar yoğun gradasyonlu karışımlardan daha yüksek deformasyon direnci göstermiştir. Bu durum tekrarlı yük sünme testi sonuçlarından farklıdır. Tekrarlı yük sünme testlerinde toplam geri dönemeyen deformasyon birikimli olarak ölçülmektedir. Tekerlek izi testlerinde ise, deformasyon eğrisinin ikincil bölgedeki eğim esas alınmaktadır. Bu durumda, ilk bölgedeki deformasyon sıkışma olarak kabul edilmektedir.

Soyulma probleminin değerlendirilmesinde Hamburg tekerlek izi testi ile modifiye Lottman testi arasında anlamlı bir ilişki gözlemlenmiştir. Hamburg tekerlek izi testinde en iyi sonuçlar sırasıyla 0.075mm maksimum boyutta cam agregaya içeren nanokil ve sönmüş

kireç modifiye bitümlü karışımlar, 2.00mm maksimum boyutlu cam agregası içeren nanokil modifiye bitümlü karışımlar vermiştir. Modifiye Lottman yönteminde ise 2.00mm maksimum cam agregası boyutlu nanokil modifiye bitümlü karışımlar ve 0.075mm cam agregası içeren nanokil modifiye bitümlü karışımlar vermiştir. Sıraları değişik olmakla birlikte ilk iki sıradaki karışımlar iki yöntemde de aynıdır.

Bütün test sonuçları genel olarak değerlendirildiğinde, 2.00mm maksimum boyutta cam agregalarının soyulma önleyici katkılarıyla birlikte asfalt karışımların aşınma tabakalarında kullanılabileceği görülmüştür. Çalışmada kullanılan oranlar göz önüne alınarak cam agregalarının optimum kullanım oranları, geleneksel asfalt betonu için %15 ve taş mastik asfalt için %12 olarak bulunmuştur.

Su hasarı direnci açısından Hamburg tekerlek izi testi ile modifiye Lottman testi en dirençli karışımlar açısından benzer sonuçlar vermiştir. Ancak bütün karışımlarda deformasyon direnci açısından sıralama yapıldığında birbir örtüşen sonuçlar ortaya çıkmamıştır. Bu durumun sebeplerinden bir tanesinin laboratuvarında hazırlanan karışım örneklerinin farklı yöntemlerle hazırlanması olduğu düşünülmektedir. Marshall yöntemine göre briket hazırlanırken darbeli sıkıştırma etkisi altında degradasyon oluşabilmektedir. Ancak Hamburg tekerlek izi cihazında yoğurmalı sıkıştırma ile örnek hazırlanmaktadır. Diğer bir sebep olarak da örnek boyutlarının farklılığı olarak düşünülmektedir. Bu ilişkinin daha sağlıklı olarak araştırılması için aynı sıkıştırma yöntemlerinin ve briket çaplarının kullanılmasının daha yararlı olacağı kanaati oluşmuştur. Son olarak da test sıcaklıklarının farklılığının sonuçların korelasyonu üzerinde etki oluşturabileceği düşünülmektedir.

Cam agregalarının yüksek silis içeriği, düşük porozitesi soyulma problemini kullanımının zorunlu olduğu, katkı oranlarının da normalden daha fazla seçilmesi gerektiği anlaşılmıştır. Daha sonra yapılacak çalışmalar için karışımın hacimsel özelliklerinin de göz önüne alınarak nanokil veya sönmüş kireç oranının %6'ya kadar kontrollü olarak kullanılması önerilmektedir.

5. KAYNAKLAR

- AASHTO T 283-03., 2014. Standard Method of Test for Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.
- Aksoy, A. ve İskender, E., 2008. Creep in Conventional and Modified Asphalt Mixtures, Proceedings of the Institution of Civil Engineers Transport, 161, 4, 185-195.
- Aksoy, A., 2002. Bitüm Reolojik Yapısının Bitümün Yaşlanmasına Ve Kaplamanın Performansına Olan Etkisinin İncelenmesi, Uluslar arası Yol Trafik ve Yol Güvenliği Kongresi-Fuarı, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- Al-Saffar, N.A.H., 2013. The Effect of Filler Type and Content on Hot Asphalt Concrete Mixtures Properties, Al-Rafidain Engineering, 21, 6, 88-100.
- Anochie-Boateng, J.K. ve George, T.B., 2016. Laboratory Investigation of the Performance Properties of Hot Mix Asphalt Containing Waste Glass, 35th Southern African Transport Conference.
- Apeageyi, A.K., Buttlar, W.G. ve Dempsey B.J., 2006. Moisture Damage Evaluation of Asphalt Mixtures using AASHTO T283 and DC(T) Fracture Test, Conference Paper, University of Illinois at Urbana, U.S.A.
- Arabani, M. ve Kamboozia, N., 2013. The Linear Visco-Elastic Behaviour of Glasphalt Mixture under Dynamic Loading Conditions. Construction and Building Materials, 41, 594-601.
- Arabani, M., 2011. Effect of Glass Cullet on the Improvement of the Dynamic Behaviour of Asphalt Concrete, Construction and Building Materials, 25, 1181-1185.
- Arabani, M., Mirabdolazimi, S.M. ve Ferdowsi, B., 2012. Modeling the Fatigue Behaviors of Glasphalt Mixtures, Scientia Iranica A, 19, 3, 341-345.
- Arnold, G., Werkemeister, S. ve Alabaster, D., 2008. The Effect of Adding Recycled Glass on the Performance of Base Course Aggregate, NZ Transport Agency Research Report No. 351, 40 p.
- Aschenbrener, T., 1995. Evaluation of the Hamburg Wheel-Tracking Device to Predict Moisture Damage in Hot-Mix Asphalt, Transportation Research Record 1492, Transportation Research Board, Washington, D.C., 193-201.
- 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. CDOT-DTD-R-94-1, Colorado Department of Transportation, Denver, Colorado.

- Asphalt Task Force, 2010. Hydrated Lime: A Proven Additive for Durable Asphalt Pavements, Critical Literature Review, European Lime Association.
- Atkins, C. ve Macdonald, M., 2009. Sustainability of Construction Materials, Jamal Woodhead Publishing Limited and CRC Press, UK, 171-183.
- Bahia, H. ve Ahmad, S., 1999. Evaluation and Correlation of Lab and Field Tensile Strength Ratio (TSR) Procedures and Values in Assessing the Stripping Potential of Asphalt Mixes. WisDOT Study Highway Research, 95-04.
- Behbahani, H., Ziari, H., Kamboozia, N., Khaki, A.M. ve Mirabdolazimi, S.M., 2015. Evaluation of Performance and Moisture Sensitivity of Glasphalt Mixtures Modified with Nanotechnology Zycosoil as an Anti-Stripping Additive, Construction and Building Materials, 78, 60-68.
- Behiry, A.E.A.E.M., 2013. Laboratory Evaluation of Resistance to Moisture Damage in Asphalt Mixtures, Ain Shams Engineering Journal, 4, 351-363.
- Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, 2014. Ulusal Geri Dönüşüm Strateji Belgesi ve Eylem Planı (2014-2017).
- Birgisson, B., Roque, R., ve Page, G. 2003. Evaluation of Water Damage Using Hot Mix Asphalt Fracture Mechanics. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 73, 424-462.
- Brown, E.R., Kandhal, P.S. ve Zhang, J., 2001. Performance Testing for Hot Mix Asphalt, National Center for Asphalt Technology Report No.01-05, Auburn University, Alabama.
- Buss, A., Williams, R.C. ve Schram, S. 2016. Evaluation of Moisture Susceptibility Tests for Warm Mix Asphalts, Construction and Building Materials, 102, 358-366.
- Büyüksaraçoğlu, Y., 2009. Asfalt Yol İnşaatının Tedarik Zincirinin Simülasyon Tabanlı Modellenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- City of Hamburg, 1991. Tracking Test, Determination of the Track Depth of High-Stability Binding Layers. Construction Bureau, Civil Engineering Office, Department of City Traffic, Hamburg, Germany.
- Clean Washington Centre (CWC), 1996. Best Practices in Glass Recycling, Recycled Glass in Asphalt, End-Use Applications, Glassphalt, 1-2.
- 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.
- Çevre ve Orman Bakanlığı, 2008. Atık Yönetimi Eylem Planı (2008-2012), Ankara.

- Çubuk, M., 2007. Katkı Maddeleri ile Bitümün Reolojik Özelliklerinin Geliştirilmesi ve Esnek Kaplama Malzeme Oluşumunda Problemlerin Giderilmesi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Dalloul, K.N., 2013. Study of the Effect of Crushed Waste Glass as Coarse Sand and Filler in the Asphalt Binder Course, Master Thesis, The Islamic University of Gaza, Infrastructure Engineering.
- Federal Highway Administration, 2012. User guidelines for waste and byproduct materials in pavement construction: Waste glass, U.S. Department of Transportation.
- Finkle, I., Ksaibati, K. ve Robinson, T., 2007. Recycled Glass Utilization in Highway Construction, In Transportation Research Board 86th Annual Meeting, Washington D.C.
- Greer, G., 2006. Stone Mastic Asphalt- A Review of Its Noise Reducing and Early Life Skid Resistance Properties, In Proceedings of ACOUSTICS, 319-323.
- Grim, R. E., 1959. Physico-Chemical Properties of Soils: Clay Minerals, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 85, 2, 1-17.
- Güven, S. ve Gündüzalp, A.A., 2016. Atık, Çeşitleri, Atık Yönetimi, Geri Dönüşüm ve Tüketici: Çankaya Belediyesi ve Semt Tüketicileri Örneği, Sosyolojik Araştırmalar E-Dergisi, Hacettepe Üniversitesi.
- Hainin, R., Reshi, W.F. ve Niroumand, H., 2012. The Importance of Stone Mastic Asphalt in Construction, Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 17,49-56.
- Hanlı, E., 2009. Esnek Yol Üstyapısında Oluşan Bozulmalar ve Değerlendirmesi, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Hınıslioğlu, S. ve Ağar, E. 2004. Use of Waste High Density Polyethylene as Bitumen Modifier in Asphalt Concrete Mix, Materials Letters, 58, 267-271.
- Huang, Y., Bird, R.N. ve Heidrich, O., 2007. A Review of the Use of Recycled Solid Waste Materials in Asphalt Pavements, Resources, Conservation and Recycling, 52, 58-73.
- Ilıcalı, M., Tayfur, S., Özen, H., Sönmez, İ. ve Eren, K., 2001. Asfalt ve Uygulamaları, İSFALT Bilimsel Yayınları, No: 1, 280 s.
- Issa, Y., 2016. Effect of Adding Crushed Glass to Asphalt Mix, Archives of Civil Engineering, 62, 2.
- İskender, E., 2008. Koşullandırma Sistemlerinin Geleneksel ve Modifiye Asfalt Karışımlar Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması, Doktora Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

- İskender, E., 2016. Evaluation of Mechanical Properties of Nano-Clay Modified Asphalt Mixtures, Measurement, 93, 359-371.
- Jasim, A.A., 2014. By Using Waste Glass as Secondary Aggregates in Asphalt Mixtures, International Journal of Advanced Research, 2, 1, 41-46.
- Jony, H.H., Al-Rubaie, M.F. ve Jahad, I.Y., 2011. The Effect of Using Glass Powder Filler on Hot Asphalt Concrete Mixtures Properties, Engineering & Technology, 29, 1, 44-57.
- KTŞ, 2013. Karayolu Teknik Şartnamesi, Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Kandhal, P.S., 1992. Waste Materials in Hot Mix Asphalt: An Overview, National Center for Asphalt Technology 92-06, Auburn University, Alabama.
- Lachance-Tremblay, E., Vaillancourt, M. ve Perraton, D., 2016. Evaluation of the Impact of Recycled Glass on Asphalt Mixture Performances, Road Materials and Pavement Design, 17, 3, 600-618.
- Lee Jr, L.T., 2007. Recycled Glass and Dredged Materials, Engineer Research and Development Center Vicksburg, MS Geotechnical and Structures Laboratory.
- 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.
- Liao, Y., Wu, H. ve Yi, L., 2014. The Enhancement Effect of Hydrated Lime on Glassphalt Concrete, Applied Mechanics and Materials, Trans Tech Publications, 670-671, 423-427.
- Little, D.N. ve Epps, J.A., 2001. The Benefits of Hydrated lime in Hot-Mix Asphalt, Report prepared for the National Lime Association, Arlington, Virginia.
- Lottman, R.P., 1978. NCHRP Report 192, Predicting Moisture-Induce to Asphaltic Concrete, Transportation Research Board, National Highway Research Council, Washington, D.C.
- MEB., 2011. Aile ve Tüketici Hizmetleri Katı Atıklar, Milli Eğitim Bakanlığı, Ankara.
- Maupin, G.W., 1998. Effect of Glass Concentration on Stripping of Glasphalt, Final Report, in Cooperation with the U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration Charlottesville, Virginia.
- McAsphalt Industries Limited, 2012. Basic Asphalt Materials Mixture Design and Testing, Technician Training Manual, Technical Bulletin.
- Myers, N.M., 2007. Stone Matrix Asphalt The Washington Experience, Master of Science in Civil Engineering, University of Washington.

- NCHRP., 2011. A Manual for Design of Hot-Mix Asphalt with Commentary, National Cooperative Highway Research Program, Report 673.
- Navarro, F.M., Martinez, M.P., Marin, J.M, Sanchez, M.S ve Gamez, M.C.R, 2015. Mechanical Performance of Asphalt Mixes Incorporating Waste Glass, *Baltic Journal of Road Bridge Engineering*, 10, 3, 255-261.
- Orhan, F., 2012. Bitümlü Karışımlar Laboratuvarı Çalışmaları, Araştırma Geliştirme Dairesi Başkanlığı Üstyapı Geliştirme Şubesi Müdürlüğü, Ankara.
- Özünel, S. ve İmat, F., 2016. Atık Camlardan Cam Beton Üreterek Mimari ve Dekoratif Amaçlı Olarak Yararlanma, *International Periodical for the Languages*, 11, 2, 1049-1064.
- Rahman, F. ve Hossain, M., 2014. Review and Analysis of Hamburg Wheel Tracking Device Test Data, Report No. KS-14-1, Kansas State University Transportation Center, Kansas Department of Transportation Topeka, Kansas.
- Salem, Z.T.A., Khedawi, T.S., Baker, M. B., ve Abendeh, R., 2017. Effect of Waste Glass on Properties of Asphalt Concrete Mixtures, *Jordan Journal of Civil Engineering*, 11, 1.
- Savcı, S. ve Dikmen, Ç.B., 2015. İnşaat Sektöründe Geri Dönüşüm Kaynağı Olarak Cam Malzemelerin Yeniden Kullanımı, 2nd International Sustainable Buildings Symposium 28- 30th May, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- Schmidt, R. J., and Graf, P. E., 1972. The Effect of Water on the Resilient Modulus of Asphalt Treated Mixes. Proc., Association of Asphalt Paving Technologists, 41, 118-162.
- SHA, A.M., Lu, X. ve Lin, R.Y., 2014. Evaluation of Reflective Property and Research of Road Performance of Glassphalt Concrete. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 3, 007.
- Shafabakhsh, G., Sadeghnejad, M. ve Chelovian, A., 2015. Experimental Study on Creep Behavior of Stone Mastic Asphalt by Using of Nano Al₂O₃, *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 6, 10, 903-911.
- Shafabakhsh, G.H. ve Sajed, Y., 2014. Investigation of Dynamic Behavior of Hot Mix Asphalt Containing Waste Materials; Case Study: Glass Cullet, *Case Studies in Construction Materials*, 1, 96-103.
- Solaimanian, M., Harvey, J., Tahmoressi, M. ve Tandon, V., 2003. Test Methods for Determination of Moisture Damage ,National Moisture Sensitivity Seminar, San Diego, California February 4-6.
- Su, N. ve Chen, J.S., 2002. Engineering Properties of Asphalt Concrete Made with Recycled Glass, *Resources Conservation and Recycling*, 35, 259-274.

- Şengül, Ü., 2010. Atıkların Geri Dönüşümü ve Tersine Lojistik, Paradoks, Ekonomi, Sosyoloji ve Politika Dergisi, 6, 1, 73-86.
- TOBB., 2012. Türkiye Cam ve Cam Ürünleri Sanayi Meclisi Sektör Raporu, Türkiye Odalar ve Borsalar Birliği, Ankara.
- Tam, V.W.Y. ve Tam, C.M., 2006. A Review on the Viable Technology for Construction Waste Recycling, Resources, Conservation and Recycling, 47, 209-221.
- Tam, W.O., Solaimanian, M. ve Kennedy, T.W., 2000. Development and Use of Static Creep Test to Evaluate Rut Resistance of Superpave Mixes, Research Report No.1250-4, Center for Transportation Research, The University of Texas, Austin.
- Ulmgren, N., 1996. Functional Testing of Asphalt Mixes for Permanent Deformation by Dynamic Creep Test Modification of Method and Round Robin Test, Proceedings of the Eurasphalt & Eurobitume Congress, Ruhr University, Germany.
- URL-1, <http://www.pavementinteractive.org/fatigue-cracking/> Fatigue Cracking. 11 Nisan 2017.
- URL-2, <http://www.dykespaving.com/blog/fatigue-cracking-in-asphalt-2/> Fatigue Cracking in Asphalt. 11 Nisan 2017.
- URL-3, https://www.snscourseware.org/snsce/files/CW_5860bfff9f5dc/MECH%20PRO P%20&%20GRADING%20OF%20AGGREGATES.pdf . Grading of aggregates. 10.04.2017.
- URL-4, <https://www.geridonusum.com/atik-camlarin-geri-donusumu-nasil-yapilmaktadir-1830/> Atık Camların Geri Dönüşümü Nasıl Yapılmaktadır?.10 Şubat 2017.
- URL-5, <http://atiksahasi.com/Atik-Camlarin-Geri-Donusum-ve-Geri-Kazanim-Sureci-39>. 24 Nisan 2017.
- URL-6, <https://www.zerowasteurope.eu/category/waste/residual-waste/> Commission calls for defunding of waste-to-energy.30 Mart 2017.
- URL-7, <http://www.climatetechwiki.org/technology/recycl> Glass recycling rates in the EU-27. 28 Mart 2017.
- Vasconcelos, K.L., Bernucci, L.B. ve Chaves, J.M., 2012. Effect of Temperature on the Indirect Tensile Strength Test of Asphalt Mixtures, 5th Eurasphalt & Eurobitume Congress.
- Wartman, J., Grubb, D.G. ve Nasim, A.S.M., 2004. Select Engineering Characteristics of Crushed Glass, Journal of Materials in Civil Engineering, 16, 6, 526-539.

- Witczak, M.W., Kaloush, K., Pellinen, T., El-Basyouny, M., ve Quintus H.V., 2002. Simple Performance Test for Superpave Mix Design, National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) 465, Washington, D.C.
- Wu, S., Yang, W. ve Xue, Y., 2003. Preparation and Properties of Glass-asphalt Concrete, Key Laboratory for Silicate Materials Science and Engineering of Ministry of Education, Wuhan University of Technology, Wuhan, P.R China.
- Yang, J., ve Tighe, S., 2013. A Review of Advances of Nanotechnology in Asphalt Mixtures, Procedia - Social and Behavioral Sciences, 13th COTA International Conference of Transportation Professionals, 96, 1269-1276.
- Yetim, A., 2014. Geri Dönüşüm Sektörünün Dünyadaki Genel Görünümü ve Türkiye'deki Durumu Ar&Ge Bülten Sektörel.
- Yıldırım, Y., Jayawickrama, P.W., Hossain, M.S., Alhabshi, A., Yıldırım, C., Smit, A.D.F. ve Little, D.N., 2007. Hamburg Wheel-Tracking Database Analysis, Texas Transportation Institute, Texas A&M University System College Station, Texas.
- Ziari, H., Behbahani, H., Kamboozia, N. ve Ameri, M., 2015. New Achievements on Positive Effects of Nanotechnology Zyco-Soil on Rutting Resistance and Stiffness Modulus of Glasphalt Mix, Construction and Building Materials, 101, 752-760.

ÖZGEÇMİŞ

1993 yılında Trabzon’da doğdu. 2007 yılında Kömürcü İlköğretim Okulundan, 2011 yılında Trabzon Anadolu Lisesi’nden mezun oldu. 2015 bahar yarıyılı sonunda Karadeniz Teknik Üniversitesi Of Teknoloji Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölümünden “İnşaat Mühendisi” unvanıyla bölüm ve fakülte birincisi olarak mezun oldu. Aynı yıl başvurduğu Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda yüksek lisans yapmaya hak kazandı. Cansu İSKENDER İngilizce bilmektedir.

