

**T.C.  
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ÇÖP ATIKLARINDAN ELDE EDİLEN GEOPOLİMERLERİN SICAK  
KARIŞIM ASFALT KAPLAMALARDA KULLANIMININ ARAŞTIRILMASI**



**DOKTORA TEZİ**

**Ceren Beyza İNCE**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**HAZİRAN 2023**

T.C  
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇÖP ATIKLARINDAN ELDE EDİLEN GEOPOLİMERLERİN SICAK  
KARIŞIM ASFALT KAPLAMALARDA KULLANIMININ ARAŞTIRILMASI

DOKTORA TEZİ

Ceren Beyza İNCE  
(36193621036)

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Tacettin GEÇKİL

HAZİRAN 2023

## TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının her aşamasında benim yanımda olan, bu süreçte sadece “hoca” değil aynı zamanda abi, arkadaş ve dost olan, beni yönlendiren, büyük bir sabır ve özveri ile beni devamlı dinleyen çok değerli danışman hocam sayın Doç.Dr. Tacettin GEÇKİL’e,

Bu uzun yola başlamamda desteği ve emeği olan değerli aile büyüğüm Fırat Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyesi sayın Prof.Dr.Ragıp İNCE’ye, deneysel çalışmalarımın bir kısmı için Ege Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Ulaştırma Laboratuvarını kullanmamı sağlayan hocam sayın Prof.Dr.Perviz AHMEDZADE’ye, tez çalışmam boyunca bilgi ve tecrübelerinden devamlı yararlandığım hocam sayın Doç.Dr.Yunus ÖNAL’a,

Bununla birlikte, doktora eğitimim süresince desteğini ve yardımını hiçbir zaman esirgemeyen değerli abim sayın Öğr. Grv. Zülfikar AKSAĞAN’a, deneylerimin büyük bölümünde bana yol arkadaşı olan sayın İnş. Müh. Sena KOÇ’a ve bu süreçte devamlı yanımda olan Kimya Mühendisi Dr. Yeliz TOPTAŞ’a,

Tüm bu zorlu süreç boyunca, beni her daim destekleyip maddi-manevi her zaman yanımda olan sayın Tğm. Akif KARAMAN’a, bugünlere gelmemde çok fazla emeği olan, her zaman ve koşulda yanımda olan, bilgi, birikim ve tecrübelerinden her daim yararlandığım abim sayın İnş.Yük. Müh. Doğan İNCE’ye,

Hayatım boyunca bana her konuda daima güvenen ve benden dualarımı esirgemeyen, bu zorlu süreçte çoğu zaman ihmal etmek zorunda kaldığım değerli anne ve babama sonsuz sevgi, saygı ve şükranlarımı sunar,

teşekkür ederim.

Bu çalışma, İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi, FDK-2022-3005 numaralı projesi ile desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi’ne teşekkürü borç bilirim.

## ONUR SÖZÜ

Doktora tezi olarak sunduğum “Çöp Atıklarından Elde Edilen Geopolimerlerin Sıcak Karışım Asfalt Kaplamalarda Kullanımının Araştırılması” başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığına ve yararlandığım bütün kaynakların hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Ceren Beyza İNCE



## İÇİNDEKİLER

<b>TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ</b> .....	<b>ii</b>
<b>ONUR SÖZÜ</b> .....	<b>iii</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>iv</b>
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ</b> .....	<b>vii</b>
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....	<b>ix</b>
<b>SEMBOLLER VE KISALTMALAR</b> .....	<b>xiv</b>
<b>ÖZET</b> .....	<b>xv</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>xvi</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1 Tezin Amacı .....	4
1.2 Tezin Ana Hatları .....	5
<b>2. SICAK KARIŞIM ASFALTLAR</b> .....	<b>7</b>
2.1 Asfalt Bağlayıcılar .....	7
2.1.1 Asfaltın kimyasal bileşenleri .....	8
2.1.2 Asfaltın reolojisi .....	11
2.1.3 Geleneksel asfalt bağlayıcı testleri .....	16
2.1.3.1 Yumuşama noktası testi .....	17
2.1.3.2 Penetrasyon testi .....	17
2.1.3.3 Düktilite testi .....	18
2.1.3.4 Parlama ve yanma noktası testi .....	18
2.1.3.5 Özgül ağırlık testi .....	19
2.1.3.6 TFO testi .....	20
2.1.3.7 Depolama stabilitesi testi .....	20
2.1.4 Reolojik testler .....	21
2.1.4.1 RTFO testi .....	21
2.1.4.2 PAV testi .....	22
2.1.4.3 RV testi .....	23
2.1.4.4 DSR testi .....	24
2.1.4.5 BBR testi .....	27
2.1.4.6 MSCR testi.....	28
2.1.4.7 LAS testi .....	31
2.2 Agregalar .....	33
2.2.1 Agregalara uygulanan testler .....	34
2.2.1.1 Elek analizi testi .....	34
2.2.1.2 Özgül ağırlık testi ve su emme oranı tayini .....	35
2.2.1.3 Aşınmaya karşı direnç testi .....	36
2.2.1.4 Cilalanma testi .....	37
2.2.1.5 Yassı ve ince uzun taneler testi .....	37
2.2.1.6 Soyulma testi .....	38
2.2.1.7 Donma ve çözülme testi .....	38
2.3 HMA'dan Beklenen Özellikler .....	39
2.3.1 Stabilite.....	40
2.3.2 Kaymaya karşı direnç .....	40
2.3.3 Esneklik .....	40
2.3.4 Durabilite .....	40
2.3.5 Geçirimsizlik.....	41
2.3.6 Yorulmaya karşı direnç .....	41

2.3.7 İşlenebilirlik.....	41
2.4 HMA Kaplamalardan Meydana Gelen Bozulmalar .....	42
2.4.1 Yorulma çatlakları.....	42
2.4.2 Tekerlek izi.....	43
2.4.3 Termal çatlaklar.....	44
2.4.4 Ayrışmalar.....	46
2.5 HMA Tasarım Yöntemleri.....	46
2.5.1 Hveem tasarım yöntemi.....	47
2.5.2 Superpave tasarım yöntemi .....	47
2.5.3 Marshall tasarım yöntemi .....	48
2.6 HMA Testleri .....	49
2.6.1 Marshall stabilite ve akma testi .....	49
2.6.2 RMS testi .....	50
2.6.3 ITS testi .....	50
2.6.4 Modifiye Lottman testi.....	52
2.6.5 ITSM testi .....	53
2.6.6 Sünme testi .....	54
2.6.7 Dolaylı çekme yorulma testi.....	58
2.7 Malzemelerin Karakterizasyonu .....	60
2.7.1 SEM analizi .....	61
2.7.2 XRD analizi .....	61
2.7.3 FT-IR spektroskopisi .....	61
2.7.4 Elementel analiz .....	61
<b>3. MODİFİKASYON VE LİTERATÜR ÇALIŞMALARI .....</b>	<b>62</b>
3.1 Modifikasyonun Amaçları .....	62
3.2 Modifikasyonda Kullanılan Katkı Malzemeleri .....	65
3.2.1 Atık malzemeler .....	69
3.2.2 Biyokütle.....	70
3.2.3 Biyokütle dönüşüm yöntemleri .....	72
3.2.3.1 Doğrudan yakma .....	74
3.2.3.2 Havasız çürütme.....	74
3.2.3.3 Fermantasyon .....	74
3.2.3.4 Gazlaştırma .....	74
3.2.3.5 Biyofotoliz .....	75
3.2.3.6 Piroliz .....	75
3.2.4 Evsel atıklar.....	76
3.2.4.1 Geopolimer .....	84
3.2.4.2 Geopolimer kullanım alanları .....	87
3.3 Literatür Çalışmaları .....	89
<b>4. MATERYAL VE METOT .....</b>	<b>104</b>
4.1 Materyal .....	104
4.1.1 Asfalt bağlayıcı .....	104
4.1.2 Agregata .....	105
4.1.3 Çöp atığı külü (ÇAK) .....	106
4.1.4 Alkali aktivatör (AA).....	107
4.2 Metot .....	108
4.2.1 Geopolimer modifiyeli bağlayıcıların hazırlanması .....	108
4.2.2 Geopolimer katkılı sıcak karışım asfaltların hazırlanması .....	110
<b>5. DENEYSEL BULGULAR.....</b>	<b>113</b>
5.1 Bağlayıcıların Geleneksel Test Sonuçları .....	113

5.2 Depolama Stabilitesi Test Sonuçları .....	119
5.3 Bağlayıcıların Kısa ve Uzun Dönem Yaşlandırma Test Sonuçları .....	121
5.4 Bağlayıcıların Reolojik Test Sonuçları .....	128
5.4.1 RV test sonuçları.....	128
5.4.2 DSR test sonuçları.....	136
5.4.3 BBR test sonuçları .....	146
5.4.4 Bağlayıcıların ölçülen ve belirlenen performans sınıfları .....	149
5.4.5 LAS test sonuçları .....	152
5.4.6 MSCR test sonuçları .....	155
5.5 Bağlayıcıların Karakterizasyon Sonuçları .....	162
5.5.1 Yaşlandırılmamış bağlayıcıların sonuçları .....	162
5.5.1.1. SEM analizi sonuçları.....	163
5.5.1.2 XRD analizi sonuçları .....	166
5.5.1.3 FT-IR spektroskopisi sonuçları.....	170
5.5.1.4 Element analizi sonuçları .....	174
5.5.2 Kısa dönem yaşlandırılmış bağlayıcıların sonuçları.....	175
5.5.2.1 SEM analizi sonuçları.....	175
5.5.2.2 XRD analizi sonuçları .....	177
5.5.2.3 FT-IR spektroskopisi sonuçları.....	179
5.5.2.4 Element analizi sonuçları .....	181
5.5.3 Uzun dönem yaşlandırılmış bağlayıcıların sonuçları.....	182
5.5.3.1 SEM analizi sonuçları.....	182
5.5.3.2 XRD analizi sonuçları .....	184
5.5.3.3 FT-IR spektroskopisi sonuçları.....	186
5.5.3.4 Element analizi sonuçları .....	188
5.6 Sıcak Karışım Numunelerinin Hazırlanması.....	188
5.6.1 Optimum asfalt içeriğinin tespit edilmesi .....	192
5.7 HMA'lar Üzerinde Uygulanan Performans Deneyleri .....	198
5.7.1 Marshall stabilite ve akma test sonuçları .....	200
5.7.2 RMS test sonuçları .....	202
5.7.3 ITS ve Modifiye Lottman test sonuçları .....	203
5.7.4 ITSM test sonuçları .....	208
5.7.5 Statik sünme test sonuçları .....	211
5.7.6 Dinamik sünme test sonuçları .....	214
5.7.7 Yorulma test sonuçları .....	218
<b>6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....</b>	<b>231</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>236</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>251</b>

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1 : MSCR testine göre bağlayıcıların PG sınıflaması. ....	30
Çizelge 2.2 : Yassı ve uzun tane kriteri. ....	38
Çizelge 2.3 : Teste tabi tutulan malzeme miktarları ve kullanılan elekler. ....	39
Çizelge 3.1 : Bağlayıcı katkı malzemelerinin genel sınıflandırması. ....	66
Çizelge 3.2 : Bağlayıcı modifikasyon tipleri. ....	66
Çizelge 3.3 : Ülkemizdeki potansiyel biyokütle enerji miktarı. ....	72
Çizelge 3.4 : Biyokütle kaynakları, dönüşümler, yakıtlar ve kullanım alanları. ....	73
Çizelge 3.5 : Çalışmaya ait fiziksel bulgular. ....	98
Çizelge 4.1 : Asfaltın özellikleri. ....	105
Çizelge 4.2 : Agreganın fiziksel özellikleri. ....	105
Çizelge 4.3 : Agregada gradasyonu. ....	106
Çizelge 4.4 : Çöp atığı küllerinin özellikleri. ....	107
Çizelge 4.5 : Element analizi sonuçları. ....	107
Çizelge 4.6 : XRF analizi sonuçları. ....	107
Çizelge 4.7 : Sodyum silikatın özellikleri. ....	108
Çizelge 4.8 : Bağlayıcıların adlandırılması. ....	109
Çizelge 4.9 : Karışım numunelerinin adlandırılması. ....	110
Çizelge 5.1 : Geleneksel test sonuçları. ....	113
Çizelge 5.2 : Bağlayıcıların PI değerleri. ....	118
Çizelge 5.3 : Depolama stabilitesi sonrası yumuşama noktası değerleri (°C). ....	119
Çizelge 5.4 : Depolama stabilitesi sonrası penetrasyon değerleri (0.1mm). ....	119
Çizelge 5.5 : Bağlayıcıların bünyesinde meydana gelen ortalama kütle kayıpları. ....	121
Çizelge 5.6 : Kısa ve uzun dönem yaşanan bağlayıcıların fiziksel test sonuçları. ....	123
Çizelge 5.7 : Bağlayıcıların kalıcı penetrasyon ve yumuşama noktası farkı değerleri. ....	128
Çizelge 5.8 : Bağlayıcıların viskozite değerleri. ....	129
Çizelge 5.9 : Bağlayıcıların modifikasyon indeksi değerleri. ....	129
Çizelge 5.10 : Bağlayıcılara ait karıştırma- sıkıştırma sıcaklık aralıkları. ....	131
Çizelge 5.11 : Bağlayıcıların A-VTS değerleri ve ortalama uygulama sıcaklıkları. ....	135
Çizelge 5.12 : Yaşlandırılmamış kül katkıli bağlayıcıların DSR sonuçları. ....	136
Çizelge 5.13 : Yaşlandırılmamış geopolimer katkıli bağlayıcıların DSR sonuçları. ....	137
Çizelge 5.14 : RTFOT kalıntısı kül katkıli bağlayıcıların DSR sonuçları. ....	140
Çizelge 5.15 : RTFOT kalıntısı geopolimer katkıli bağlayıcıların DSR sonuçları. ....	141
Çizelge 5.16 : PAV kalıntısı bağlayıcıların DSR sonuçları. ....	144
Çizelge 5.17 : Bağlayıcıların BBR deney sonuçları. ....	147
Çizelge 5.18 : Bağlayıcılara ait PG ve MG değerleri. ....	149
Çizelge 5.19 : MSCR deneyi R (kPa <sup>-1</sup> ) sonuçları. ....	156
Çizelge 5.20 : MSCR deneyi J <sub>nr</sub> (kPa <sup>-1</sup> ) sonuçları. ....	158
Çizelge 5.21 : MSCR PG Plus adlandırması. ....	160
Çizelge 5.22 : MSCR PG Plus adlandırması. ....	160
Çizelge 5.23 : Bağlayıcıların J <sub>nr_diff</sub> ve %R <sub>diff</sub> değerleri. ....	161
Çizelge 5.24 : Elementel analiz sonuçları. ....	174
Çizelge 5.25 : RTFOT kalıntısı bağlayıcıların elementel analiz sonuçları. ....	181
Çizelge 5.26 : PAV kalıntısı bağlayıcıların elementel analiz sonuçları. ....	188
Çizelge 5.27 : Optimum bağlayıcı içeriği için elde edilen tüm hesaplamalar. ....	195
Çizelge 5.27 (devam) : Optimum bağlayıcı içeriği için elde edilen tüm hesaplamalar. ..	196
Çizelge 5.28 : Kontrol karışımına ait sonuçlar. ....	198
Çizelge 5.28 (devam) : Kontrol karışımına ait sonuçlar. ....	198
Çizelge 5.29 : Performans deneylerinde kullanılan numune sayıları. ....	199

<b>Çizelge 5.30</b> : Numunelerin özellikleri.....	200
<b>Çizelge 5.31</b> : Numunelerin özellikleri.....	202
<b>Çizelge 5.32</b> : Şartlandırılmamış numunelere ait özellikler.....	204
<b>Çizelge 5.33</b> : Şartlandırılmış kül katkılı numunelere ait özellikler.....	205
<b>Çizelge 5.35</b> : Numunelerin özellikleri (25 °C).....	209
<b>Çizelge 5.36</b> : Numunelerin özellikleri (40°C).....	211
<b>Çizelge 5.37</b> : Numunelerin özellikleri (50°C).....	213
<b>Çizelge 5.38</b> : Numunelerin özellikleri.....	215
<b>Çizelge 5.39</b> : Numunelerin özellikleri (3500N).....	219
<b>Çizelge 5.40</b> : Numunelerin özellikleri (4000N).....	219
<b>Çizelge 5.41</b> : 3500N ve 4000N gerilme seviyelerinde yorulma test sonuçları.....	222



## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1 : Esnek kaplama kesiti. ....	1
Şekil 1.2 : HMA üretimi. ....	2
Şekil 1.3 : Atık malzemeler.....	3
Şekil 2.1 : Kromatografik yöntemle asfaltın bileşenlerine ayrılması.....	9
Şekil 2.2 : Asfaltın yapısı. ....	9
Şekil 2.3 : Asfaltın yapısı. ....	9
Şekil 2.4 : Farklı geleneksel özellikteki bağlayıcıların kimyasal yapısı. ....	10
Şekil 2.5 : Aromatiklerin kimyasal yapısı.....	11
Şekil 2.6 : Doygunların kimyasal yapısı. ....	11
Şekil 2.7 : Akışkana uygulanan kayma gerilmesi. ....	12
Şekil 2.8: Farklı sıcaklıklarda bağlayıcıların akışkanlıkları.....	13
Şekil 2.9: Farklı akışkanlar için kayma gerilmesi-kayma hızı ilişkisi. ....	14
Şekil 2.10 : İdeal bir elastik katının yük altındaki davranışı (gerilme-değiştirme ilişkisi). ....	14
Şekil 2.11 : Maxwell modeli. ....	15
Şekil 2.12 : Şekil değiştirme zaman ilişkisi. ....	15
Şekil 2.13 : 4-Elementli model.....	16
Şekil 2.14: (a) Halka içerisindeki bağlayıcı (b) deney cihazı (c) bağlayıcının tabana değiştirdiği an. ....	17
Şekil 2.15 : (a) Penetrasyon cihazı (b) numune üzerinde yapılan 3 okuma. ....	18
Şekil 2.16 : Düktilite deneyine tabi tutulan bağlayıcı. ....	18
Şekil 2.17 : Parlama-yanma noktası deney düzeneği.....	19
Şekil 2.18 : Piknometre ile bağlayıcının özgül ağırlığı tayini.....	20
Şekil 2.19 : (a) Hazırlanan numuneler (b) numunelerin deneye tabi tutulması. ....	20
Şekil 2.20 : (a) Tüpe doldurulan bağlayıcı (b) tüpün eşit parçalara ayrılması.....	21
Şekil 2.21 : (a) Hazırlanmış RTFOT şişesi (b) RTFOT testine tabi tutulan numuneler (c) yaşlanma sonrası şişeler. ....	22
Şekil 2.22 : (a) PAV deney seti (b) deney sonrası bağlayıcıda bulunan hava kabarcıkları (c) vakumlu etüv cihazı.....	23
Şekil 2.23 : (a) Doldurulan bağlayıcı (b) RV testine tabi tutulması. ....	24
Şekil 2.24 : Temsili viskozite-sıcaklık grafiği. ....	24
Şekil 2.25 : DSR test cihazı. ....	25
Şekil 2.26: Deneyin çalışma prensibi.....	25
Şekil 2.27 : Asfaltın viskoelastik davranışı.....	26
Şekil 2.28 : Gerilme-deformasyon ilişkisi. ....	27
Şekil 2.29: Sünme sertliğinin zamana bağlı değişimi. ....	28
Şekil 2.30: MSCR deneyine ait deformasyon-zaman eğrisi. ....	29
Şekil 2.31: (a) Elekler (b) elek üstü malzemelerin tartımı. ....	34
Şekil 2.32 : Agregalara ait özgül ağırlık hesabında kullanılan hacimler. ....	35
Şekil 2.33 : (a) Kaba (b) ince (c) filler malzemelerin özgül ağırlıklarının belirlenmesi. ....	36
Şekil 2.34 : Los Angeles tamburu. ....	36
Şekil 2.35 : Taşıt yükü ve kaplama tepkisi. ....	42
Şekil 2.36 : Yorulma çatlaklarına örnek. ....	43
Şekil 2.37 : Tekerlek izine örnek. ....	43
Şekil 2.38 : Plastik deformasyon sebebiyle tekerlek izi oluşumu. ....	44
Şekil 2.39 : Konsolidasyon sebebiyle tekerlek izi oluşumu.....	44
Şekil 2.40 : Kaplamadaki çekme gerilmeleri ve oluşan çatlaklar. ....	45
Şekil 2.41 : Çatlakların büyümesi. ....	45
Şekil 2.42 : Termal çatlak örneği. ....	45

Şekil 2.43 : Kaplamada meydana gelen ayrışmalara örnek. ....	46
Şekil 2.44 : (a) Suda bekletilen numuneler (b) numunelerin deneye maruz bırakılması. ....	50
Şekil 2.45 : ITS testinde yükleme durumu ve numunenin kırılması. ....	51
Şekil 2.46 : (a) ITS testine tabi tutulan numune (b) test sonrası kırılmış numune. ....	51
Şekil 2.47 : (a) Vakum işlemi (b) numunelerin dondurucuda dondurulması (c) su banyosunda bekletilmesi. ....	52
Şekil 2.48 : ITSM testi uygulanan numunede meydana gelen deformasyon. ....	53
Şekil 2.49 : ITSM test düzeneği. ....	54
Şekil 2.50 : (a) Teste tabi tutulan numune (b) şekil değiştirmeler. ....	54
Şekil 2.51 : Sünme test düzeneği. ....	55
Şekil 2.52 : (a) Sünme testine tabi tutulan numune (b) elde edilen birim şekil değiştirme grafiği. ....	55
Şekil 2.53 : Yük-zaman ve düşey deformasyon-zaman grafikleri. ....	57
Şekil 2.54 : Toplam kalıcı şekil değiştirme- yükleme sayısı grafiği. ....	57
Şekil 2.55 : Akma sayısının bulunması. ....	58
Şekil 2.55 : Temsili deformasyon – yük tekrür sayısı grafiği. ....	59
Şekil 2.56 : Yorulma test düzeneği. ....	59
Şekil 2.57 : (a) Teste tabi tutulan numune (b) kırılmış numune (c) deformasyon-yük tekrar grafiği. ....	60
Şekil 3.1 : İdeal bağlayıcı modifikasyonu. ....	64
Şekil 3.2 : Bağlayıcı modifikasyonunda kullanılan polimerler. ....	68
Şekil 3.3 : Çeşitli atık malzemeler. ....	69
Şekil 3.4 : Biyokütle kaynakları. ....	71
Şekil 3.5 : Biyokütle dönüşüm yöntemleri. ....	73
Şekil 3.6 : Biyokütle kalıntılarına ait görseller. ....	76
Şekil 3.7 : AB ülkelerine ait evsel atık miktarı (2016 yılı). ....	77
Şekil 3.8 : Toplam OEA miktarı (mt/yıl) (2016 yılı). ....	78
Şekil 3.9 : Toplam OEA miktarı (kg/yıl) (2016 yılı). ....	79
Şekil 3.10 : AB ülkeleri ve Türkiye’de atık geri kazanım oranı. ....	79
Şekil 3.11 : AB ülkeleri ve Türkiye’de evsel atıkların yöntemi (2016 yılı). ....	80
Şekil 3.12 : AB ülkeleri ve Türkiye’de geri dönüşüm tesis sayıları. ....	80
Şekil 3.13 : 2016 yılına ait büyükşehirlerdeki evsel atıkların yönetimi. ....	81
Şekil 3.14 : İller bazında geri dönüşüm oranları (2016 yılı). ....	82
Şekil 3.15 : Malatya entegre çevre tesisi. ....	83
Şekil 3.16 : Kapıkaya atık düzenli depolama ve bertaraf sahası. ....	83
Şekil 3.17 : Enerji tesisinden alınan ısı kalıntıları. ....	84
Şekil 3.18 : Geopolimer malzeme üretimi. ....	84
Şekil 3.19 : Silicate geometrik konfigürasyonu. ....	85
Şekil 3.20 : Geopolimere ait moleküler yapılar. ....	86
Şekil 3.21 : Geopolimerizasyon süreci. ....	86
Şekil 3.22 : Geopolimer malzemenin oluşumu. ....	87
Şekil 3.23 : Yıllara göre geopolimer malzeme çalışma sayıları. ....	88
Şekil 3.24 : Geopolimer üretiminde kullanılan malzemeler. ....	89
Şekil 3.25 : Geopolimer bağlayıcıların hazırlanma süreci. ....	90
Şekil 3.26 : FM test sonuçları. ....	90
Şekil 3.27 : Geopolimer malzeme hazırlama süreci. ....	91
Şekil 3.28 : Bağlayıcılara ait ESEM görüntüleri. ....	92
Şekil 3.29 : Geopolimer hazırlık süreci. ....	93
Şekil 3.30 : Bağlayıcılara ait viskozite sonuçları. ....	93
Şekil 3.31 : $G^*/\sin \delta$ - sıcaklık sonucu. ....	94

Şekil 3.32 : Tekerlek izi derinliği- yük geçiş sayısı sonuçları. ....	95
Şekil 3.33 : Prosedürün şematize gösterimi. ....	96
Şekil 3.34 : Geleneksel sonuçlar. ....	97
Şekil 3.35 : SARA analizi sonuçları. ....	97
Şekil 3.36 : Darbe testi sonuçları. ....	99
Şekil 3.37: AFM görüntüleri. ....	99
Şekil 3.38 : Katkısız agrega ve geopolimerle çevrelenmiş agrega.....	100
Şekil 3.39 : Üretilen geopolimer ve gepolimer tozu. ....	102
Şekil 3.40 : Stabilite ve akma sonuçları. ....	102
Şekil 4.1 : (a) Saf asfalt (b) agrega.....	105
Şekil 4.2 : Agrega gradasyon eğrisi. ....	106
Şekil 4.3 : Çöp atıklarından elde edilen küller. ....	106
Şekil 4.4 : Sodyum silikat. ....	108
Şekil 4.5 : Sodyum silikatın bileşenleri. ....	108
Şekil 4.6 : (a) Karıştırma cihazı (b) modifiye bitümlerin bir kısmı. ....	109
Şekil 4.7 : Bağlayıcılar için akış şeması.....	111
Şekil 4.8 : Karışımlar için akış şeması. ....	112
Şekil 5.1 : Bağlayıcıların yumuşama noktası değerleri.....	114
Şekil 5.2: Bağlayıcıların penetrasyon değerleri. ....	114
Şekil 5.3 : Bağlayıcıların duktilite değerleri. ....	115
Şekil 5.4 : Bağlayıcıların özgül ağırlık değerlerindeki değişimler. ....	116
Şekil 5.5 : Bağlayıcıların parlama noktası değerlerindeki değişimler. ....	117
Şekil 5.6 : Bağlayıcıların PI değerleri .....	118
Şekil 5.7 : Depolama stabilitesi sonrası yumuşama noktası farkındaki değişimler. ....	120
Şekil 5.8 : Depolama stabilitesi sonrası penetrasyon farkındaki değişimler.....	120
Şekil 5.9 : RTFOT sonrası bağlayıcıların bünyelerindeki kütle kayıpları. ....	122
Şekil 5.10 : TFOT sonrası bağlayıcıların kütle kayıplarındaki değişim. ....	122
Şekil 5.11 : RTFOT sonrası bağlayıcıların yumuşama noktası değişimleri.....	124
Şekil 5.12 : RTFOT sonrası bağlayıcıların penetrasyon değişimleri. ....	124
Şekil 5.13 : RTFOT sonrası bağlayıcıların PI değişimleri. ....	124
Şekil 5.14 : TFOT sonrası bağlayıcıların yumuşama noktası değişimleri. ....	125
Şekil 5.15 : TFOT sonrası bağlayıcıların penetrasyon değişimleri. ....	125
Şekil 5.16 : TFOT sonrası bağlayıcıların PI değişimleri. ....	126
Şekil 5.17 : PAV sonrası bağlayıcıların yumuşama noktası değişimleri. ....	126
Şekil 5.18 : PAV sonrası bağlayıcıların penetrasyon değişimleri. ....	127
Şekil 5.19 : PAV sonrası bağlayıcıların PI değişimleri. ....	127
Şekil 5.20 : Viskozite-sıcaklık grafiği.....	130
Şekil 5.21 : Bağlayıcıların ortalama karıştırma sıcaklıkları.....	131
Şekil 5.22 : Bağlayıcıların ortalama sıkıştırma sıcaklıkları. ....	131
Şekil 5.23 : Kül katkılı bağlayıcıların A-VTS eğrileri.....	133
Şekil 5.24 : Geopolimer katkılı bağlayıcıların A-VTS eğrileri.....	134
Şekil 5.25 : Bağlayıcıların viskozite-sıcaklık grafiği (Kelvin). ....	135
Şekil 5.26: Bağlayıcıların G* değerlerinin sıcaklıkla değişimi. ....	138
Şekil 5.27 : Bağlayıcıların $\delta^\circ$ değerlerinin sıcaklıkla değişimi. ....	138
Şekil 5.28 : Bağlayıcıların G*/sin $\delta$ değerlerinin sıcaklıkla değişimi. ....	139
Şekil 5.29 : RTFOT kalıntısı bağlayıcıların G* değerlerinin sıcaklıkla değişimi.....	142
Şekil 5.30 : RTFOT kalıntısı bağlayıcıların $\delta^\circ$ değerlerinin sıcaklıkla değişimi. ....	142
Şekil 5.31 : RTFOT kalıntısı bağlayıcıların G*/sin $\delta$ değerlerinin sıcaklıkla değişimi...	143
Şekil 5.32 : PAV kalıntısı bağlayıcıların G* değerlerinin sıcaklıkla değişimi. ....	145
Şekil 5.33 : PAV kalıntısı bağlayıcıların $\delta^\circ$ değerlerinin sıcaklıkla değişimi.....	145

Şekil 5.34 : PAV kalıntısı bağlayıcıların $G^* \cdot \sin \delta$ değerlerinin sıcaklıkla değişimi.....	146
Şekil 5.35 : Bağlayıcılara ait S değerler.....	148
Şekil 5.36 : Bağlayıcılara ait m değerler.....	148
Şekil 5.37 : Kül katkıli bağlayıcıların düşük ve yüksek sıcaklık MG değerleri.....	150
Şekil 5.38 : Geopolimer katkıli bağlayıcıların düşük ve yüksek sıcaklık MG değerleri. .	150
Şekil 5.39 : Kül katkıli bağlayıcıların düşük ve yüksek sıcaklık PG değerleri.....	151
Şekil 5.40 : Geopolimer katkıli bağlayıcıların düşük ve yüksek sıcaklık PG değerleri....	151
Şekil 5.41 : Bağlayıcıların A parametresi.....	153
Şekil 5.42 : Bağlayıcıların B parametresi.....	153
Şekil 5.43 : Bağlayıcıların %2.5 deformasyon seviyesinde yorulma ömrü.....	154
Şekil 5.44 : Bağlayıcıların %5 deformasyon seviyesinde yorulma ömrü.....	155
Şekil 5.45 : Kül katkıli bağlayıcıların geri kazanım deformasyonu ( $R@3.2$ ).....	157
Şekil 5.46 : Geopolimer katkıli bağlayıcıların geri kazanım deformasyonu ( $R@3.2$ ). ....	157
Şekil 5.47 : Kül katkıli bağlayıcıların $J@3.2$ -sıcaklık değerleri.....	159
Şekil 5.48 : Geopolimer katkıli bağlayıcıların $J@3.2$ -sıcaklık değerleri.....	159
Şekil 5.49 : Bağlayıcıların PG Plus sonuçları.....	161
Şekil 5.50 : (a) Saf asfalt (b) ÇAK.....	163
Şekil 5.51 : (a) K 1.25 (b) K 2.5 (c) K 5 ve (d) K 7.5 bağlayıcılarına ait SEM görüntüleri.....	164
Şekil 5.52 : K 2.5 bağlayıcısına (a) %20 AA % (b) %30 AA (c) %40 AA ve (d) %50AA ilaveli bağlayıcıların SEM görüntüleri.....	165
Şekil 5.53 : Saf asfalt+ %45 AA karışımına ait SEM görüntüleri.....	165
Şekil 5.54 : (a) G 1.25 (b) G 2.5 (c) G 5 ve (d) G 7.5 bağlayıcılarına ait SEM görüntüleri.....	166
Şekil 5.55 : Saf asfalt ve çöp atığı külüne ait XRD deseni.....	167
Şekil 5.56 : Kül katkıli bağlayıcılara ait XRD desenleri.....	168
Şekil 5.57 : K 2.5 bağlayıcısına %20, %30, %40 ve %50AA ilaveli bağlayıcıların XRD desenleri.....	169
Şekil 5.58 : Saf asfalt+ %45 AA karışımına ait XRD desenleri.....	169
Şekil 5.59 : Geopolimer katkıli bağlayıcılara ait XRD desenleri.....	170
Şekil 5.60 : Saf bağlayıcı ve ÇAK'ın FT-IR sonuçları.....	171
Şekil 5.61 : Kül katkıli bağlayıcıların FT-IR sonuçları.....	171
Şekil 5.62 : K 2.5+ %20, %30, %40 ve %50AA ilaveli bağlayıcıların FT-IR sonuçları..	172
Şekil 5.63 : Saf asfalt+ %45 AA karışımına ait FT-IR sonuçları.....	173
Şekil 5.64 : Geopolimer katkıli bağlayıcıların FT-IR sonuçları.....	173
Şekil 5.65 : RTFOT ile yaşlandırılmış saf bağlayıcının SEM görüntüsü.....	175
Şekil 5.66 : RTFOT ile yaşlandırılmış (a) K 1.25 (b) K 2.5 (c) K 5 ve (d) K 7.5 bağlayıcılarına ait SEM görüntüleri.....	176
Şekil 5.67 : RTFOT ile yaşlandırılmış (a) G 1.25 (b) G 2.5 (c) G 5 ve (d) G 7.5 bağlayıcılarına ait SEM görüntüleri.....	176
Şekil 5.68 : RTFOT ile yaşlandırılmış saf bağlayıcıya ait XRD desenleri.....	177
Şekil 5.69 : RTFOT ile yaşlandırılmış kül katkıli bağlayıcılara ait XRD desenleri.....	178
Şekil 5.70 : RTFOT ile yaşlandırılmış geopolimer katkıli bağlayıcılara ait XRD desenleri.....	179
Şekil 5.71 : RTFOT ile yaşlandırılmış saf bağlayıcıya ait FT-IR sonuçları.....	179
Şekil 5.72 : RTFOT ile yaşlandırılmış kül katkıli bağlayıcıların FT-IR sonuçları.....	180
Şekil 5.73 : RTFOT ile yaşlandırılmış geopolimer katkıli bağlayıcıların FT-IR sonuçları.....	181
Şekil 5.74 : PAV ile yaşlandırılmış saf bağlayıcının SEM görüntüsü.....	182

<b>Şekil 5.75</b> : PAV ile yaşlandırılmış (a) K 1.25 (b) K 2.5 (c) K 5 ve (d) K 7.5 bağlayıcılarına ait SEM görüntüleri. ....	183
<b>Şekil 5.76</b> : PAV ile yaşlandırılmış (a) G 1.25 (b) G 2.5 (c) G 5 ve (d) G 7.5 bağlayıcılarına ait SEM görüntüleri. ....	184
<b>Şekil 5.77</b> : PAV ile yaşlandırılmış saf bağlayıcıya ait XRD desenleri.....	184
<b>Şekil 5.78</b> : PAV ile yaşlandırılmış kül katkıli bağlayıcılara ait XRD desenleri.....	185
<b>Şekil 5.79</b> : PAV ile yaşlandırılmış geopolimer katkıli bağlayıcılara ait XRD desenleri. ....	186
<b>Şekil 5.80</b> : PAV ile yaşlandırılmış saf bağlayıcıya ait FT-IR sonuçları.....	186
<b>Şekil 5.81</b> : PAV ile yaşlandırılmış kül katkıli bağlayıcıların FT-IR sonuçları.....	187
<b>Şekil 5.82</b> : PAV ile yaşlandırılmış geopolimer katkıli bağlayıcıların FT-IR sonuçları... ..	187
<b>Şekil 5.83</b> : (a) Agreganın etüvde ısıtılması (b) karıştırma cihazı. ....	190
<b>Şekil 5.84</b> : (a) Karışım harmanı (b) karışımın kalıba koyulması (c) şişleme işlemi. ....	190
<b>Şekil 5.85</b> : (a) Numunenin Marshall tokmağında sıkıştırılması (b) kalıpta bekletilmesi (c) kriko ile kalıptan çıkarılması. ....	191
<b>Şekil 5.86</b> : (a) Numunenin kumpas ile yüksekliğinin ölçülmesi (b) arşimet terazisinde ağırlığının belirlenmesi. ....	191
<b>Şekil 5.87</b> : (a) Su banyosunda numunelerin bekletilmesi (b) stabilite ve akma deneyine tabi tutulması. ....	192
<b>Şekil 5.88</b> : Elde edilen grafikler.....	197
<b>Şekil 5.89</b> : Hazırlanan HMA numuneleri. ....	199
<b>Şekil 5.90</b> : Numunelere ait stabilite değişimleri. ....	200
<b>Şekil 5.91</b> : Numunelere ait akma değişimleri. ....	201
<b>Şekil 5.92</b> : Numunelere ait MQ değişimleri. ....	202
<b>Şekil 5.93</b> : Numunelere ait RMS değişimleri. ....	203
<b>Şekil 5.94</b> : Numunelere ait ITS <sub>kuru</sub> değişimleri.....	207
<b>Şekil 5.95</b> : Numunelere ait ITS <sub>yaş</sub> değişimleri. ....	207
<b>Şekil 5.96</b> : Numunelere ait ITS <sub>R</sub> değişimleri. ....	208
<b>Şekil 5.97</b> : Numunelere ait 25 °C sıcaklıktaki ITSM değişimleri.....	209
<b>Şekil 5.98</b> : Numunelere ait şekil değiştirme-zaman grafikleri (25°C).....	210
<b>Şekil 5.99</b> : Toplam birim şekil değiştirme – zaman grafiği (40°C). ....	212
<b>Şekil 5.100</b> : Numunelere ait 40 °C sıcaklıktaki sünme sertliği değişimleri.....	212
<b>Şekil 5.101</b> : Toplam birim şekil değiştirme – zaman grafiği (50°C). ....	213
<b>Şekil 5.102</b> : Numunelere ait 50 °C sıcaklıktaki sünme sertliği değişimleri.....	214
<b>Şekil 5.103</b> : Saf ve kül katkıli karışımların toplam deformasyon ilişkisi-yük tekrarı. ....	215
<b>Şekil 5.104</b> : Geopolimer katkıli karışımların toplam deformasyon ilişkisi-yük tekrarı. .	216
<b>Şekil 5.105</b> : Karışımların sünme sertliği değerleri. ....	217
<b>Şekil 5.106</b> : Karışımların FN değerleri.....	217
<b>Şekil 5.107</b> : Numunelerin 3500N gerilme seviyesinde yük tekrar sayısı-deformasyon ilişkisi. ....	220
<b>Şekil 5.108</b> : Numunelerin 4000N gerilme seviyesinde yük tekrar sayısı-deformasyon ilişkisi. ....	221
<b>Şekil 5.109</b> : Ni – kül içeriği ilişkisi. ....	223
<b>Şekil 5.110</b> : Nf – kül içeriği ilişkisi. ....	224
<b>Şekil 5.111</b> : Np – kül içeriği ilişkisi. ....	225
<b>Şekil 5.112</b> : Nmaks – kül içeriği ilişkisi. ....	226
<b>Şekil 5.113</b> : $\delta_i$ – kül içeriği ilişkisi. ....	227
<b>Şekil 5.114</b> : $\delta_f$ – kül içeriği ilişkisi. ....	228
<b>Şekil 5.115</b> : $\delta_{maks}$ – kül içeriği ilişkisi. ....	229
<b>Şekil 5.116</b> : rp – kül içeriği ilişkisi. ....	230

## SEMBOLLER VE KISALTMALAR

<b>AASHTO</b>	: American Association of State Highway and Transportation Officials
<b>KGM</b>	: Karayolları Genel Müdürlüğü
<b>ASTM</b>	: American Society for Testing Materials
<b>SUPERPAVE</b>	: Üstün performanslı asfalt kaplama
<b>KTŞ</b>	: Karayolu teknik şartnamesi
<b>RV</b>	: Dönel viskozimetre
<b>DSR</b>	: Dinamik kayma reometresi
<b>BBR</b>	: Kiriş eğme reometresi
<b>LAS</b>	: Lineer yükleme genlikleri
<b>MSCR</b>	: Çoklu gerilmeli sünme geri dönme
<b>SEM</b>	: Taramalı elektron mikroskopu
<b>XRD</b>	: X-ışını difraksiyonu
<b>FT-IR</b>	: Kızılötesi spektroskopisi
<b>PET</b>	: Polietilen tereftalat
<b>PE</b>	: Polietilen
<b>HDPE</b>	: Yüksek yoğunluklu polietilen
<b>LDPE</b>	: Düşük yoğunluklu polietilen
<b>SBS</b>	: Stiren bütadien stiren
<b>SBR</b>	: Stiren bütadien kauçuk
<b>EVA</b>	: Etilen vinil asetat
<b>PP</b>	: Polipropilen
<b>PS</b>	: Polistiren
<b>PVC</b>	: Polivinil klorür
<b>ÇAK</b>	: Çöp atığı külü
<b>ITS</b>	: Dolaylı çekme mukavemeti
<b>ITSR</b>	: Dolaylı çekme mukavemeti oranı
<b>ITSM</b>	: Dolaylı çekme rijitlik modülü
<b>G*</b>	: Kompleks kayma modülü
<b>δ</b>	: Faz açısı
<b>G*/sin δ</b>	: Tekerlek izi parametresi
<b>G*.sin δ</b>	: Yorulma parametresi
<b>Nf</b>	: Yorulma ömrü
<b>VTS</b>	: Viskozite-sıcaklık duyarlılığı

## ÖZET

Doktora Tezi

### ÇÖP ATIKLARINDAN ELDE EDİLEN GEOPOLİMERLERİN SICAK KARIŞIM ASFALT KAPLAMALARDA KULLANIMININ ARAŞTIRILMASI

Ceren Beyza İNCE

İnönü Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

254+XVI sayfa

2023

Danışman: Doç. Dr. Tacettin GEÇKİL

Bu çalışmada, çöp atıklarından elde edilen küllerin bir katkı malzemesi olarak asfalt içerisinde geopolimer olarak kullanılmasının sıcak karışım asfaltların (HMA) performans özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla öncelikle, asfalt bağlayıcı içerisine ağırlıkça %1.25, %2.5, %5 ve %7.5 kül ve kül ağırlığının %45'i kadar sodyum silikat (AA) ilave edilerek geopolimer modifiyeli bağlayıcılar hazırlanmıştır. Saf ve modifiye bağlayıcıların karakteristik özellikleri yumuşama noktası, penetrasyon, duktilite, özgül ağırlık, parlama noktası, ince film etüvü (TFO), depolama stabilitesi, dönel viskozimetre (RV), dinamik kayma reometresi (DSR), kiriş eğme reometresi (BBR), lineer farklı genlik (LAS) ve çoklu gerilmeli sünme geri dönme (MSCR) testleriyle belirlenmiştir. Bağlayıcıların mikroyapısal özellikleri ise taramalı elektron mikroskobu (SEM), X-ışını difraksiyonu (XRD), Fourier dönüşümlü kızılötesi (FT-IR) spektroskopisi ve elementel analiz testleriyle belirlenmiştir. Ardından, Marshall karışım tasarım yöntemi esas alınarak, saf ve geopolimer katkılı bağlayıcılar ile HMA numuneleri hazırlanmıştır. Bu numuneler Marshall stabilite ve akma, kalıcı Marshall stabilitesi (RMS), dolaylı çekme mukavemeti (ITS), Modifiye Lottman, dolaylı çekme rijitlik modülü (ITSM), dinamik ve statik sünme, dolaylı çekme yorulma testi gibi performans testlerine maruz bırakılmıştır. Bağlayıcı test sonuçlarına göre, geopolimer katkısıyla bağlayıcının sertliğinin arttığı ve penetrasyon sınıfının değiştiği, sıcaklık hassasiyetinin azaldığı ve yaşlanma direncinin arttığı tespit edilmiştir. Bununla birlikte, geopolimer katkısı ile bağlayıcıların hem yüksek hem de düşük sıcaklık dirençlerinin arttığı ve %2.5 geopolimer oranında bağlayıcı performans sınıfının PG 58-28'den PG 70-34 sınıfına dönüştüğü görülmüştür. Ayrıca, geopolimer katkısının asfalt ile kimyasal reaksiyona girerek homojen ve tek fazlı kararlı bir yapı oluşturduğu belirlenmiştir. Karışım test sonuçlarına göre, %2.5 geopolimer oranıyla edilen karışımların stabilite, nem direnci, kalıcı deformasyon direnci ve yorulma ömrünün önemli ölçüde arttığı görülmüştür. Sonuç olarak, çöp atıklarından elde edilen küllerin asfalt ve dolayısıyla HMA içerisinde geopolimer olarak karayolu mühendisliğinde uygulanabilirliği tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Asfalt, Çöp Atığı, Kül, Alkali Aktivatör, Geopolimer, Modifikasyon, Reoloji, Sıcak Karışım Asfalt, Marshall Stabilite, Yorulma Ömrü.

## ABSTRACT

Phd. Thesis

### INVESTIGATION OF THE USE OF GEOPOLYMERS OBTAINED FROM GARBAGE WASTES IN HOT MIX ASPHALT PAVEMENTS

Ceren Beyza İNCE

Inonu University  
Graduate School of Nature and Applied Sciences  
Department of Civil Engineer

254+XVI sayfa

2023

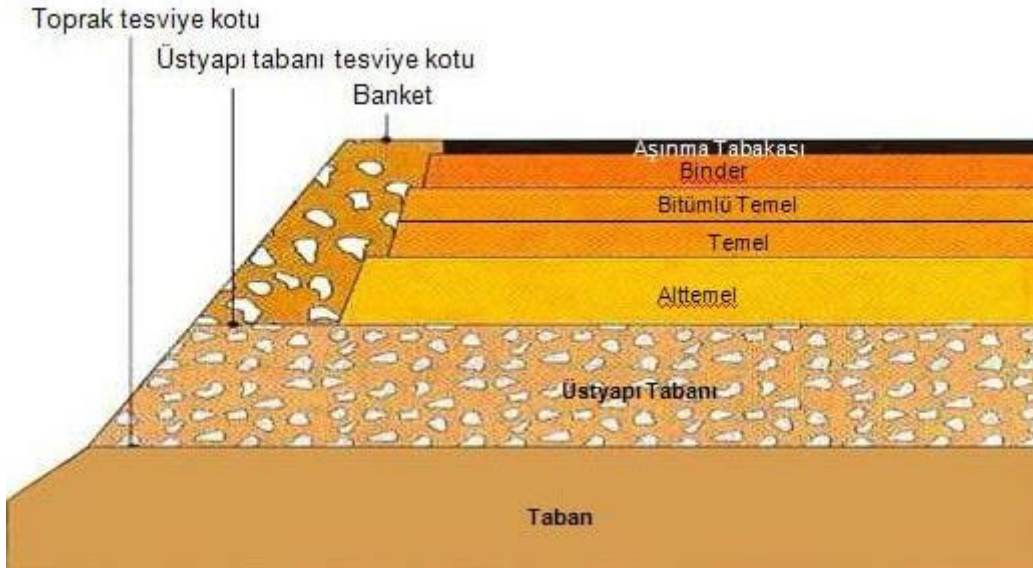
Supervisor: Doç. Dr. Tacettin GEÇKİL

In this study, the effect of using ashes obtained from garbage waste as a geopolymer in asphalt as an additive on the performance properties of hot mix asphalts (HMA) were investigated. For this purpose, firstly, geopolymer modified binders were prepared by adding 1.25%, 2.5%, 5% and 7.5% ash by weight and sodium silicate (AA) up to 45% by weight of ash into the asphalt binder. Characteristics of pure and modified binders were determined by softening point, penetration, ductility, specific gravity, flash point, thin film oven (TFO), storage stability, rotational viscometer (RV), dynamic shear rheometer (DSR), bending beam rheometer (BBR), linear amplitude sweep (LAS) and multiple stress creep rebound (MSCR) tests. The microstructural properties of the binders were determined by scanning electron microscopy (SEM), X-ray diffraction (XRD), Fourier transform infrared (FT-IR) spectroscopy and elemental analysis tests. Then, HMA samples were prepared with pure and geopolymer added binders based on Marshall mix design method. These samples were subjected to performance tests such as Marshall stability and flow, retained Marshall stability (RMS), indirect tensile strength (ITS), Modified Lottman, indirect tensile stiffness modulus (ITSM), dynamic and static creep, indirect tensile fatigue test. According to the binder test results, it was determined that the hardness of the binder increased and the penetration class changed, the temperature sensitivity decreased and the aging resistance increased with the geopolymer additive. In addition, it was observed that both high and low temperature resistances of the binders increased with the geopolymer additive and the binder performance grade changed from PG 58-28 to PG 70-34 class at the rate of 2.5% geopolymer. In addition, it was determined that the geopolymer additive a homogeneous and single-phase stable structure by chemically reacting with the asphalt. According to the mixture test results, it were observed that the stability, moisture resistance, permanent deformation resistance and fatigue life of the mixtures produced with the 2.5% geopolymer ratio increased significantly. As a result, the applicability of the ashes obtained from the garbage wastes as a geopolymer in asphalt and therefore HMA in highway engineering has been determined.

**Keywords:** Asphalt, Garbage Waste, Ash, Alkali Activator, Geopolymer, Modification, Rheology, Hot Mix Asphalt, Marshall Stability, Fatigue Life.

## 1. GİRİŞ

Ülkemizde ve gelişmiş olan birçok ülkede, yol kaplaması olarak çoğunlukla esnek kaplamalı yollar tercih edilmektedir. Esnek kaplamalar, alttemel, temel ve kaplama olmak üzere üç tabakadan meydana gelen yapılardır (Şekil 1.1). Alttemel tabakası, iri daneli malzemeden oluşan ve dren kabiliyeti yüksek olan, temel tabakası ise alt temel ve kaplama tabakaları arasında yer alan ve genelde kırmataştan oluşan yapılardır. Kaplama tabakası ise trafiğin doğrudan temas ettiği tabaka olup bu tabaka inşa edilirken bağlayıcı olarak “asfalt” malzemesi kullanılmaktadır. Kaplama tabakası, üzerine gelen yüklerini deforme olmadan alt tabakalara iletebilen, soğuk ve sıcak iklim koşullarında kararlılığını sürdürebilen, güvenli ve konforlu sürüşü sağlayabilecek nitelikte olması gereken tabakadır [1–3].



Şekil 1.1 : Esnek kaplama kesiti.

Kaplama tabakasının inşasında bağlayıcı olarak kullanılan asfalt malzemesi, oda koşullarında genellikle yarı-katı veya viskoz kıvamda olan, koyu kahverengi veya siyah renkli bir malzemedir. Literatürde “asfalt” terimi yerine, “asfalt bağlayıcı”, “asfalt çimentosu”, “bitüm” ve “bitümlü bağlayıcı” terimleri de kullanılabilir [4]. Asfalt, termoplastik bir malzeme olup viskoelastik davranış sergileyen bir malzemedir. Bu sebeple, çeşitli trafik yükleri altında yükün şiddeti, sıcaklık ve zamana göre esnek kaplamalar farklı



genellikle yüksek maliyetli olması sebebiyle son yıllarda araştırmacılar “atık” malzemeleri kullanarak modifikasyon işlemine gerçekleştirmeye başlamıştır [9,10].

Atık malzemeler, hemen her sektörde ortaya çıkan ve ayrıca çeşitli malzemelerin kullanım ömrünü tamamlaması sonucu elde edilen malzemelerdir. Plastikler (şişeler, saklama kapları, poşetler, ambalajlar, bilgisayar parçaları, tıbbi atıklar vb.) başta olmak üzere, çeşitli tarım atıkları (buğday, şeker, arpa, pamuk vb.), kanalizasyon atıkları, sanayi atıkları (madeni yağ, cüruf vb.) ve evsel atıklar (öp vb.) günümüzde atık malzemelere birer örnektir [11,12] (şekil 1.3).



**şekil 1.3 :** Atık malzemeler.

Atıkların hemen her alanda bu denli oluşması sonucunda, bu malzemeler doğada birikerek evre kirliliğine sebep olmakla birlikte, ayrıca canlı sağlığı üzerinde de önemli bir tehdit unsuru oluşturmaktadır. Bu sebeple, atıkların ortadan kaldırılması konusu oldukça önemlidir. Son yıllarda atıkları ortadan kaldırmak, ayrıca doğa ve canlı sağlığını korumak amacıyla “geri dönüşüm” işlemi uygulanmaya başlanmıştır. Geri dönüşüm, atıkların değerlendirilmesi konusunda oldukça önemli bir konudur. İyi bir geri dönüşümle, hem atıkların zararlı etkileri hem de işgal ettikleri alanlar ortadan kaldırılabilir [6,13].

Atık malzemelerin geri dönüşümünde birçok metot (fermantasyon, kompostlama, piroliz vb.) olmasına rağmen, genellikle daha kolay ve ucuz olması sebebiyle doğrudan yakma işlemi tercih edilmektedir. Doğrudan yakma ile, hem atık malzemedeki enerji üretimi (ısı ve elektrik) hemde atığın çevreye verdiği zarar ortadan kaldırılmaktadır [14].

Karayolu mühendisliğinde, asfalt veya karışımın özelliğinin geliştirilmesinde kullanılan atık malzemelerin başında plastikler gelmektedir. Plastikler oldukça çeşitli olup polietilen tereftalat (PET), düşük yoğunluklu polietilen (LDPE), yüksek yoğunluk polietilen (HDPE) ve polipropilen (PP) modifikasyon işleminde en çok kullanılan malzemelerdir. Ancak bu malzemelerinde birçoğunun asfalt ile homojen olarak karışmaması (örneğin PET) ve bağlayıcı içerisinde faz ayrışması sorununa sebebiyet vermesi sebebiyle araştırmacılar hem atık malzeme olan hem de asfalt ile homojen karışabilecek ve depolama stabilitesi açısından kararlı olabilecek malzemeleri kullanarak modifikasyon işlemi gerçekleştirmeye çalışmaktadır. Bu amaçla yapılan çalışmalara bakıldığında, genellikle asfalt ile kimyasal bir etkileşim gösterebilen malzemelerin modifikasyonda kullanımının daha uygun olduğu görülmektedir [9,10,15].

### **1.1 Tezin Amacı**

Karayolu mühendisliğinde, asfalt bağlayıcıların performans özelliklerinin geliştirilmesinde kullanılan atık malzemelerin birçoğu, genelde asfalt içerisinde iyi bir dağılım gösterememekle birlikte, elde edilen modifiye bağlayıcıların depolama stabilitesi açısından kararsız bir yapı gösterdikleri görülmüştür. Bu sebeple, HMA kaplamanın performansı, kaplama hizmet ömründen daha önce kayıp yaşamaya başlamakta ve kaplamada bozulmalar meydana gelmektedir. Kaplama performansını arttırmak ve hizmet ömrünü uzatmak amacıyla asfalt ile etkileşime girebilen atık malzemelerin modifikasyonda kullanılması, son yıllarda yapılan çalışmalarda öncelikli bir konu olmuştur.

Atık malzemelerin asfalt ile kimyasal etkileşim gösterdiği çalışmaların literatürde oldukça kısıtlı olduğu görülmektedir. Bu çalışmalara örnek olarak, Ahmedzade ve ekibi (2014) çalışmalarında atık LDPE'yi elektron ışınması yöntemiyle aktifleştirmiş ve ardından modifikasyonda kullanarak homojen bir karışım etmeyi başarmışlardır [15]. Geçkil ve arkadaşları (2020), çalışmalarında atık PET ile trietanolamin (TEOA) kimyasalını birlikte kullanarak asfalt ile PET'in reaksiyona girmesini sağlamış ve sonuçta homojen ve tek fazlı bir bağlayıcı elde etmeyi başarmışlardır [16]. Günay ve arkadaşları (2022), maleik anhidrit ile aşılınmış atık PP'nin asfalt bağlayıcıların reolojik özelliğini geliştirdiğini ve depolama stabilitesi açısından kararlı yapı gösteren bağlayıcılar elde edildiğini ifade etmişlerdir [17]. Bu çalışmalarla birlikte son yıllarda, atık malzemeler geopolimer sentezinde kullanılarak bağlayıcı ya da karışım içerisine bir katkı malzemesi olarak eklenmiş ve böylece bağlayıcının ya da karışımın özelliği geliştirilmeye çalışılmıştır [18,19]. Ancak bu

çalışmalarda da, genellikle endüstriyel atıkların kullanıldığı (uçucu kül, silis dumanı gibi) tıpkı beton teknolojisinde ve zemin iyileştirmede olduğu gibi geopolimer üretimi dış ortamda gerçekleştirilmiş (kalıplama, kütleme vs.) ve ardından öğütme işlemi sonucunda modifikasyonda kullanılmıştır. Ayrıca, geopolimerin modifikasyonda kullanımıyla yapılan çalışmalarda oldukça kısıtlı test prosedürlerinin olduğu da görülmektedir. Geopolimer sentezinin bağlayıcı içerisinde doğrudan gerçekleştirildiği bir çalışmaya hiç rastlanmamıştır.

Bu tez çalışmasında ise, çöp atıklarının doğrudan yakılması sonucu oluşan küllerle asfalt bağlayıcı içerisinde elde edilen geopolimerlerin sıcak karışım asfaltta kullanılabilirliği araştırılarak, hem karayolu mühendisliğinde ulusal literatüre ilk kez “geopolimer modifiyeli asfalt” kavramını kazandırmak hem de çöp atıklarının doğaya ve canlılara verdiği zararı ortadan kaldırmak amaçlanmıştır. Bu amaçla öncelikle, karışıma eklenecek kül ve alkali aktivatör oranı tespit edilerek geopolimer modifiyeli bağlayıcılar hazırlanmıştır. Hazırlanan geopolimer katkılı bağlayıcılar üzerinde bir dizi geleneksel, reolojik ve kimyasal testler yapılmıştır. Ardından, Marshall karışım tasarım yöntemi esas alınarak, HMA numuneleri hazırlanmıştır. Bu numuneler üzerinde de çeşitli performans testleri uygulanarak geopolimerin hem bağlayıcı hem de karışım üzerindeki etkileri oldukça detaylı olarak incelenmeye çalışılmıştır. Ayrıca bu tez çalışmasıyla, karayolu mühendisliğinde uluslararası literatürde kısıtlı olarak yer alan geopolimer çalışmalarına ilave olarak yeni geliştirilen yöntem ve çeşitli testlerle de önemli kazanımların sağlanacağı öngörülmüştür.

## **1.2 Tezin Ana Hatları**

Bu tez çalışmasında, çöp atıklarından elde edilen küller kullanılarak hazırlanan geopolimer modifiyeli asfaltın HMA kaplamalarda kullanımı araştırılmıştır. Bu amaçla tez çalışması toplamda altı bölümden oluşturulmuştur. Çalışmaya ait bölümler hakkında bilgiler aşağıda verilmiştir.

Çalışmanın ikinci bölümünde, ilk olarak asfalt bağlayıcı ve karışım tanımlanmış, ardından asfalt bağlayıcılar üzerinde uygulanan geleneksel ve reolojik testlere değinilmiştir. Daha sonra, HMA'lara ait genel bilgilere yer verilmiş, HMA'dan beklenen özellikler, meydana gelen bozulmalar, tasarım yöntemleri ve uygulanan testler detaylıca izah edilmiştir. Bu bölümde son olarak, karışımlarda kullanılan malzemelere ait karakterizasyon testleri ile ilgili bilgilere de yer verilmiştir.

Üçüncü bölümde, modifikasyon işlemi tanımlanmış, modifikasyonun amaçları, kullanılan katkı malzemeleri hakkında gerekli bilgiler verilmiştir. Özellikle son yıllarda modifikasyonda atık malzemelerin kullanılmasından dolayı atık malzemeler ile bu malzemelerin birçoğunun biyokütle kaynağı olmasından ötürü biyokütle ile genel bilgiler, evsel atıklar ve bu atıklara ait dünyada ve ülkemizde oluşan evsel atık miktarları hakkında bilgiler burada detaylıca anlatılmıştır. Çalışmanın özgünlüğünün bir parçası olan “atıktan geopolimer üretimi” temasından ötürü geopolimer ve geopolimerlerin kullanım alanlarıyla ilgili gerekli bilgilere de burada yer verilmiştir. Son olarak uluslararası çalışmalarda (ulusal çalışma yapılmamıştır) geopolimerin bağlayıcı ve HMA’da kullanımına ait literatür bilgileri de detaylıca bu bölümde izah edilmiştir.

Dördüncü bölümde, çalışmada kullanılan malzemeler tanıtılmış ve bu malzemelere ait çeşitli karakteristik özellikler verilmiştir. Ayrıca, çalışmada kullanılan metotlar (geopolimer katkılı bağlayıcı ve HMA’nın hazırlanması) ile çalışmayı özetleyen akış şeması da bu bölümde yer almaktadır.

Beşinci bölümde, yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar alt başlıklar halinde verilmiştir. İlk olarak bağlayıcıların geleneksel, yaşlandırma, reolojik, depolama stabilitesi ve karakterizasyon test sonuçları verilerek bu sonuçlar değerlendirilmiştir. Ardından, HMA numuneleri hazırlanarak bu numuneler üzerinde Marshall stabilite, RMS, ITS ve Modifiye Lottman, dinamik ve statik sünme ve yorulma testleri uygulanmış ve elde edilen tüm sonuçlara ait bilgilere ve değerlendirmelere yer verilmiştir.

Altıncı bölümde ise elde edilen tüm deneysel sonuçlar ve değerlendirmeler özetlenerek tez çalışması tamamlanmıştır.

## 2. SICAK KARIŞIM ASFALTLAR

Uygun oranlardaki asfalt bağlayıcı ve agreganın belirli bir sıcaklıkta (yaklaşık 160°C) plentte karıştırılmasıyla sıcak karışım asfaltlar (HMA) elde edilmektedir. Bir esnek kaplama çeşidi olan HMA'lar esnek üstyapıların aşınma, binder ve bitümlü temel tabakalarında kullanılabilir. Günümüzde devlet yollarında, havaalanlarında ve yüksek standartlı otoyollarda HMA kaplamalar (asfalt betonu) uygulanmaktadır.

HMA karışımların yapıları üç fazdan (agrega, bağlayıcı ve hava) meydana gelmektedir. Karışımdaki bağlayıcı sıvı, agrega katı, boşluklar ise gaz fazı sembolize etmektedir. Asfalt kaplamada kullanılan bağlayıcı, viskoelastik davranış gösteren termoplastik bir malzemedir. Bağlayıcının bu viskoelastik davranışı, onun düşük yüklenme hızında viskoz davranış ve düşük mukavemet gösterdiğini, yüksek yüklenme hızında ise elastik davranış ve yüksek mukavemet gösterdiğini ifade etmektedir. Termoplastik özelliğinden dolayı ise, düşük sıcaklıklarda yüksek mukavemet, yüksek sıcaklıklarda ise düşük mukavemet sergiler. Bağlayıcının kendine has bu özellikleri, HMA'nın yapısını da etkileyerek kaplamaların performansı üzerinde önemli değişimlere yol açabilmektedir. Bu sebeple, HMA'yı meydana getiren bağlayıcının özelliğinin iyi bilinmesi gerektiği aşikârdır. Bununla birlikte, sıcak karışımda ağırlıkça daha fazla oranda bulunan agreganın da özelliklerinin iyi bilinmesi, kaplama performansının belirlenmesinde önemli bir diğer etkidir. Bu bölümde, HMA'larda kullanılan asfalt ve agregalara ait özellikler ve bu özelliklerinin belirlenmesinde uygulanan testler alt başlıklar halinde verilmiştir [20,21].

### 2.1 Asfalt Bağlayıcılar

Asfalt bağlayıcı, adhezif ve su geçirmeyen, hemen buharlaşmayan, çok güçlü yapışma yeteneğine sahip olan, doğal ya da ham petrolün damıtılmasıyla elde edilen, siyah veya koyu kahverengi tonlarında olan bir yapı malzemesidir. Oda sıcaklığında genellikle viskoz veya yarı katı kıvamında bulunan asfalt bağlayıcılar, hidrokarbonlar ve bunların türevlerinden oluşan organik bir malzeme olup karbondisülfür (CS<sub>2</sub>) ve toluende neredeyse tamamen çözünebilmektedir [22,23].

Asfalt, mühendislikte ilk kez MÖ 3500'lü yıllarda Sümerliler tarafından gemi inşasında izolasyon malzemesi olarak kullanılmıştır. Bununla birlikte, Antik Roma, Eski Mısır ve Tell Asmar (günümüz Irak bölgesi) gibi çeşitli farklı medeniyetlerde de yine benzer amaçla veya tuğlalar arası harç malzemesi olarak kullanılmıştır [24].

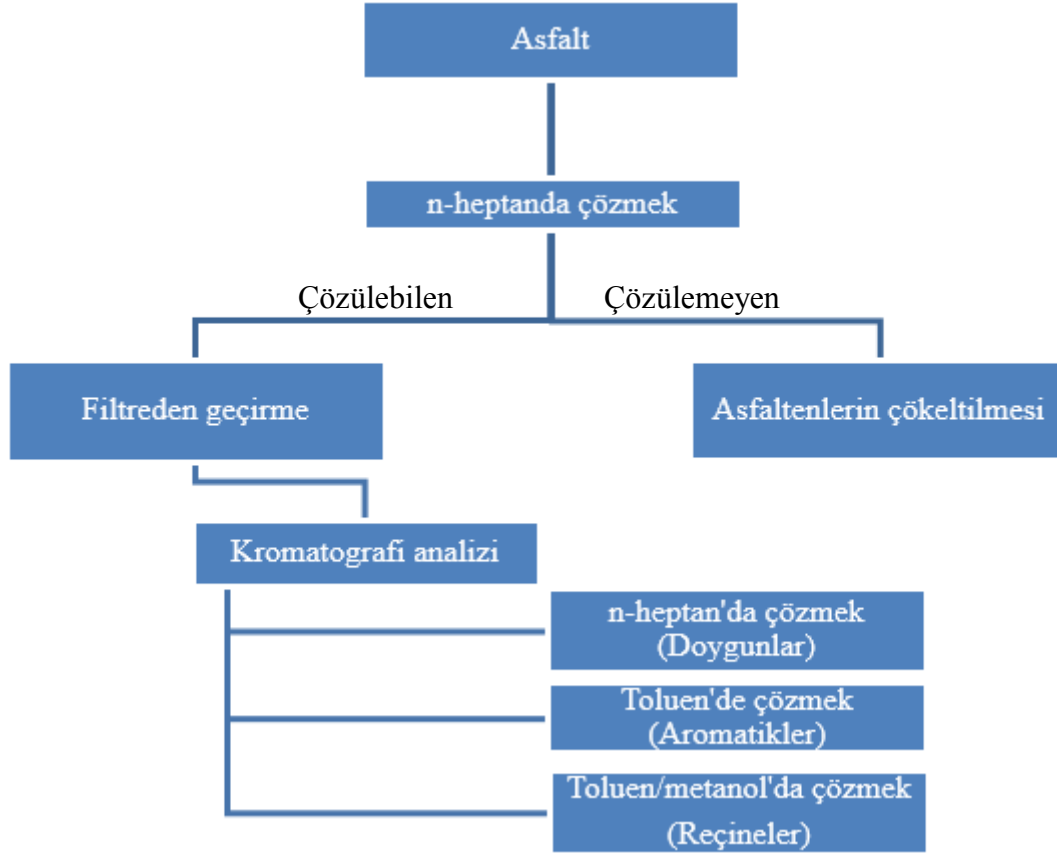
### 2.1.1 Asfaltın kimyasal bileşenleri

Kimyasal yapısı çok karmaşık bir yapıya sahip olan asfalt bağlayıcıların kimyasal analizi oldukça karmaşık analizler gerektirmektedir. Bu sebeple de araştırmacıların reolojik özelliklerle korelasyonu durumu daha da çıkmaza sürükleyerek aşırı veri elde edilmesine sebep olmaktadır. Ancak, genellenecek olursa asfaltlar çoğunlukla hidrokarbonlardan oluşan, kısmen daha az heterosiklik bileşiklerden ve oksijen, sülfür, nitrojen gibi fonksiyonel gruplardan oluşan kompleks bir kimyasal yapıdaki malzemedir. Ayrıca, demir, nikel, kalsiyum ve vanadyum gibi metaller ile inorganik tuzlar da bağlayıcı içerisinde oldukça az miktarda bulunabilmektedir [25].

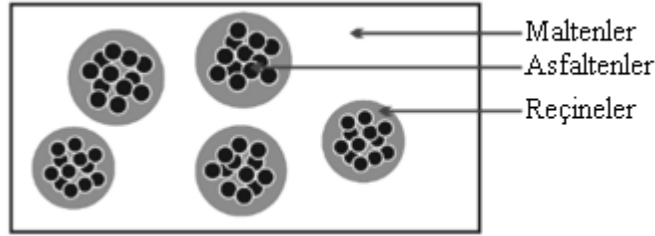
Asfaltların, farklı rafinerilerden elde edildiği göz önüne alındığında bu bileşenlerin miktarı kısmen de olsa değişiklik göstermekle birlikte asfaltlar ağırlıkça; %82-88 oranlarında karbon (C), %8-11 oranlarında hidrojen (H), %0-6 oranlarında sülfür (S), %0-1 oranlarında nitrojen (N) ve %0-1.5 oranlarında oksijenden (O) oluşmaktadır [25].

Asfaltın, bu karmaşık yapısını çözümlenmek ve kimyasal yapısı hakkında bilgi sahibi olabilmek amacıyla kullanılan en yaygın yöntem kromatografik yöntemlerdir. Bu yöntemin temelinde ilk olarak n-heptan kullanarak asfaltları çöktürmek ve arda kalan bileşenleri kromatografik olarak ayırmaktır (Şekil 2.1) [26,27].

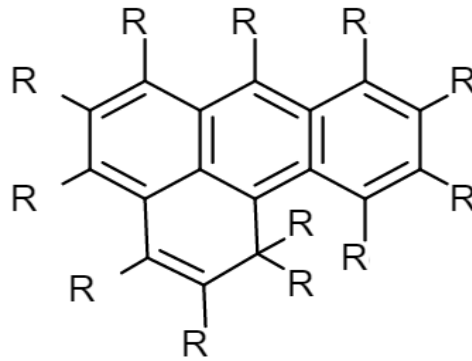
Asfalt bağlayıcılar, n-heptan'da çözünebilir özelliklerine göre iki temel fraksiyondan meydana gelir. Bunlardan ilki olan asfaltlar ikincisi ise maltenlerdir. n-heptan'da çözünemeyen kısım asfaltlarlardır. Asfalt içerisindeki en karmaşık molekül yapısına sahip olan ve asfaltın %5-25'ini oluşturan asfaltlar, plastik olmayan, sert, siyah veya koyu kahverengi renktedir. Bununla birlikte, asfalt içerisinde asfaltlar süresiz kolloidal yapıda toplanmış şekilde bulunurlar. Maltenler ise n-heptan'da çözünen kısım olup kolon kromatografisine göre aromatikler, doymunlar ve reçineler olmak üzere üç alt gruba ayrılmaktadır (Şekil 2.2). Asfalt içerisinde maltenler, sürekli bir faz oluştururlar [25,28,29]. Asfaltın kimyasal yapısı Şekil 2.3'de verilmiştir [30].



Şekil 2.1 : Kromatografik yöntemle asfaltın bileşenlerine ayrılması.

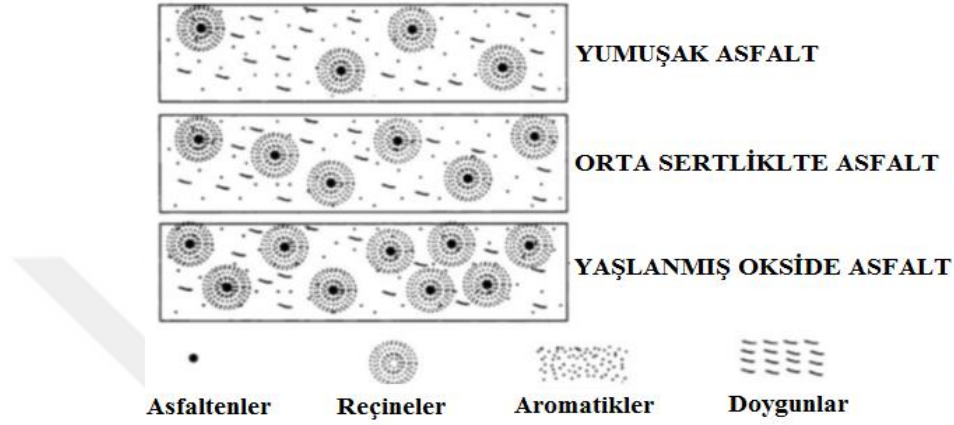


Şekil 2.2 : Asfaltın yapısı.



Şekil 2.3 : Asfaltinin yapısı.

Asfalt içerisindeki asfaltenin miktarı bağlayıcının reolojik özellikleri üzerinde oldukça etkilidir. Yapılan çalışmalarda, bağlayıcı içerisinde yüksek miktarda asfaltten içeren asfaltların sertleştiği ve daha yüksek viskoziteye sahip olduğu görülmüştür. Bununla birlikte, az miktarda asfaltten içeren asfaltların ise daha yumuşak olduğu ve düşük viskozite değerine sahip olduğu görülmüştür [31,32]. Farklı geleneksel özelliklere sahip asfalt bağlayıcıların kimyasal yapılarının temsili görüntüsü Şekil 2.4’de verilmiştir [33].

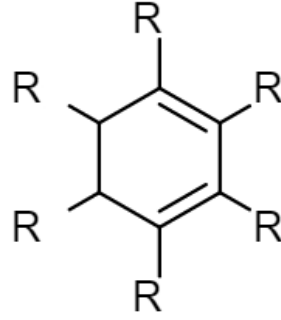


**Şekil 2.4 :** Farklı geleneksel özellikteki bağlayıcıların kimyasal yapısı.

Şekilden de anlaşıldığı gibi, asfaltten miktarı fazla olan bağlayıcılar “sert asfalt”, düşük miktarda asfaltten içeren bağlayıcılar ise “yumuşak asfalt” olarak adlandırılmaktadır. Ayrıca, sıcaklık ve diğer çevre koşulları etkisiyle yaşlanan asfaltların içerisinde asfaltten miktarının artış gösterdiği görülmektedir [33].

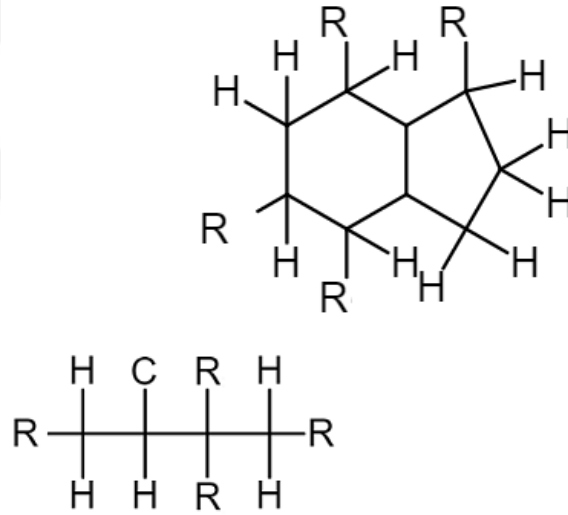
Reçineler, tıpkı asfalttenler gibi çoğunlukla hidrojen (H) ve karbondan (C) oluşmakta olup, az miktarda nitrojen (N), sülfür (S) ve oksijenden (O) oluşmaktadır. Ancak, asfalttenlerden farklı olarak n-heptan’da çözünebilirler. Daha düşük moleküler ağırlığa sahip olan reçineler elektriksel olarak yüklüdür. Bu özellikleri, onları yapışkan bir hale getirmektedir. Ayrıca, koyu kahverengi rengine sahip ve yarı katı durumdadır. Reçinelerin, asfalttenlere oranlanmasıyla asfaltın sol (solution) ve gel (gelatinous) tipi olma durumu belirlenebilmektedir [25,32,34].

Asfalt içerisinde en düşük molekül ağırlığına sahip olan aromatikler (Şekil 2.5), naften bileşenlerden oluşurlar. Asfalttenlerin dağılabilmesi için gerekli olan ortamın büyük oranını oluşturan aromatikler, asfalt içerisinde %40-65 oranlarında yer almaktadır. Aromatikler, viskoz sıvı yapıda ve koyu kahverengi renktedirler [25,30].



**Şekil 2.5** : Aromatiklerin kimyasal yapısı.

Doygunlar (Şekil 2.6), alkali naftenlerden, düz ya da dallanmış zincir alifatik hidrokarbonlardan ve bazı alkali aromatiklerden oluşmaktadır. Polar olmayan beyaz ya da saman renkte olan doymuş yağlardır ve asfaltın %5-20'sini oluştururlar [25,30].



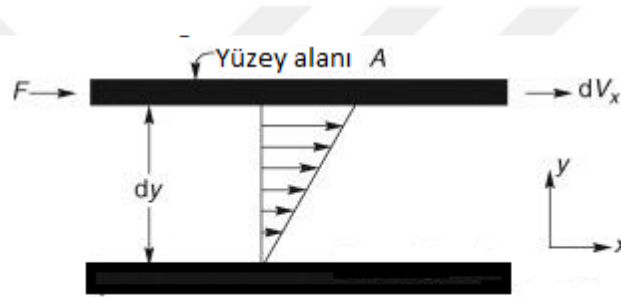
**Şekil 2.6** : Doymuşların kimyasal yapısı.

### 2.1.2 Asfaltın reolojisi

Reoloji, bir malzemenin belirli bir yük altında gösterdiği deformasyonu ve akışını inceleyen bilim dalıdır. Malzeme, yük altında deforme olduysa ve yük kaldırıldıktan sonra deformesinde bir değişme olmuyorsa “viskoz”, eğer deformesi ortadan kalkıyorsa yani geri dönüyorsa “elastik” davranış sergilemektedir. Sıvılar viskoz davranış gösterirken, ideal katılar elastik davranış göstermektedir. Bu iki durum arasındaki malzemeler ise kısmi viskoz ve kısmi elastik olarak tanımlanır ve bu malzemelere visko-elastik malzemeler denilmektedir [35,36].

Asfaltlar reolojik özelliklerine göre, termoplastik özellik gösteren ve viskoelastik davranış sergileyen malzemelerdir. Asfaltın termoplastik özelliği, sıcaklık koşullarına göre bağlayıcının yük altında iken deformasyon özelliklerinin farklılaşmasını göstermektedir [36].

Oda koşullarında yarı katı halde kıvamda olan asfalt, sıcaklık artışıyla akıcı hale gelir ve viskoz sıvı faza dönüşür. Viskoz bir sıvının belirli bir yük altındaki davranışının modellenmesinde Şekil 2.7'deki gibi olduğu kabul edilir. Burada, iki paralel katman arasında alanı "A" olan malzeme Newtonian akışkan kararlı halde iken, plaka üzerine "F" kuvveti tabii tutulur. Sonuçta, malzeme üzerinde kuvvetin alana oranlanma seviyesinde bir kayma gerilmesi ( $\tau$ ) oluşur. Buna göre, akışkan malzemeye uygulanan kayma gerilmesi Denklem (2.1)'deki gibi olur [37].



Şekil 2.7 : Akışkana uygulanan kayma gerilmesi.

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (2.1)$$

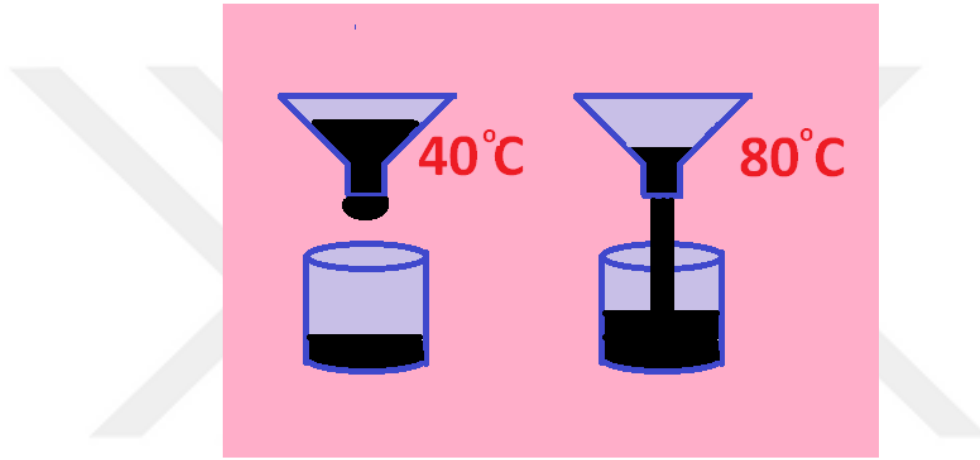
Kayma gerilmesinin belirlenmesinden sonra diğer önemli parametre ise kayma hızıdır. Üst plakaya F kuvvetinin teması ile birlikte bu tabaka " $dVx$ " hızıyla harekete başlar. Kayma hızı ( $\dot{\gamma}$ ) ise, bu " $dVx$ " hızının " $dy$ " uzunluğundaki tabaka kalınlığına oranlanmasıyla Denklem (2.2) yardımı ile belirlenir [38].

$$\dot{\gamma} = \frac{dVx}{dy} \quad (2.2)$$

Malzeme üzerine uygulanan F kuvvetine karşılık malzeme içinde bu kuvvete zıt yönde ve aynı miktarda bir tepki kuvveti oluşur. Sıkıştırılmayan Newtonian bir akışkanın viskozitesi ( $\eta$ ), üzerine uygulanan kayma gerilmesi ( $\tau$ )'nin, kayma hızı ( $\dot{\gamma}$ )'na bölünmesiyle Denklem (2.3) yardımı ile hesaplanmaktadır [38].

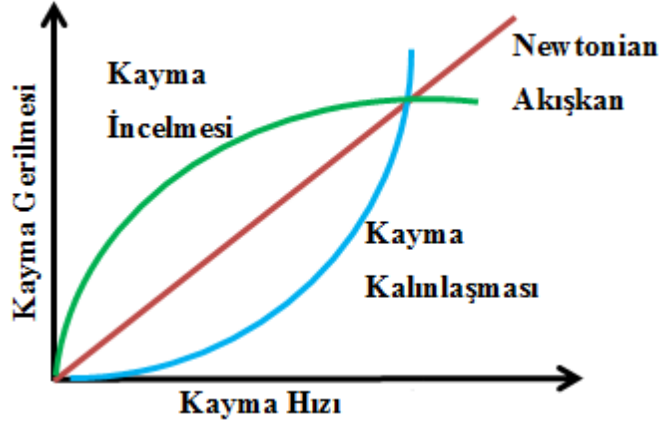
$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (2.3)$$

Viskozite, akışkan molekül katmanlarının birbirleri üzerinden kayıp geçerken kayma hareketine karşı koyulan (tepki) kuvvetini yani kısaca direnç kuvvetini ifade etmektedir. Asfalt bağlayıcının sıcaklığının artış göstermesi ile moleküller arası mesafe artar ve asfalt molekül katmanları birbirleri üzerinden kolayca hareket edebilir ve böylece bağlayıcının viskozitesi azalır veya akışkanlığı artar. İki farklı sıcaklıktaki asfalt bağlayıcıların akışkanlıklarına ait temsili görsel Şekil 2.8’de verilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi, yüksek sıcaklıktaki bağlayıcının akışkanlığı diğer sıcaklıktaki bağlayıcıya nazaran daha fazladır [39,40].



**Şekil 2.8:** Farklı sıcaklıklarda bağlayıcıların akışkanlıkları.

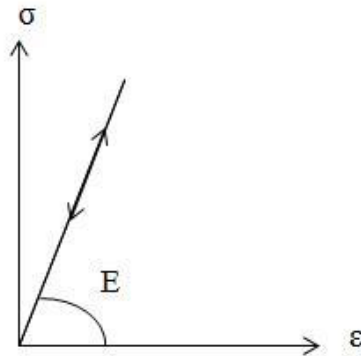
Molekül ağırlığı düşük olan su gibi akışkanların viskoziteleri, üzerlerine uygulanan kayma gerilmesinden bağımsızdır. Bu durumda, uygulanan kayma gerilmesi kayma hızına sabit oranda kalmaktadır (kayma hızı düşük veya büyük farketmez). Bu akışkanlar “Newtonian” olarak adlandırılır ve bunların viskozite değerleri sabittir. Fakat, molekül ağırlığı yüksek olan akışkanların viskoziteleri uygulanan kayma gerilmesine göre değişiklik göstermektedir. Şekil 2.9’da farklı akışkan türleri için kayma hızına karşılık akışkanların davranışları verilmiştir [38]. Şekilde, Newtonian akışkanların viskozitelerinin her koşulda aynı (sabit) kaldığı, kayma incelmesi olan akışkanların gerilme artışıyla viskozitelerinin düştüğü, kayma kalınlaşması olan akışkanların ise gerilme artışıyla viskozitelerinin arttığı görülmektedir.



**Şekil 2.9:** Farklı akışkanlar için kayma gerilmesi-kayma hızı ilişkisi.

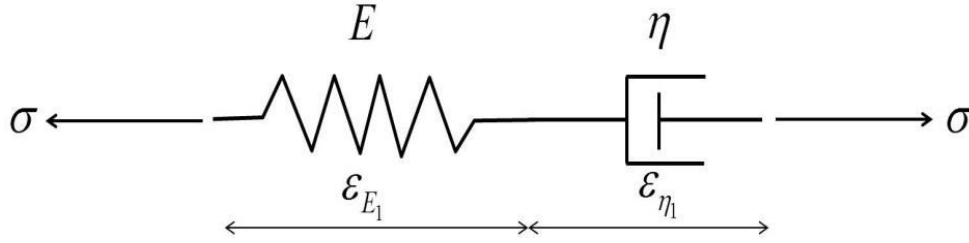
Asfalt bağlayıcılar, kimyasal yapılarında farklı bileşenler olmasına rağmen yüksek sıcaklık aralığında Newtonian akışkan özelliği göstermektedir. Fakat, bağlayıcı içerisinde asfaltın içeriği fazla veya kristal yapıları çok olan bağlayıcıların, yüksek sıcaklıklarda Newtonian akışkan olarak davrandığı lineer viskoelastik bölge azalma gösterebilmektedir. Ayrıca, polimer modifiye bağlayıcıların tamamı yükleme zamanına bağlı olarak viskoelastik yapıya sahiptir. Bu bağlayıcılar diğer bağlayıcılara nazaran daha karmaşık elastik ve viskoz deformasyon özellikleri göstermektedir [29].

Asfalt bağlayıcılar düşük sıcaklıklarda ise elastik katı haldedir. Bu haldeki bağlayıcılar, belirli bir yük altında bir kısım deforme olurlar, ardından yükün kalkması ile deforme olan kısımları geri döner. Buradaki önemli kısım ise eğer bağlayıcının dayanımı uygulanan yükten az olursa asfalt bağlayıcı aniden çatlar veya kırılır [39,40]. Elastik bir malzemenin belirli bir yük altındaki deformasyon davranışı Şekil 2.10'da verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, ideal elastik katı üzerine uygulanan yükün kaldırılmasıyla deformasyonun tamamı geri dönmektedir.



**Şekil 2.10 :** İdeal bir elastik katının yük altındaki davranışı (gerilme-değiştirme ilişkisi).

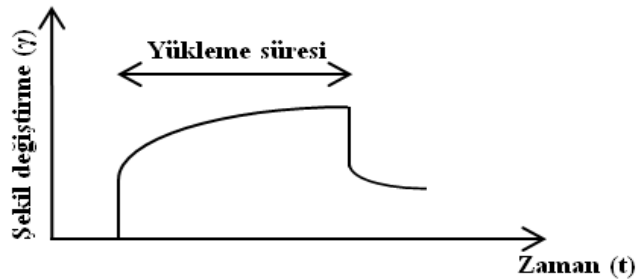
Asfalt bağlayıcılar orta sıcaklıklarda yarı katı halde bulunmaları sebebiyle hem viskoz hem de elastik davranışlarını bir arada göstermektedir. Asfaltlar, viskoelastik malzemelerin yük altındaki davranışının belirlenmesi için geliştirilen Maxwell modeline göre davranmaktadır [36] (Şekil 2.11).



Şekil 2.11 : Maxwell modeli.

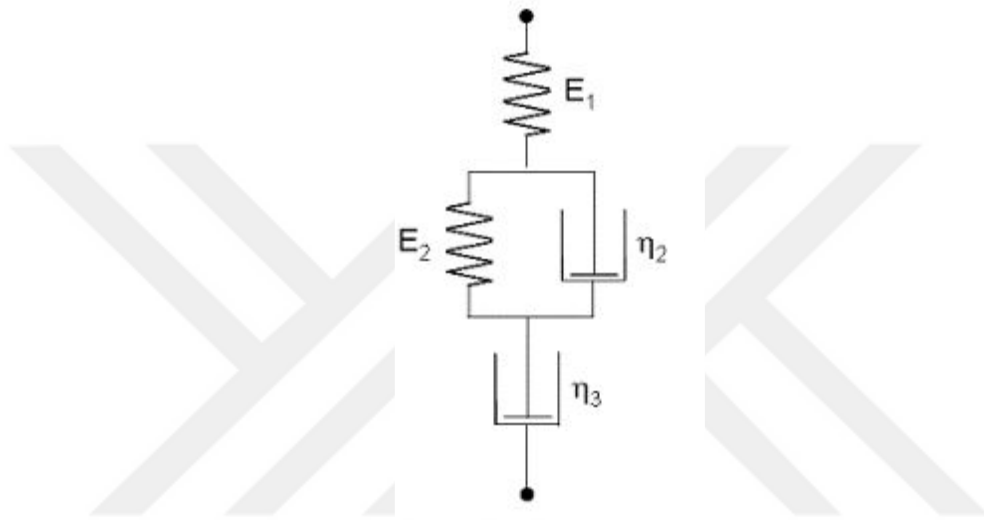
Sistem, yay ve yağ kutusundan oluşmakta olup burada yay tamamen elastik davranışı, yağ kutusu ise tamamen viskoz davranışı göstermektedir. Modelde yay sonsuz elastik yapı olarak bağlayıcıya ilk yük geldiğinde meydana gelen ani ve elastik deformeyi gösterir ( $\epsilon_{E1}$ ). Sonra, yük geldiği sürece bu deformasyon yağ kutusuna ( $\eta$ ) naklettirilir. Yük kalktığı zaman ise yay eski halini alır ve yağ kutusu hareketi de durur. Fakat burada yağ kutusunda oluşan değişim eski haline dönmez ( $\epsilon_{\eta1}$ ) [36].

Şekil 2.12’de sabit yük uygulanan bağlayıcı üzerinde zamanla meydana gelen şekil değiştirme görülmektedir. Burada, yükleme ile birlikte bağlayıcıda ani bir elastik değişim olur ve yükleme devam ettikçe oluşan toplam şekil değiştirme de artar. Yükün kalkması ile beraber ani oluşan elastik deformasyon geri döner ve sonrasında kısmen biraz daha geri kazanım olur ki buna “gecikmiş elastisite” denir. Fakat, yükleme süresine göre bağlayıcının viskoz özelliğinden dolayı deformasyon aynı durumda kalıcı olmaktadır. Bu sebeple, viskoelastik malzemelerde deformasyon meydana gelmesinde yükleme süresinin önemi vardır. Farklı trafik hızları altında asfalt bağlayıcıların çeşitli miktarlarda deforme olmasında yükleme süresinin şekil değiştirme üzerindeki etkisinden kaynaklanmaktadır [41].



Şekil 2.12 : Şekil değiştirme zaman ilişkisi.

Sabit yük altındaki bağlayıcıların ya da viskoelastik diğer malzemelerin deformasyon aşamalarında Şekil 2.13’de görüldüğü gibi Maxwell modelinden türetilmiş olan 4-Elementli model kullanılmaktadır. Burada ilk yay ani elastik deformasyonu, 4- Elementli modelde ilk yay “ani elastik deformasyonu”, paraleline bağlanan yay ve yağ kutusu ise zamana bağlı “viskoz ve gecikmiş elastik deformasyonu” ifade etmektedir. Sonda yer alan yağ kutusu ise kalıcı yani “viskoz deformasyonu” göstermektedir. Buradan hareketle, malzeme üzerindeki yükleme süresi sonunda, ani ve gecikmeli deformasyonun geri kazanılabildiği ifade edilebilir [37,38].



**Şekil 2.13 : 4-Elementli model.**

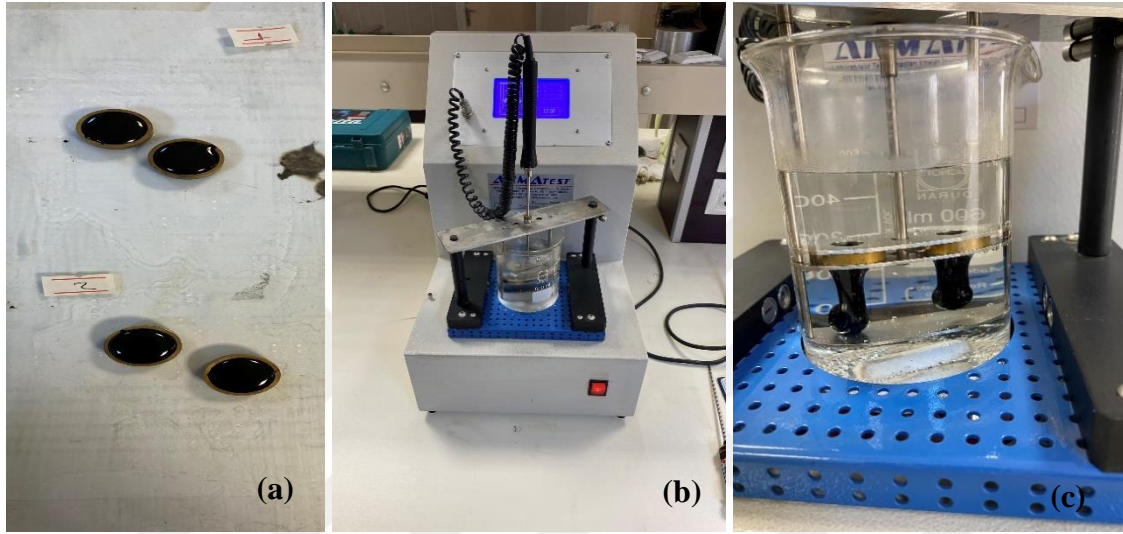
Sonuç olarak, asfalt gibi viskoelastik malzemelerin davranışında, yükleme süresinin uzunluğunun kalıcı deformasyonu direkt olarak etkilediği söylenebilir. Bu nedenle asfaltlar, yoğun trafik koşulları altında iken yükleme hızının yüksek olmasından kaynaklı daha elastik, yoğun olmayan ya da duran trafik koşulları altında iken ise viskoz bir deformasyon sergilerler. Orta yükleme hızında yani dengeli trafik durumunda ise viskoz ve elastik deformasyonun her ikisi bir arada görülmektedir [41].

### **2.1.3 Geleneksel asfalt bağlayıcı testleri**

Asfalt bağlayıcıların geleneksel özellikleri yumuşama noktası, penetrasyon, duktilite, parlama noktası, özgül ağırlık, ince film etüvü (TFO) ve depolama stabilitesi testleri ile belirlenmeye çalışılmaktadır [5,6,16].

### 2.1.3.1 Yumuşama noktası testi

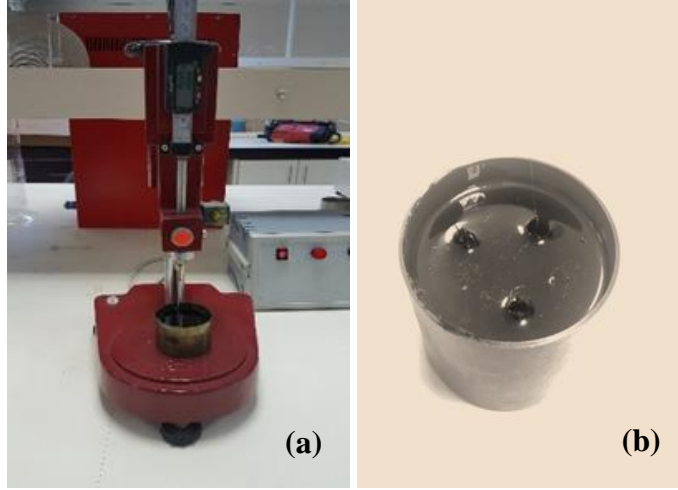
Asfalt bağlayıcıların yüksek sıcaklıklara karşı göstermiş olduğu direnci belirlemek için ASTM D36, EN 1427 standartlarına göre bağlayıcılar üzerinde yumuşama noktası deneyi uygulanmaktadır. Deney, 2 adet halka içerisine doldurulmuş olan bağlayıcının (Şekil 2.14a) üzerine standart bir bilye yerleştirilerek belirli bir hızda ( $5^{\circ}\text{C}/\text{dakika}$ ) ısıtılması sonucunda (Şekil 2.14b) gevşemiş bağlayıcının tabana temas ettiği andaki (Şekil 2.14c) sıcaklık ölçülerek gerçekleştirilmektedir [6].



**Şekil 2.14:** (a) Halka içerisindeki bağlayıcı (b) deney cihazı (c) bağlayıcının tabana değdiği an.

### 2.1.3.2 Penetrasyon testi

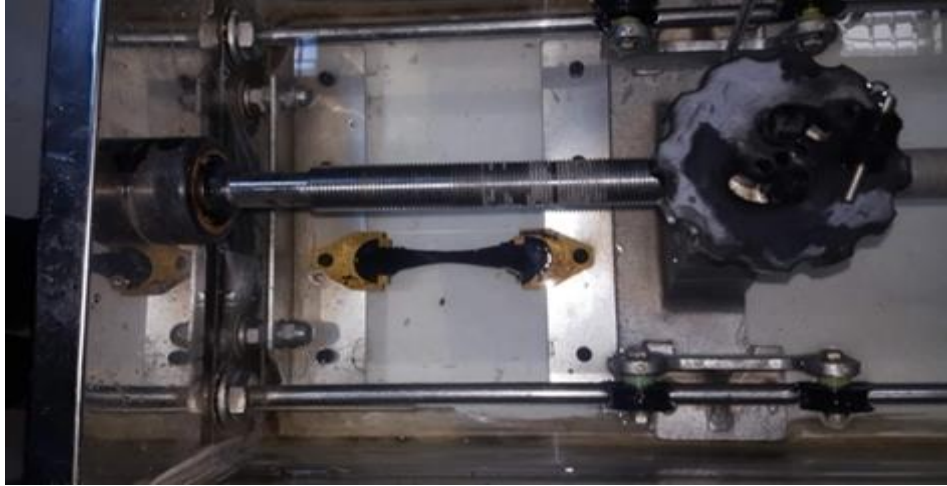
Asfalt bağlayıcıların sertliği ya da başka bir ifadeyle kıvamı hakkında bilgi sahibi olmak için ASTM D5, EN 1426 standartlarına göre penetrasyon deneyi uygulanmaktadır. Deney,  $25^{\circ}\text{C}$  sıcaklıkta gerçekleştirilen, düşey ekseninde 100 gr ağırlığındaki bir iğnenin bağlayıcı içerisinde battığı mesafe olarak tanımlanmaktadır (Şekil 2.15a). Deneye başlamadan önce, akışkan hale gelmiş ve penetrasyon kabına hava kabarcığı oluşmayacak şekilde doldurulmuş bağlayıcı, oda koşullarında soğumaya bırakılır. Ardından soğuyan numune, yaklaşık 1 saat kadar  $25^{\circ}\text{C}$  sıcaklıktaki su banyosunda bekletilir. Su banyosundan çıkarılan numune hızlıca deneye tabi tutulur. Numune üzerinde birbirine yakın olacak şekilde 3 noktadan penetrasyon değeri okunur (Şekil 2.15b). Ede edilen sonuçların ortalaması alınarak penetrasyon değeri hesaplanmış olur [5].



**Şekil 2.15 :** (a) Penetrasyon cihazı (b) numune üzerinde yapılan 3 okuma.

### 2.1.3.3 Düktilite testi

ASTM D113 standardına göre gerçekleştirilen düktilite deneyinde, asfalt bağlayıcıların uzama kabiliyeti ve kohezyon mukavemeti belirlenmektedir. Deney, standart kalıp içerisinde hazırlanmış iki asfalt numunenin 25°C sıcaklıkta ve 5cm/dakika hızla her iki ucundan çekilerek kopuncaya kadar uzadığı mesafenin (Şekil 2.16) cm cinsinden ifadesidir [5].



**Şekil 2.16 :** Düktilite deneyine tabi tutulan bağlayıcı.

### 2.1.3.4 Parlama ve yanma noktası testi

Asfalt gibi petrol ve petrol türevi malzemeler yanma riski olması sebebiyle tehlikeli malzemeler olarak kabul edilmektedir. Dolayısıyla bu malzemelerin parlamaya ve yanmaya başladığı andaki sıcaklık değerlerinin iyi bilinmesi hayati önem arz etmektedir. Deney, ASTM D92 standardına göre gerçekleştirilmektedir. Deneye başlamadan önce, akışkan

haldeki bağlayıcı deney kabı içerisine hava kabarcığı kalmayacak şekilde öngörülen seviye çizgisine kadar doldurulur. Ardından, numune sıcaklığı dakikada 5 °C artacak şekilde ayarlanır ve numune yüzeyinden çapı 4 mm civarındaki alev 1 saniye süre ile yüzeyden geçirilir (Şekil 2.17). Bu işlem numune yüzeyinde bir parlama görülene kadar devam eder ve bu anda okunan değer bağlayıcının parlama noktası değeri olarak alınmaktadır. Ardından numune yüzeyindeki alevlenmenin bir süre devam ettiği andaki sıcaklık değeri ise yanma noktası değeri olarak kaydedilir [42].



Şekil 2.17 : Parlama-yanma noktası deney düzeneği.

#### 2.1.3.5 Özgül ağırlık testi

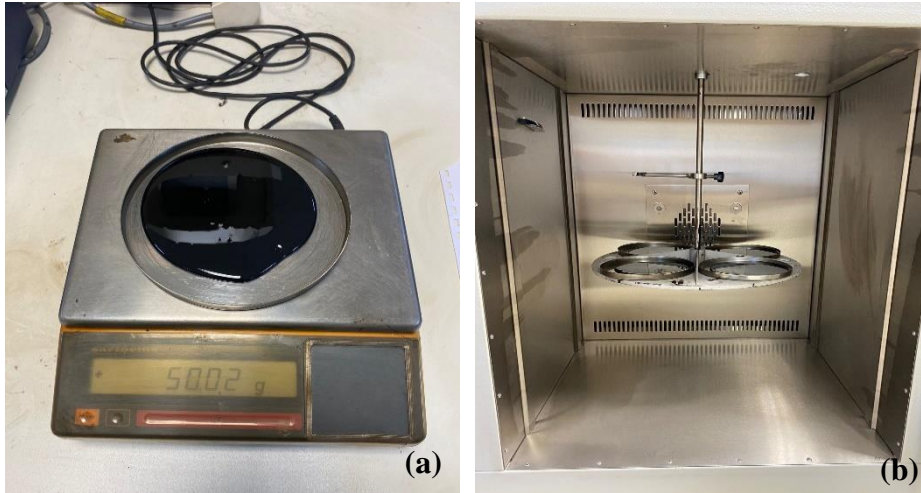
Asfalt bağlayıcıların özgül ağırlığı, belirli hacimdeki ağırlığın aynı hacimdeki suyun ağırlığına bölünmesi ile belirlenmektedir. Deney 25 °C sıcaklıkta ASTM D70 standardına göre gerçekleştirilmektedir. Bağlayıcıların özgül ağırlığının tayininde “piknometre” yöntemi kullanılmaktadır (Şekil 2.18a). Bu yöntemde önce boş kabın ağırlığı belirlenir. Ardından kap, su (saf su) ile doldurulup kap+su ağırlığı belirlenir. Daha sonra, su dökülüp kabın içerisi iyice kurutulduktan sonra belirli miktardaki bağlayıcı kap içerisine hava kabarcığı oluşmayacak şekilde koyulup kap+bağlayıcı ağırlığı belirlenir. Son olarak, kap+bağlayıcı üzerine kalan boşluğa su ilave edilerek kap+bağlayıcı+su (Şekil 2.18b) ağırlığı belirlenir ve gerekli hesaplamalar yapılarak bağlayıcı özgül ağırlığı tayin edilir [42,43].



**Şekil 2.18 :** Piknometre ile bağlayıcının özgül ağırlığı tayini.

### 2.1.3.6 TFO testi

Asfalt bağlayıcıların plentte yaşlanma karakteristiğini değerlendirebilmek amacıyla bağlayıcılar üzerinde TFO deneyi uygulanmaktadır. Deney ASTM D1754, EN 12607 – 2 standartlarına göre yapılmaktadır. Deneyde, yaklaşık 50 gr. ağırlığındaki bağlayıcılar 140 mm. çapa sahip düz bir tablaya doldurulur (Şekil 2.19a). Toplamda 4 kap, etüv içerisinde yer alan dönel askıya yerleştirilir ve bağlayıcılar 163°C sıcaklıkta 5 saat boyunca yaşlanmaya tabi tutulur (Şekil 2.19b). Deney bitiminde bağlayıcıların bünyesinde meydana gelen kütle kaybı yüzdesi hesaplanır [44].



**Şekil 2.19 :** (a) Hazırlanan numuneler (b) numunelerin deneye tabi tutulması.

### 2.1.3.7 Depolama stabilitesi testi

Asfalt bağlayıcıların plentte depolanmasıyla yapılarında meydana gelen ayrışma, çökme vb. durumları belirleyebilmek amacıyla bağlayıcılar TS EN 13399 standardına göre

depolama stabilitesi deneyine tabi tutulmaktadır. Deney, çapı 30-40 mm ve yüksekliği ise 160 mm olan bir alüminyum tüp içerisine akışkan haldeki bağlayıcı doldurularak 180 °C sıcaklıktaki etüvde 72 saat süre boyunca bekletilir (Şekil 2.20a). Süre sonunda, tüp 25 °C sıcaklıkta soğumaya bırakılır ve soğuyan tüpler 3 eşit parçaya bölünür (Şekil 2.20b). Bu parçalardan orta kısım kullanılmaz, alt ve üst parçalarda bulunan bağlayıcılar ısıtılarak yumuşama noktası ve penetrasyon testlerine maruz bırakılır. Deney sonucunda, bağlayıcıların bu test sonuçlarının arasındaki farkların Karayolu Teknik Şartnamesi (KTŞ) limitleri içerisinde kalması beklenmektedir [37].



**Şekil 2.20 :** (a) Tüpe doldurulan bağlayıcı (b) tüpün eşit parçalara ayrılması.

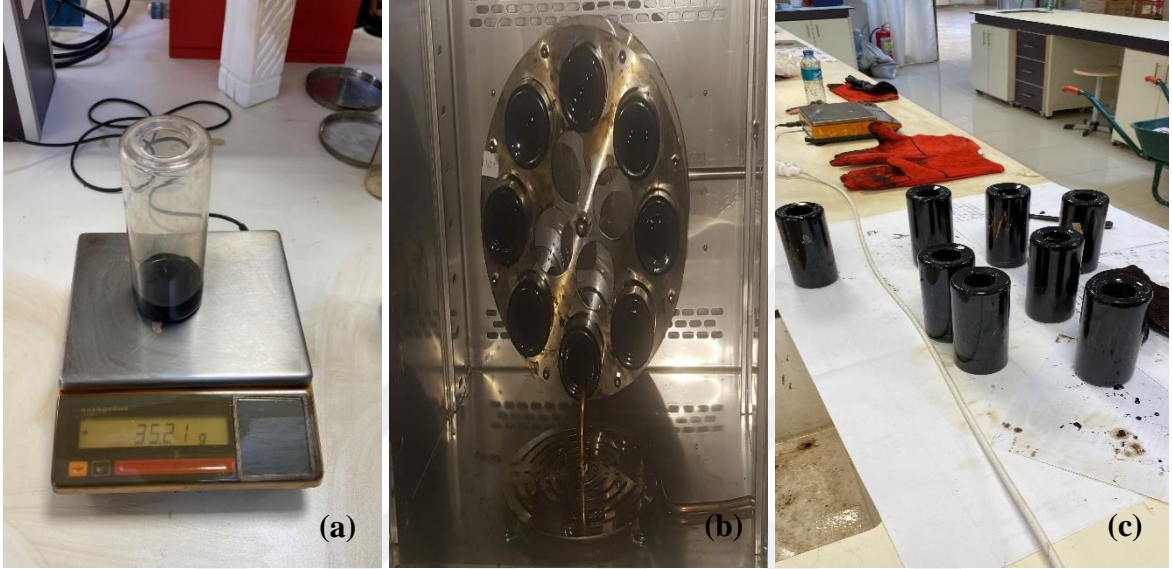
#### **2.1.4 Reolojik testler**

Asfalt bağlayıcıların düşük, orta ve yüksek sıcaklıklardaki davranışını belirleyebilmek amacıyla bağlayıcılar çeşitli reolojik testlere tabi tutulmaktadır. Bu testler, dönel ince film etüvü (RTFO), basınçlı yaşlandırma kabı (PAV), dönel viskozimetre (RV), dinamik kayma reometresi (DSR), kiriş eğme reometresi (BBR), çoklu gerilmeli sünme geri dönme (MSCR) ve lineer yükleme genlikleri (LAS) testleri olarak bilinmektedir [9,22,37].

##### **2.1.4.1 RTFO testi**

Asfalt bağlayıcılarda zaman içerisinde sıcaklık, basınç ve diğer çevre etkileri ile bünyelerinde meydana gelen kayıp “yaşlanma” olarak ifade edilmektedir. Bağlayıcıların servis öncesi süreçte (karıştırma-sıkıştırma, taşıma ve depolama gibi) sıcaklık ve hava etkileriyle yaşlanması “kısa süreli yaşlanma” olarak isimlendirilmektedir. Laboratuvar ortamında asfalt bağlayıcıların kısa süreli yaşlanması ASTM D2872 standardına göre RTFOT ile simüle edilmektedir. Deney için 8 adet özel şişenin her birine 35gr’lık asfalt

numune doldurulur (Şekil 2.21a). Daha sonra, bu şişeler 163 °C sıcaklıkta dakikada 15 devir yapacak şekilde ayarlanmış olan RTFOT cihazına yerleştirilir ve 80 dakika boyunca şişelere 4000±200 mL/dak olacak şekilde hava verilerek numuneler yaşlandırılır (Şekil 2.21b). Deney bitiminde (Şekil 2.21c) asfalt bağlayıcıların bünyelerinde meydana gelmiş olan kütle kaybı, ilk kütle ile son kütle arasındaki farkın ilk kütleyle bölünmesi ile belirlenmektedir [6,10].



**Şekil 2.21 :** (a) Hazırlanmış RTFOT şişesi (b) RTFOT testine tabi tutulan numuneler (c) yaşlanma sonrası şişeler.

#### 2.1.4.2 PAV testi

Asfalt bağlayıcıların uzun dönem yaşlanma özelliklerini tespit etmek amacıyla PAV deneyi yapılmaktadır. Deney ASTM D6521 standardına göre, RTFOT kalıntısı bağlayıcılar üzerinde uygulanmaktadır. Deneyde, 10 adet tepsinin her birine 50 gr. asfalt numune koyulur ve cihaz raflarına yerleştirilir. Daha sonra numuneler 100 °C sıcaklıkta 20 saat boyunca 2.10 MPa basınca maruz bırakılarak yaşlandırılır (Şekil 2.22a). Deney sonunda, yaşlandırılmış bağlayıcılar cihazdan çıkarıldıktan sonra vakumlu etüv vasıtasıyla bünyesindeki hava kabarcıkları (Şekil 2.22b) uzaklaştırılır (Şekil 2.22c) ve deneyler için hazır hale getirilir [42].

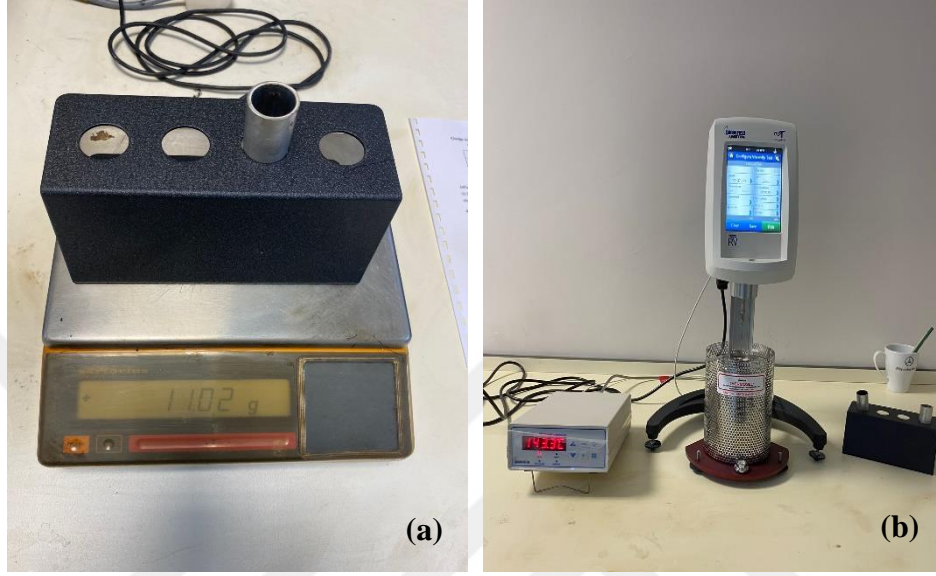


**Şekil 2.22 :** (a) PAV deney seti (b) deney sonrası bağlayıcıda bulunan hava kabarcıkları (c) vakumlu etüv cihazı.

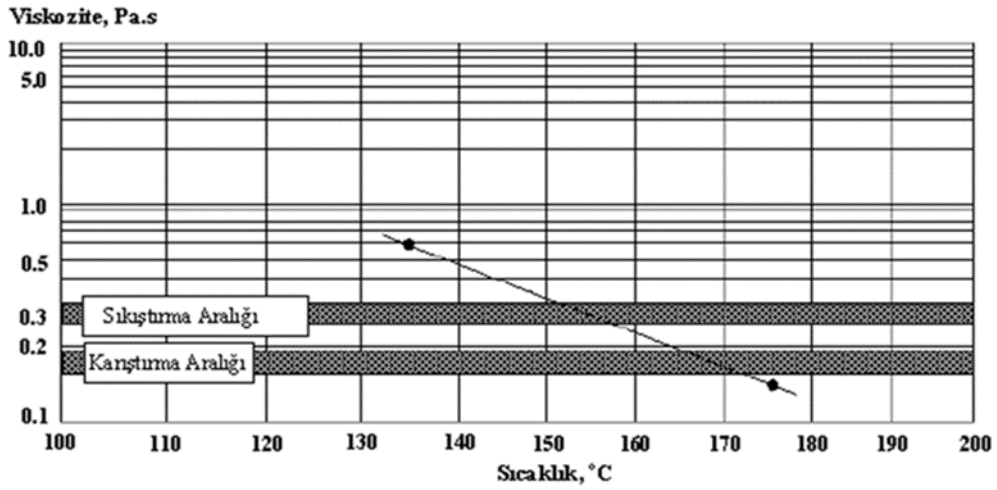
#### 2.1.4.3 RV testi

Asfalt bağlayıcıların, yüksek sıcaklıklardaki akışkanlık (işlenebilirlik, pompalanabilirlik) özelliklerini belirleyebilmek amacıyla bağlayıcılar üzerinde ASTM D4402 standardına göre RV deneyi uygulanmaktadır. Deneyden önce akışkan hale getirilmiş bağlayıcı numune RV kabı içerisine yaklaşık 11 gr. kadar doldurulur (Şekil 2.23a). Ardından sıcaklık kontrolü olan termosel sistem içerisine kap yerleştirilir ve 15 dk. boyunca sabit sıcaklıkta bekletilir. Süre bitiminde No: 27 milinin hızı 20 rpm. ayarlanarak dönmesi sağlanır. Yaklaşık 1 dk. içerisinde birbirine yakın viskozite değerlerine ulaşıldığında üç adet okuma yapılır ve bunların ortalaması alınarak bağlayıcının viskozitesi belirlenmiş olur (Şekil 2.23b). Asfalt Enstitüsü, bağlayıcıların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarını tespit edebilmek amacıyla deneyin 135°C ve 165°C sıcaklıklarda yapılmasını önermektedir.

Bununla birlikte, bağlayıcıların 135 °C sıcaklıktaki viskozite değerinin 3000 cP'yi aşmaması istenmektedir. Deneden elde edilen viskozite değerleri yardımıyla bağlayıcıların viskozite-sıcaklık grafiği çizilir (Şekil 2.24). Karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının belirlenmesinde sırasıyla 170±20 cP ve 280±30 cP viskozite sınırlarına karşılık gelen sıcaklık aralıklarının kullanılması önerilmektedir [6,42,45].



Şekil 2.23 : (a) Doldurulan bağlayıcı (b) RV testine tabi tutulması.



Şekil 2.24 : Temsili viskozite-sıcaklık grafiği.

#### 2.1.4.4 DSR testi

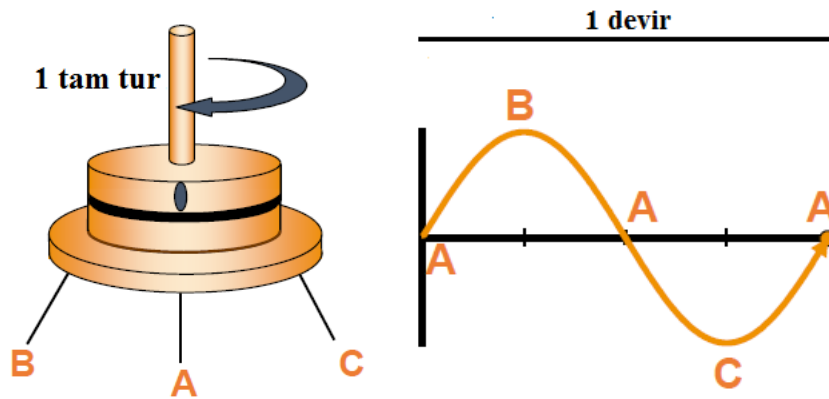
DSR testi ile asfalt bağlayıcıların orta ve yüksek sıcaklıklar altındaki viskoelastik özellikleri belirlenmektedir. Asfalt bağlayıcının yorulma çatlakları ve kalıcı deformasyonlara (tekerlek izi) karşı göstermiş olduğu direnç bağlayıcının viskoz ve elastik

özelliklerine göre saptanmaktadır. Bağlayıcının yorulma çatlaklarına karşı dirençli olması için esnek ve elastik yapıda, tekerlek izine karşı direnç göstermesi için sert ve elastik yapıda olması gerekmektedir [22].

ASTM D7175 standardına göre yapılan DSR deneyinde (Şekil 2.25), iki dairesel plaka arasına asfalt numunesi yerleştirilir. Üst plaka genelde saniyede 10 rad (1.59 Hz) hızında salınım yaparken, alt plaka ise sabit olup kesme kuvvetine sebep olmaktadır (Şekil 2.26). Deney, yaşlanmamış (orijinal), RTFO ile yaşlandırılmış ve PAV ile yaşlandırılmış bağlayıcılar üzerinde gerçekleştirilmektedir [46].



Şekil 2.25 : DSR test cihazı.

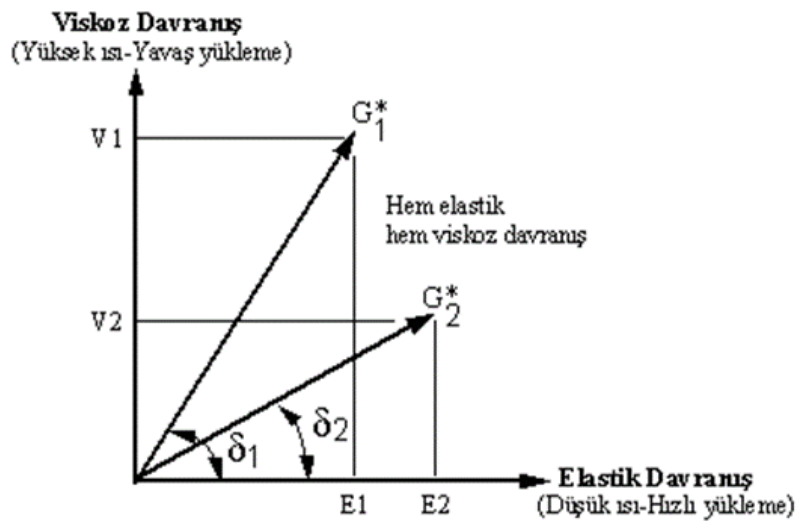


Şekil 2.26: Deneyin çalışma prensibi.

Bağlayıcıların kalıcı deformasyona karşı direncinin belirlenmesinde 1 mm kalınlığında ve 25 mm çapında, yorulma çatlaklarına karşı direncinin belirlenmesinde ise 2 mm kalınlığında ve 8 mm çapında bağlayıcı numuneleri hazırlanmaktadır. Deneyde bağlayıcı üzerinde uygulanacak deney sıcaklığı, bağlayıcının sınıfı ve performans parametresine göre belirlenmektedir [46]. Kalıcı deformasyona karşı gösterilen direnci belirleyebilmek için orijinal ve RTFOT ile yaşlandırılmış bağlayıcılar 46°C sıcaklık ile 82°C sıcaklıklar arasında deneye tabi tutulmaktadır. Bununla birlikte, yorulma çatlaklarına karşı direnci (yorulma parametresi) belirleyebilmek için PAV ile yaşlandırılmış bağlayıcılar 7°C sıcaklık ile 34°C sıcaklıklar arasında deneye tabi tutulmaktadır [22].

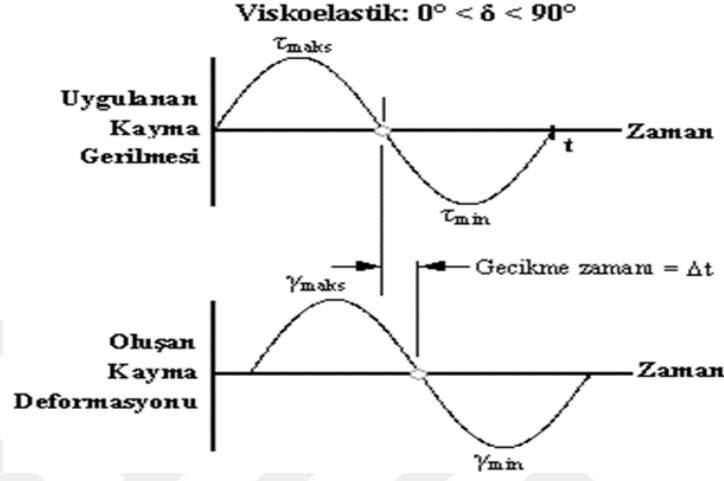
DSR deneyinde, üst ve alt plakalar arasında olan bağlayıcıya kuvvet uygulandığı (sınımlı kayma gerilimi,  $\tau$ ) zaman, bağlayıcının bu kuvvete verdiği tepki (kayma deformasyonu,  $\gamma$ ) DSR deney cihazı ile tespit edilmektedir. Böylece, asfalt bağlayıcının viskoelastik davranışını belirleyebilmek için elde edilmesi gereken iki önemli parametre bu deney ile elde edilmiş olur. Bu parametrelerden biri, kompleks kayma modülü ( $G^*$ )'dür.  $G^*$ , maksimum kayma gerilmesinin maksimum kayma deformasyonuna oranıdır. İkinci parametre ise faz açısıdır ( $\delta$ ).  $\delta$  değeri, bağlayıcıya uygulanan gerilme ile meydana gelen deformasyon arasındaki gecikme süresidir. Özetlenecek olursa,  $G^*$ , bağlayıcının kayma gerilmeleri sonucunda oluşan deformasyona karşı direnç gösterme kabiliyeti,  $\delta$  ise viskoz ve elastik tepkileri sonucunda bağlayıcıda meydana gelen toplam direnç oranlarının ölçüsüdür. Deneyde,  $G^*$  ve  $\delta$  değerleri belirlenerek, asfaltın viskoelastik davranışı hakkında bilgi sahibi olunmaktadır [41,47].

Şekil 2.27'de iki farklı bağlayıcının viskoelastik davranışları verilmiştir.



Şekil 2.27 : Asfaltın viskoelastik davranışı.

Şekil 2.27 incelendiğinde, y eksenini (düşey) viskoz, x eksenini (yatay) ise elastik davranışı gösterdiği görülmektedir. Bu bağlayıcıların birbirinden farklı ve farklı viskoelastik özelliği sebebiyle viskoz ve elastik bileşenleri de birbirinden farklıdır. Bağlayıcının viskoelastik özelliği  $G^*$  ve  $\delta$  değerlerine bağlıdır. Ayrıca,  $\delta$  değerinin gerilme-deformasyon arasındaki zaman aralığına eşit uzaklıkta olması beklenmektedir (Şekil 2.28) [41].



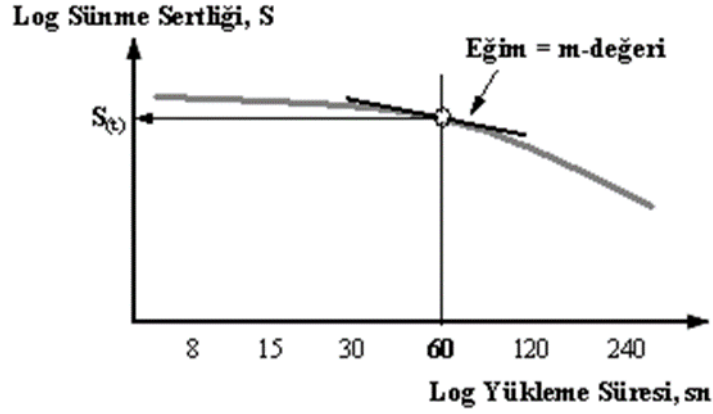
**Şekil 2.28 : Gerilme-deformasyon ilişkisi.**

Superpave şartnamesine göre, bağlayıcıların yüksek sıcaklıklardaki kalıcı deformasyona karşı gösterdiği direnci  $G^*/\sin\delta$  parametresi ifade etmektedir. Bununla birlikte, bağlayıcıların orta sıcaklıklarda yorulmaya karşı direncin göstergesini  $G^* \times \sin\delta$  parametresi ifade etmektedir [48]. Şartnameye göre, orijinal bağlayıcıların tekerlek izi parametresi minimum 1.00 kPa, RTFOT kalıntısı bağlayıcıların tekerlek izi parametresi minimum 2.2 kPa, PAV kalıntısı bağlayıcıların yorulma parametresinin maksimum 5000 kPa olması istenmektedir [49].

#### 2.1.4.5 BBR testi

Asfalt bağlayıcılarda düşük sıcaklıklarda oluşan ısı çatlaklarına (termal çatlaklar) karşı gösterdiği direnç BBR testi ile belirlenmektedir. Deney ASTM D6648 standardına göre, PAV kalıntısı bağlayıcılar üzerinde yapılmaktadır. Deneyde, 6.25x125x12.5 mm. ebatlarında kiriş şeklindeki kalıplar kullanılarak hazırlanan bağlayıcı kiriş numunesi, orta noktasından 240 sn. boyunca 980 mN'luk yüke maruz bırakılmaktadır. Süre sonunda elde edilen yük ve defleksiyon değerlerinden, bağlayıcıların sünme sertliği (S) ve sünme oranı (m-değer) değerleri belirlenmektedir. Bağlayıcıların sabit sünme yüklerine karşı dayanımı sünme sertliği olarak ifade edilirken, sertlik ile yükleme süresi arasındaki oran ise sünme oranını belirtmektedir. Bağlayıcıların S değeri tespit edildikten sonra S değerinin zamana bağlı

değişim grafiği (eğri) çizilerek bu grafikten m-değer belirlenmektedir. Burada çizilen eğriye bir doğru teğeti çizilir ve burada 60. saniyedeki eğim m-değerini vermektedir [42,47,50] (Şekil 2.29).



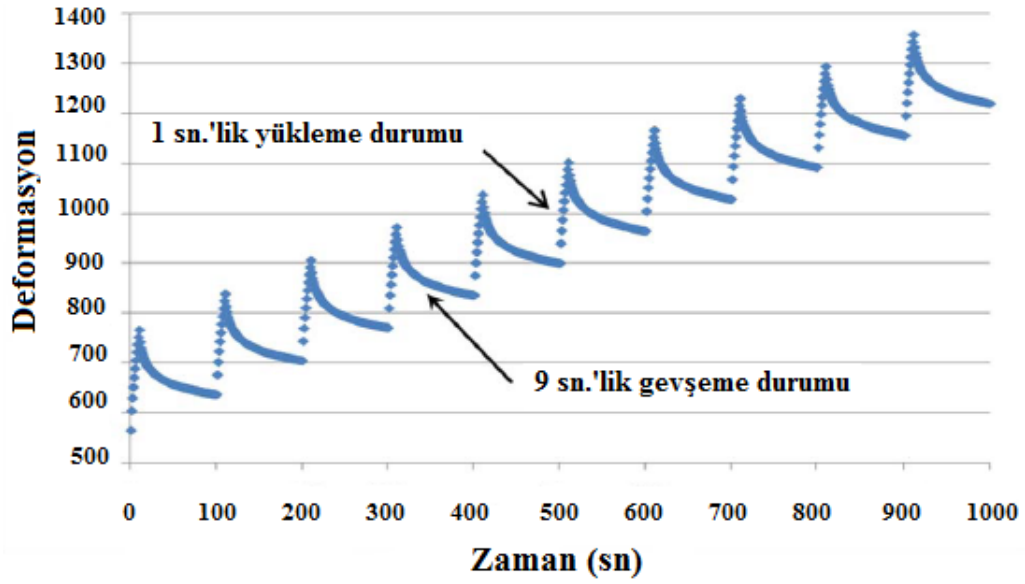
**Şekil 2.29:** Sünme sertliğinin zamana bağlı değişimi.

Superpave şartnamesine göre, bağlayıcıların S değeri maksimum 300 kPa, m-değerin ise minimum 0.300 olması beklenmektedir [42,47,50].

#### 2.1.4.6 MSCR testi

DSR cihazı ile yapılan salınım (oscillation) deneylerinden bağlayıcılara ait elde edilen  $G^*$  değeri, yükün uygulanmasından sonra oluşan bozulmanın/deformasyonun elastik özelliklerini veya kalıcı olma durumunu belirlemede yeterli olmadığı görülmüştür. Bu sebeple, NCHRP (National Cooperative Highway Research Program) tarafından bağlayıcılar üzerinde farklı seviyelerde kayma gerilmelerinin kullanılmasıyla meydana gelen deformasyonun ayrıntılı olarak değerlendirilebildiği MSCR testi geliştirilmiştir. Deneyle, bağlayıcıların yüksek sıcaklık performansının elastik deformasyonların da hesaba katılarak yorumlanması ve kalıcı bozulmaların tahmin edilmesi yapılabilmektedir [51].

Tekrarlı sünme ve toparlanma (repeated creep recovery) deneyleri üzerine geliştirilen MSCR deneyinde, bağlayıcılar üzerinde iki farklı kayma gerilmesi (0.1 kPa ve 3.2 kPa) uygulanmaktadır. Burada, bağlayıcı üzerinde kayma gerilmesi 0.1 kPa'lık yük 1 sn boyunca etki eder ve sonra 9 sn'lik yüksüz bir toparlanma süresi başlar. Bu döngü 10 defa tekerrür ettikten sonra, bağlayıcıya 3.2 kPa'lık yük 1 sn ve 9 sn'lik yüksüz toparlanma süresi uygulanır ve yine 10 defa tekerrür eder. Şekil 2.30'da MSCR deneyine maruz bırakılan bağlayıcının tipik deformasyon-zaman eğrisi gösterilmiştir [52,53].



**Şekil 2.30:** MSCR deneyine ait deformasyon-zaman eğrisi.

Şekil 2.30 incelendiğinde, bağlayıcıda 1sn'lik yükleme anında belirli bir miktar deformasyon oluştuğu, daha sonra 9 sn'lik toparlanma süresinde meydana gelen deformasyonun bir kısmının zamana bağlı olarak yavaşlayan şekilde geri döndüğü, bir kısım deformasyonun ise kalıcı olduğu görülmektedir. Bir sonraki döngüde ise, bağlayıcı üzerine tekrar yük gelmesiyle kalan deformasyon miktarı sürekli olarak artış göstermektedir. Deney bitiminde, elastik geri dönme ( $R$ ) ve geri dönmeyen sünme uyumluluğu ( $J_{nr}$ ) başta olmak üzere çeşitli temel reolojik parametreler hesaplanmaktadır [37]. Bu parametreler bağlayıcının sınıflandırılmasında kullanılmaktadır [54]. Burada  $R$ , asfalt bağlayıcının elastik özelliklerini gösterirken,  $J_{nr}$  ise, yüksek sıcaklık koşulları altında bağlayıcıda oluşacak kalıcı deformasyonu göstermektedir. Bu sebeple, şartname kriteri olarak  $J_{nr}$  kullanılmaktadır [37].  $R$  ve  $J_{nr}$  parametreleri Denklem (2.4)- (2.7) yardımıyla hesaplanmaktadır [55].

$$R = \frac{\sum_{1}^{10} \epsilon_t(\tau, N)}{10} \quad (2.4)$$

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon_1 - \epsilon_{10}}{\epsilon_1} \times 100 \quad (2.5)$$

$$J_{nr} = \frac{\sum_{1}^{10} J_{nr}(\tau, N)}{10} \quad (2.6)$$

$$J_{nr}(\tau, N) = \frac{\epsilon_{10}}{\tau} \quad (2.7)$$

Burada,  $\tau$  kayma gerilmesi,  $N$  döngü sayısı,  $\epsilon_1$ , 1. saniye sonrası oluşan deformasyon miktarı,  $\epsilon_{10}$  10. Saniyedeki deformasyon miktarını göstermektedir.

Bununla birlikte, iki farklı yükleme (0.1 kPa ve 3.2 kPa) sonucunda geri dönmeyen sünme uyumluluğu farkı ( $J_{nr,diff}$ ) ve geri kazanılan deformasyon farkı ( $R_{diff}$ )'da aşağıdaki Denklem (2.8) ve (2.9) yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$J_{nr,diff} = \frac{J_{nr,3.2} - J_{nr,0.1}}{J_{nr,0.1}} \times 100 \quad (2.8)$$

$$R_{diff} = \frac{R_{0.1} - R_{3.2}}{R_{0.1}} \times 100 \quad (2.9)$$

Superpave şartnamesine göre bağlayıcıların yüksek sıcaklık sınıflarının belirlenmesinde, RTFOT kalıntısı bağlayıcıların  $G^*/\sin \delta$  değerinin en az 2.2 kPa olması gerektiği, MSCR deney kriteriyle de güncelleştirilmiştir [56]. Ayrıca, MSCR deneyiyle birlikte Superpave şartname kriterlerinde DSR deney ile belirlenen PG sınıfları da değiştirilmiştir. Güncel şartnamede trafik yoğunluğu da dikkate alınarak yeni şartname limitleri oluşturulmuştur (Çizelge 2.1). Şartnameye göre, dört farklı trafik yoğunluğu (standart, ağır, çok ağır, aşırı ağır) tanımlanmış ve bu trafik yoğunluklarının belirli bir  $J_{nr,3.2}$  (3.2 kPa yük için hesaplanan değer) değerini aşmaması gerektiği ifade edilmiştir. Ayrıca,  $J_{nr}$  farklılıklarını ifade eden  $J_{nr,diff}$  değerinin (0.1 kPa ve 3.2 kPa yükleri arasındaki fark) en az %75 olması beklenmektedir [37].

**Çizelge 2.1 : MSCR testine göre bağlayıcıların PG sınıflaması.**

Trafik yoğunluğu	Deney sıcaklığı (°C)	Limit	PG
Standart	64	Maks. $J_{nr,3.2} < 4.0 \text{ kPa}^{-1}$	PG 64S-Y
Ağır	64	Maks. $J_{nr,3.2} < 2.0 \text{ kPa}^{-1}$	PG 64H-Y
Çok ağır	64	Maks. $J_{nr,3.2} < 1.0 \text{ kPa}^{-1}$	PG 64V-Y
Aşırı ağır	64	Maks. $J_{nr,3.2} < 0.5 \text{ kPa}^{-1}$	PG 64E-Y

Tüm bu değerlendirmelerle birlikte, MSCR testi sonrasında R ve  $J_{nr}$  grafiği çizilerek bu grafikte  $R = 29.37 * J_{nr}^{-0.26}$  eğrisinin çizilmesiyle bağlayıcının polimer modifikasyonunun yeterli düzeyde olup olmadığı da belirlenebilmektedir. Çizilen eğrinin üzerinde kalan R değeri, polimer modifikasyonun yeterli düzeyde yapıldığını ve bağlayıcının elastikiyet özellik kazandığını göstermektedir. Ancak R değeri eğrinin altında kalıyorsa polimer modifikasyonun yetersiz olduğu bunun sebebinin de kullanılan deney sıcaklığından kaynaklandığı ifade edilmektedir [37].

### 2.1.4.7 LAS testi

Asfalt bağlayıcıların orta sıcaklıklardaki yorulma ömrünü tespit etmek için lineer LAS testi gerçekleştirilmektedir [57]. Deney, 25°C sıcaklıkta PAV kalıntısı bağlayıcılar üzerinde gerçekleştirilmekte olup, numuneler deneye hazırlanırken 8 mm çap ve 2 mm kalınlıkta hazırlanmaktadır. LAS testinde, DSR test cihazı kullanılmaktadır ve test AASHTO TP101 standardına göre gerçekleştirilmektedir [58].

Şartnameye göre, bağlayıcının yorulma ömrünü belirlemek için aşağıda verilen Denklem (2.10) yardımı ile yorulma kanunu denklemini VECD teorisi kullanılarak gerekli hesaplamalar yapılmaktadır [59]. VECD teorisi, tekrarlı yüklemelere tabi tutulan bağlayıcının yorulma hasarını ölçmek için kullanılmaktadır. Böylece, farklı deformasyon seviyesindeki bağlayıcıların davranışının tahmin edilmesi mümkün kılınmaktadır.

$$N_f = A \times (\gamma p)^{-B} \quad (2.10)$$

Burada, A ve B parametreleri VECD teorisinin katsayılarını,  $N_f$  yorulma ömrünü, diğer deyişle yorulma bozulmasına uğrayan trafik (döngü) sayısını,  $\gamma p$  ise uygulanan deformasyon genliğini ifade etmektedir. Denkleminde,  $\gamma p=1$  olduğunda yorulma ömrü bağlayıcının A parametresine eşit olmaktadır.

A parametresi bağlayıcının bütünlüğünü koruma özelliğini ifade etmektedir ve yükleme döngüsü sırasında depolama modülü ile doğrudan ilişkilidir. Burada, depolama modülündeki azalma, bağlayıcının bütünlüğünü korumada direnci düşürür ve böylece A parametresi azalır. B parametresi ise, bağlayıcının şekil değiştirmeye karşı duyarlılığını ifade etmektedir. Hesaplamalar sonucunda A parametresinin değeri daha yüksek ve mutlak B parametresi değeri daha düşük ise bağlayıcı daha yüksek yorulma direncine sahiptir ve bu sebeple de yorulma ömrünün daha yüksek olduğu anlamına gelmektedir [57].

Şartnameye göre, LAS testi iki farklı frekans ve farklı genlik deneyleri olarak iki farklı aşamadan meydana gelmektedir. Bunlardan ilki, bağlayıcının reolojik özelliklerini belirlemek için kullanılırken, diğeri bağlayıcının hasar özelliklerini belirlemek için kullanılmaktadır. İlk test, 0.1 Hz'den 30 Hz'e kadar geniş bir frekans aralığında %0.1'lik sabit deformasyonda yapılmaktadır. İkinci testte ise, 10 Hz'de sabit bir frekansta salınımlı deformasyon ise sıfırdan %30'a kadar doğrusal olarak artarak yaklaşık 5 dk içerisinde 310 döngü olacak şekilde yapılmaktadır.

Asfalt bağlayıcıların yorulma ömrü tespit edilirken, farklı frekans deney verileri yardımıyla ilk olarak hasarsız malzeme özelliği ( $\alpha$ ) parametresi hesap edilir. Bunun için,

açısal frekansa bağlı faz açısı  $\delta(\omega)$  ve kompleks kayma modülü  $|G^*(\omega)|$  Denklem (2.11) yardımı ile depolama modülüne  $G'(\omega)$  çevrilir.

$$G'(\omega) = |G^*(\omega)| \cos \delta(\omega) \quad (2.11)$$

Elde edilen depolama modülünün  $G'(\omega)$  log-log ölçeğinde açısal frekansa ( $\omega$ ) karşı eğimi Denklem (2.12) yardımı ile yapılır.

$$\log G'(\omega) = m(\log \omega) + b \quad (2.12)$$

Ayrıca, hasarsız malzeme özelliği ( $\alpha$ ) parametresi Denklem (2.13) kullanılarak da hesaplanabilir.

$$\alpha = 1/m \quad (2.13)$$

Denklem (2.14) kullanılarak zamana bağlı hasar birikimi hesaplanabilmektedir.

$$D(t) \cong \sum_{i=1}^N [\pi \gamma_{p,i}^2 (C_{i-1} - C_i)]^{\alpha/(1+\alpha)} (t_i - t_{i-1})^{1/(1+\alpha)} \quad (2.14)$$

Burada  $C(t) = |G^*(t)| |G^*_{initial}|$ ;  $|G^*|$ , kompleks kayma modülü;  $\gamma_{p,i}$ , belirli bir veri noktası için uygulanan kayma deformasyonu genliği, ve  $t$  deney süresini ifade etmektedir.

Hasar yoğunluğu ( $D(t)$ ) ve Malzeme bütünlüğü ( $C(t)$ ) arasındaki ilişki, Denklem (2.15) ile kuvvet kanunu modeli kullanılarak belirlenebilir.

$$C(t) = C_0 - C_a D(t)^{C_2} \quad (2.15)$$

Denklemde  $C_0$ ,  $C'$ 'nin başlangıç değerini ifade eder ve bire eşittir,  $C_1$  ve  $C_2$  ise eğri uydurma katsayılarıdır.

Denklem (2.16) kullanılarak bağlayıcıların yorulma noktasındaki hasar yoğunluğu ( $Df$ ) ve maksimum kayma deformasyonundaki malzeme bütünlüğünü ( $Cf$ ) kullanarak hesaplanmaktadır.

$$Df = \left( \frac{C_0 - Cf}{C_1} \right)^{1/C_2} \quad (2.16)$$

Bağlayıcının yorulma performansının belirlenmesinde oldukça önemli olan A ve B parametreleri Denklem (2.17) ve (2.18) yardımı ile hesaplanmaktadır.

$$A = \frac{f \cdot Df^{1+\alpha(1-C_2)}}{[1+\alpha(1-C_2)](\pi \cdot C_1 \cdot C_2)^\alpha} \quad (2.17)$$

$$B = 2\alpha \quad (2.18)$$

Özetlenecek olursa, bağlayıcıların her biri için ayrı ayrı olarak A ve B parametreleri ile yorulma ömrü (Nf) değerleri VECD teorisinin yardımıyla elde edilir. Ardından, bağlayıcının yorulma ömrü ve yorulma hasarı tespit edilir [22].

## 2.2 Agregalar

HMA'lar içerisinde ağırlıkça %90-95 oranında bulunan agregalar, genellikle kırmataş malzemelerden oluşur ve kaplamanın mekanik özellikleri üzerinde önemli etkileri vardır. Karışımda kullanılacak agreganın yapısı, boyutları, gradasyonu, porozite, yüzey yapısı, biçimi, yüzey alanı ve boşluk oranı hakkında fikir sahibi olunması, karışımın performansı açısından oldukça önemlidir [7].

Yapı: Sıcak karışımda kullanılan agregaların genellikle kayaların kırılmasıyla elde edilen kırmataştan oluşturulması istenmektedir.

Boyut: Karışım içerisinde kullanılan agrega, dane boyutlarına göre üçe ayrılmaktadır. No:4 elek üstü malzeme "iri agrega", No:4 altı ile No:200 üstü arası malzeme "ince agrega", No:200 altı malzeme ise "filler" olarak ifade edilmektedir.

Gradasyon: HMA'larda genellikle "yoğun-sürekli" gradasyona sahip agregalar kullanılmaktadır. Yoğun sürekli gradasyona sahip agregalar, minimum boşluk ve maksimum yoğunluk ihtiva eder. Böylece, karışımın geçirimsizliğinin azalması ve yoğunluğunun artması hedeflenmektedir.

Porozite: Sıcak karışım hazırlanırken asfalt bağlayıcıyı yeterince emebilmesi için agreganın yeterli poroziteye sahip olması gerekir. Böylece, HMA'nın stabilitesi artar ve soyulması önlenmiş olur.

Yüzey yapısı: Agreganın yüzey yapısı cilahlılığı ve pürüzlülüğü ile ilişkilidir. Pürüzlülük arttıkça işlenebilirlik azalır, bu sebeple de cilalı agregalar HMA için uygun değildir.

Biçimi: Agrega danelerinin biçimi, HMA'nın stabilitesine, işlenebilirliğine, yoğunluğuna ve kayma mukavemetine doğrudan etki etmektedir. Yuvarlak, köşeli, ince-uzun ve yassı olmak üzere agrega daneleri 4 farklı biçimde sınıflandırılır. Köşeli agregalar stabilite açısından yuvarlak olanlara nazaran daha dirençlidir.

Yüzey alanı ve boşluk oranı: Agrega danelerinin toplam yüzey alanı ve daneler arasındaki boşluk oranı toplamı HMA'ya doğrudan etki etmektedir. Danelerin yüzey alanları

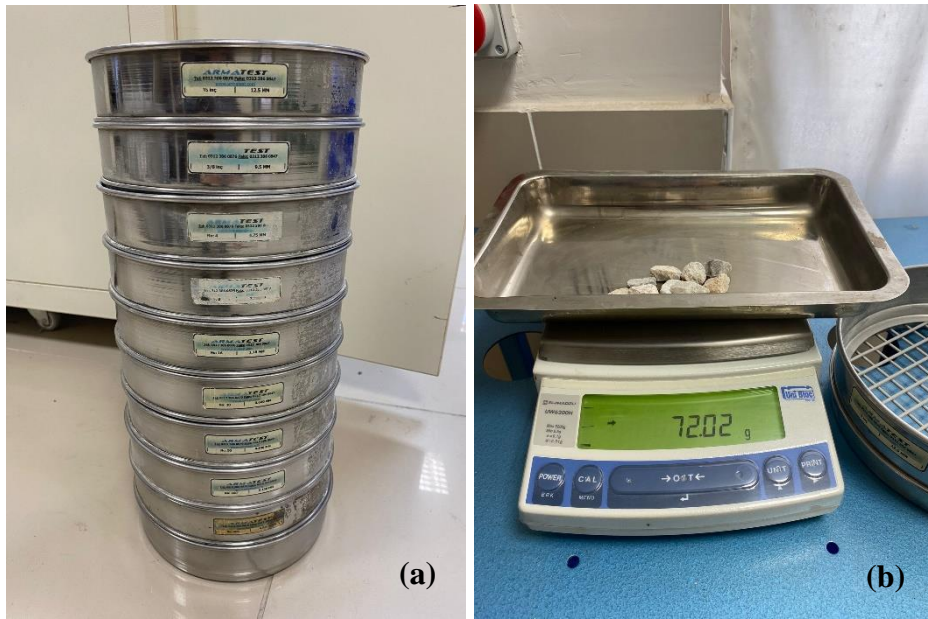
ve toplam boşluk oranları maks. dane çapı, gradasyon ve dane biçimine bağlı olarak değişmektedir. Dane çapı ne kadar küçükse, yüzey alanı ve boşluk hacmi artar ve böylece karışıma girecek asfalt miktarı artar. Boşluğun artmasından dolayı da karışımın yoğunluğu azalır. Dane çapı artarsa, işlenebilirlik zorlaşır ve karışımın yoğunluğu artar, ancak burada karışıma girecek bağlayıcı miktarı azalır ve bundan dolayı da karışımın durabilitesi, kohezyonu ve stabilitesi azalır.

## 2.2.1 Agregalara uygulanan testler

HMA'da kullanılan agregaların fiziksel özellikleri belirlenirken agregalar çeşitli testlere de tabi tutularak sıcak karışıma uygunluğu tam olarak belirlenmelidir. Bunun için, agregalar üzerinde uygulanan testler aşağıda verilmiştir.

### 2.2.1.1 Elek analizi testi

Sıcak karışıma girecek olan agreganın dane boyutu dağılımını belirlemek amacıyla ASTM C131 standardına göre, karışık halde bulunan agregalar üzerinde elek analizi testi uygulanmaktadır. Testte, küçükten büyüğe doğru dizilmiş olan eleklerin (Şekil 2.31a) üzerinden bir miktar agrega bırakılır. En az 2 dk boyunca sarsma tablasında elekler sarsma işlemine tabi tutulur. Süre bitiminde, eleklerin üstünde kalan agregalar tartılarak (Şekil 2.31b) toplam agrega ağırlığına göre elek üstü kalan ve geçen yüzdelere hesaplanır. Bu oranlardan yararlanılarak agreganın granülometre eğrisi çizilir [42].



Şekil 2.31: (a) Elekler (b) elek üstü malzemelerin tartımı.

### 2.2.1.2 Özgül ağırlık testi ve su emme oranı tayini

TS EN 1097-6 standardına göre, bir malzemenin 25 °C sıcaklıktaki birim hacminin ağırlığının, aynı hacme sahip suyun ağırlığına bölünmesi özgül ağırlık olarak ifade edilmektedir. Agregaların hacim tanımlamasına göre zahiri, hacim ve efektif olmak üzere üç farklı özgül ağırlık hesabı vardır. Zahiri özgül ağırlıkta, bağlayıcının tüm geçirimli boşluklar tarafından dolduğu kabul edilmektedir. Hacim özgül ağırlık hesabında, bağlayıcının geçirimli boşluklar tarafından dolmadığı kabul edilir. Efektif özgül ağırlık hesabında ise, boşluklara dolan bağlayıcı miktarı dikkate alınır ve bu hesap karışımdaki boşluk hesabında en iyi sonucu vermektedir [60]. Denklem (2.19) ve (2.20) yardımı ile agrega karışımına ait özgül ağırlık hesapları yapılabilmektedir [61]. Bununla birlikte, Şekil 2.32’de agregaların özgül ağırlık hesaplarında kullanılan agrega hacim tanımlamaları verilmiştir [62].

$$Gsb = \frac{\%K + \%İ + \%F}{\left(\frac{\%K}{Gkb}\right) + \left(\frac{\%İ}{Gib}\right) + \left(\frac{\%F}{Gfa}\right)} \quad (2.19)$$

$$Gsa = \frac{\%K + \%İ + \%F}{\left(\frac{\%K}{Gka}\right) + \left(\frac{\%İ}{Gia}\right) + \left(\frac{\%F}{Gfa}\right)} \quad (2.20)$$

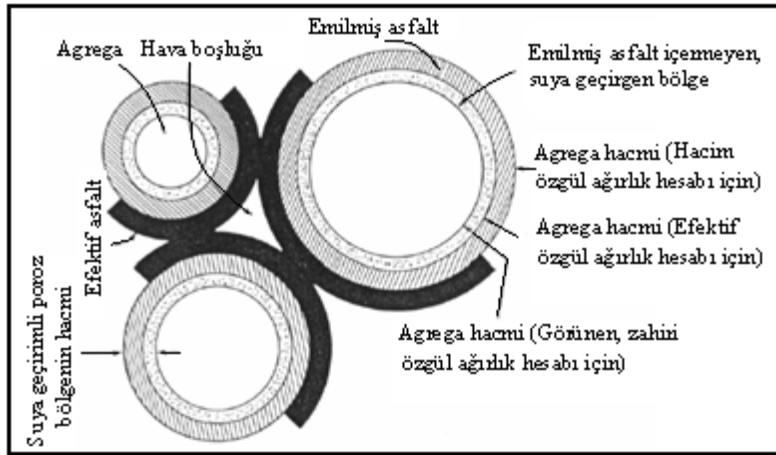
Gsb= Agreg a karışımının hacim özgül ağırlığı

Gsa= Agreg a karışımının zahiri özgül ağırlığı

%K (kaba),%İ (ince),%F (filler)= Ağırlıkça yüzdeler

Gkb, Gib= Hacim özgül ağırlık (Kaba ve ince)

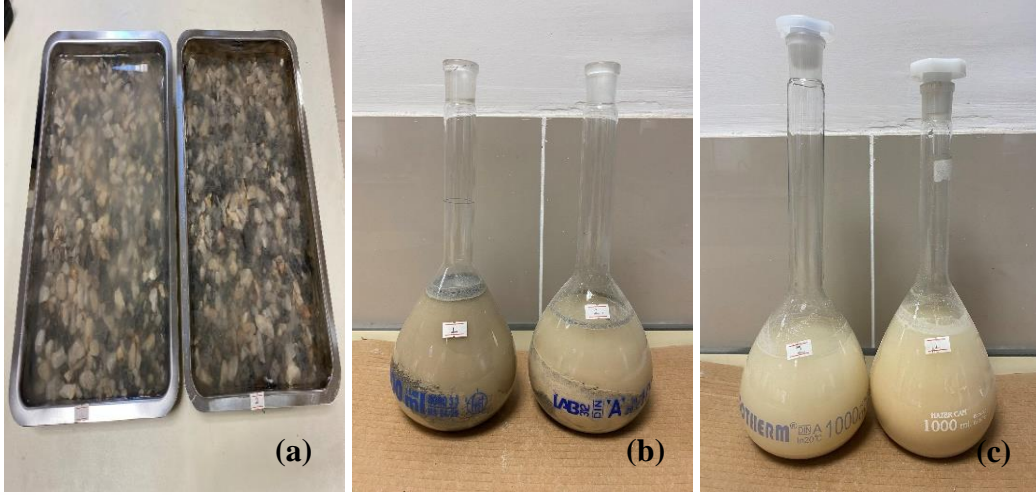
Gka, Gia, Gfa= Zahiri özgül ağırlık (Kaba, ince ve filler)



Şekil 2.32 : Agregalara ait özgül ağırlık hesabında kullanılan hacimler.

Karışıma girecek agreganın özgül ağırlığının doğru olarak belirlenmesi, karışımda kullanılacak asfalt oranı tayininde yardımcı olmaktadır. Sıcak karışım hesabında kullanılan agrega için özgül ağırlık hesabı, yolda sıkıştırılan kaplamadaki hava boşluğu oranını en

doğru veren özgül ağırlık hesabı olmalıdır [43]. Şekil 2.33’de çalışmada kullanılan kaba, ince ve filler malzemelerin özgül ağırlıklarının tayinine ait görseller verilmiştir.



Şekil 2.33 : (a) Kaba (b) ince (c) filler malzemelerin özgül ağırlıklarının belirlenmesi.

### 2.2.1.3 Aşınmaya karşı direnç testi

Agregaların aşınmaya karşı direnci TS EN 1097-2 standardına göre Los Angeles testi ile belirlenmektedir. Deneyde, belirli bir miktardaki agrega 11 adet bilye ile birlikte tambur içerisine (Şekil 2.34) yerleştirilir ve belirli bir devir sayısında döndürülür. Devir sayısı bittiğinde, tamburdan çıkarılan malzeme elekten geçirilir ve yıkanıp kurutulur. Sonrasında, aşınma oranı tayin edilir ve HMA’da kullanılacak agreganın aşınma oranının en fazla %30 olması istenmektedir [63].



Şekil 2.34 : Los Angeles tamburu.

Son yıllarda, agregaların aşınmaya karşı direnci Mikro-deval testi ile de belirlenmektedir. Testte, özellikle iri agregalar ve su ile devamlı temas eden malzemelerde

suyun aşındırma etkisi de dikkate alındığından bu test daha çok tercih edilmektedir. Mikro-deval testinde, agregalarla birlikte su ve bilyeler de tambura koyulur ve tamburun belirli bir hızda dönmesi sağlanır. Burada, sürtünmenin sebep olduğu aşınma ölçülür. Deney bitiminde, malzeme elekten elenir ve elek altında kalan kısım yüzde olarak Mikro-deval katsayısı olarak alınır. Bu katsayının yüksek olması, agreganın aşınma direncinin düşük olduğunu göstermektedir. Test, 1097-1 standardına göre uygulanmakta olup test için kabul edilebilir sınır %18 olarak kabul edilmektedir [64].

#### **2.2.1.4 Cilalanma testi**

Trafik yükleri altında taşıt lastiklerinin kaplamaya teması ile agregalarda meydana gelen aşınma sonucunda agregaların hangi dereceye kadar cilalandığının tayin edilmesi için TS EN 1097-8 standardına göre yapılmaktadır. Yol sathının cilalı agregalardan inşa edilmiş olması, yol kaplamalarının kaymaya karşı direncini etkileyen önemli faktörlerden biridir [43]. Test sonucundaki cilalanma miktarı, yoğunluğu az olan yollarda bir kaç yılda, yoğun trafikli yollarda ise birkaç ayda ulaşabileceği aşınmaya tekabül etmektedir. HMA kaplamalarda aşınma tabakasında kullanılacak olan agregaların min. cilalanma katsayısının %50 olması beklenmektedir [65].

#### **2.2.1.5 Yassı ve ince uzun taneler testi**

Sıcak karışım içerisinde bulunan yassı şekilli ve ince uzun taneli agregalar, HMA gradasyonunu bozmakta ve HMA'nın stabilitesini azaltmaktadır. Bu sebeple, karışımda hem yassı hem de ince uzun taneler istenmemektedir. Karışık haldeki 4.75mm'den büyük agregalarda bulunan yassı ve ince uzun tanelerin ayrılması için yassılık indeksi test aparatı kullanılmaktadır. Test, ASTM D4791 standardına göre gerçekleştirilir ve kaba tanelerin maks. boyutunun min. boyuta oranı 5'ten büyük olursa bu agregalar yassı ve ince uzun taneler olarak nitelendirilmektedir [43]. Yassı ve uzun tane şartname kriteri Çizelge 2.2'de verilmiştir.

**Çizelge 2.2 : Yassı ve uzun tane kriteri.**

Trafik (ETDY), Milyon	% Maks.
< 0.3	-
< 1.0	-
< 3.0	10
< 10	10
< 30	10
< 100	10
≥100	10

#### **2.2.1.6 Soyulma testi**

Soyulma, bağlayıcının su ve trafik etkileriyle agregadan ayrılmasıdır. Bir HMA kaplamanın ömrü hakkında bilgi sahibi olmada, bağlayıcı ile agreganın birbirine bağlanması önemli ölçüde etkilidir. Özellikle hidrofilik agregalar ve sıvı bağlayıcılar ile inşa edilen kaplamalarda su ve çevre (trafik vb.) etkileriyle agrega bağlayıcıdan ayrılır ve kaplama kısa sürede deforme olarak ayrışıp dağılır. Bu sebeple, agregaların soyulmaya karşı gösterdiği direnci tespit edebilmek amacıyla ASTM D1664 standardına göre soyulma testi gerçekleştirilmektedir. Testte, belirli ağırlıktaki agrega alınarak yıkanır ve ardından etüvde kurutulur. Kuruyan malzemeye bağlayıcı eklenerek tüm agregaların bağlayıcı ile çevrelenmesi sağlanır. Elde edilen bağlayıcı+agrega harmanı 60 °C sıcaklığa sahip etüvde 24 saat boyunca bekletilir. Daha sonra, harman ısıtılarak geniş bir tepsiye alınır ve tepside tekrar aynı sıcaklık ve sürede bekletilir ve süre sonunda deney sonlanır. Isıtılıp daha geniş bir kaba aktarılır ve yine 60 °C sıcaklıkta 24 saat bekletildikten sonra deney sonlandırılır. Deney bitiminde, agreganın soyulmaya karşı dayanımı soyulmamış yüzeyin bütün yüzeye bölünerek hesaplanır [34]. Elde edilen sonuç, aşınma tabakası için en az %50 olması gerekmektedir [65].

#### **2.2.1.7 Donma ve çözülme testi**

Test, TS EN 1367-1 standardına göre hava koşulları etkisiyle agregaların donması ve bunun sonucunda ufalanmasına karşı gösterdiği direnci tayin etmek amacıyla uygulanmaktadır. Donma ve çözülme testinde magnezyum sülfat ( $MgSO_4$ ) çözeltisi kullanılmaktadır. Testte, etüv kuru agregalar magnezyum sülfat çözeltisine daldırılır ve 25°C sıcaklıkta 16-18 saat çözeltide bekletilir. Süre bitiminde agregalar çözeltilerden çıkartılır ve 15 dk kadar süzdürülür. Ardından, 110 °C sabit sıcaklıkta kuruma işlemine tabi tutulur. Bu işlemler 5 defa tekrar edilir ve sonucuda etüvden çıkarılan soğumaya bırakılır. Son

olarak soğuyan agregalar yıkanıp kurutulur ve elenir [34]. Test sonucunda agreganın donma kaybı Denklem (2.21) yardımı ile hesaplanmaktadır. Burada, agreganın ilk kuru toplam ağırlığı  $M_1$ , belirtilen elekteki agreganın toplam nihai kuru ağırlığı  $M_2$ , donma kaybı ise  $F$  ile sembolize edilmiştir. Bununla birlikte, Çizelge 2.3’de elek açıklığına göre teste tabi tutulan agrega miktarı ve test sonunda agreganın elendiği elek no’ları verilmiştir.

$$F = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100 \quad (2.21)$$

Gece ve gündüz sıcaklık farkının fazla olduğu iklim koşullarında donma çözülme testi oldukça önem arz etmektedir. KGM şartname limitlerine göre  $MgSO_4$  çözültüsüyle yapılan donma ve çözülme testinde maks. donma kaybı, iri agregalar için %27, ince agregalar için ise %22 olarak sınırlandırılmıştır [64,66].

**Çizelge 2.3 :** Teste tabi tutulan malzeme miktarları ve kullanılan elekler.

Elek açıklığı (mm)		Alınacak miktar (gr)		Test sonu elenecek elek açıklığı (mm)
4.75-2.00 arası		100 ± 0.1		2.00
9.5-4.75 arası		300 ± 5		4.00
19.0-9.5 arası	12.5-9.5 arası	1000 ± 10	330 ± 5	8.00
37.5-19.0 arası	25.0-19.0 arası	1500 ± 50	500 ± 30	16.00
63.0-37.5 arası	50.0-37.5 arası	5000 ± 300	2000 ± 200	31.50
Bundan iri tanelerin elek boyutunun her 25mm artışında		7000 ± 1000		Üzerinde kaldığı elek

### 2.3 HMA’dan Beklenen Özellikler

HMA kaplamaların üzerlerine gelen trafik yüklerini güvenle taşıyabilmesi ve çevre koşullarının olumsuz etkilerinden korunabilmesi amacıyla çeşitli özelliklere sahip olması gerekmektedir. Bu sebeple, karışımlar hazırlanırken karışımı meydana getiren malzemelerin özelliklerinin iyi bilinmesi, karışım tasarımı yapılırken tüm bu özelliklerin göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Bununla birlikte, karışımın uygun ortamda ve uygulama sıcaklıklarda hazırlanması da kaplamanın performansını etkileyen önemli özelliklerdir.

HMA kaplamalar statik ve dinamik yükler etkisindeyken ve olumsuz çevre koşulları altındayken yeterli stabilite ve durabiliteye sahip olmalıdır. Bununla birlikte, yorulmaya ve kaymaya karşı dirençli olan, esneklik özelliğini koruyabilen ve geçirimsizliği iyi olan

kaplamalar olmalıdır. Ayrıca, sıcak karışımın işlenebilirliğinin iyi olması üretim ve serim aşamasında oldukça önemli bir diğer husustur. Bu durumda, HMA kaplamalardan beklenen tüm bu özelliklerin iyi bilinmesi kaplamanın performansı ve hizmet ömrü açısından önem arz etmektedir [7,60].

### **2.3.1 Stabilité**

Sıcak kaplamalar, üzerlerine gelen yükleri deformasyonlara uğramadan taşıyabilmelidir. Kaplamanın stabilitesi, yükler altında kaplamanın kalıcı deformasyona (tekerlek izi) karşı direnç gösterebilme yeteneğidir. Stabilitenin yüksek olması kaplamanın üzerine gelen trafik yüklerini kolayca karşılayabilmesini gösterse de çok yüksek stabilite istenen bir durum değildir. Çünkü çok yüksek stabilite kaplamanın aşırı sert olduğunu gösterir ki kaplamanın aşırı sertliği çatlakların oluşmasına sebep olmaktadır. Bu yüzden karışımların belirli bir stabiliteye sahip olması gerekmektedir [7].

### **2.3.2 Kaymaya karşı direnç**

HMA kaplamalar, her türlü çevre koşulları altında (yağmur, kar vb.) iken taşıtların uygun mesafede durabilmeleri için ideal sürtünme direncine sahip olmalıdır. Kaplamanın kaymaya karşı direncinin yüksek olması, sıcak karışımında sert ve pürüzlü agregaların kullanımı ile ve agrega gradasyonundaki iri malzeme miktarının artırılması ile sağlanmaktadır. Bununla birlikte, karışım içerisine giren bağlayıcı miktarı da kayma direnci üzerinde etkilidir [7].

### **2.3.3 Esneklik**

HMA kaplamaların üzerlerine gelen yükleri güvenle taşıyabilmenin yanında yükün etkisi bittikten sonra da kaplamada bozulma meydana gelmeden eski halini alabilmesi gerekmektedir. Bu sebeple, kaplamanın esnek yapıda olması ve bu özelliğini kaybetmemesi gerekmektedir. Sıcak karışımındaki bağlayıcı miktarı ve agrega gradasyonu kaplamanın esnekliği üzerinde önemli faktörlerdir [42].

### **2.3.4 Durabilite**

Sıcak karışımın durabilitesi yani dayanıklılığı, bağlayıcının yaşlanma ve oksidasyona, bununla birlikte agreganın ise kırılma, soyulma vb. olumsuz durumlara karşı koyabilme yeteneğidir. Tüm bu durumlar, yapım hataları, olumsuz çevre koşulları ve tasarım hatalarından kaynaklanmaktadır. Sıcak karışımın bu olumsuz durumlara karşı dayanıklı

olması, karışım içerisindeki yüksek miktardaki bağlayıcı içeriğiyle, kırılmaya ve soyulmaya karşı yüksek dirençli agregayla ve karışım içerisindeki min. hava boşluğu miktarı ile sağlanabilmektedir. Bunların olmadığı durumlarda ise bağlayıcı ile agrega arasındaki adezyon zayıflar ve karışımın durabilitesi düşer [41].

### **2.3.5 Geçirimsizlik**

HMA kaplamaların su ve hava etkilerini alt tabakalara iletmesine karşı gösterdiği direnç geçirimsizlik olarak ifade edilmektedir. Kaplamanın geçirimsizliği, sıcak karışımdaki boşluk oranı ile belirlenmektedir. Sıcak karışım tasarlanırken boşluk oranının yüksek olması, karışımdaki bağlayıcı içeriğinin düşük olması ya da serim aşamasında yetersiz sıkışmanın yapılması karışımın geçirimsizliğini azaltmaktadır [7].

### **2.3.6 Yorulmaya karşı direnç**

Trafik yükleri altında HMA kaplamanın tekrarlanan eğilmelere karşı gösterdiği tepki, yorulmaya karşı dirençtir. Sıcak karışımdaki bağlayıcının viskozitesi ve karışımın boşluk oranı yorulmaya karşı direnç üzerinde önemlidir. Bununla birlikte, kaplamanın dayanımı ve kalınlığı da yorulmaya karşı direnç üzerinde etkilidir. HMA kaplamalarda görülen timsah sırtı çatlakları, kaplamanın yorulmaya karşı direncinin az olması sebebiyle meydana gelmektedir. Bu durum, sıcak karışımdaki bağlayıcı miktarının az olması, bağlayıcının yaşlanması, yetersiz kaplama kalınlığı ve karışımdaki boşluk oranının fazla olması sebebiyle meydana gelmektedir. Bununla birlikte, yorulmaya karşı dirençte bağlayıcının sertliği de önemli bir etken olup yumuşak kıvamlı bağlayıcıların yorulma performansının sert kıvamlı bağlayıcılara kıyasla daha yüksek olduğu bilinmektedir [7,41].

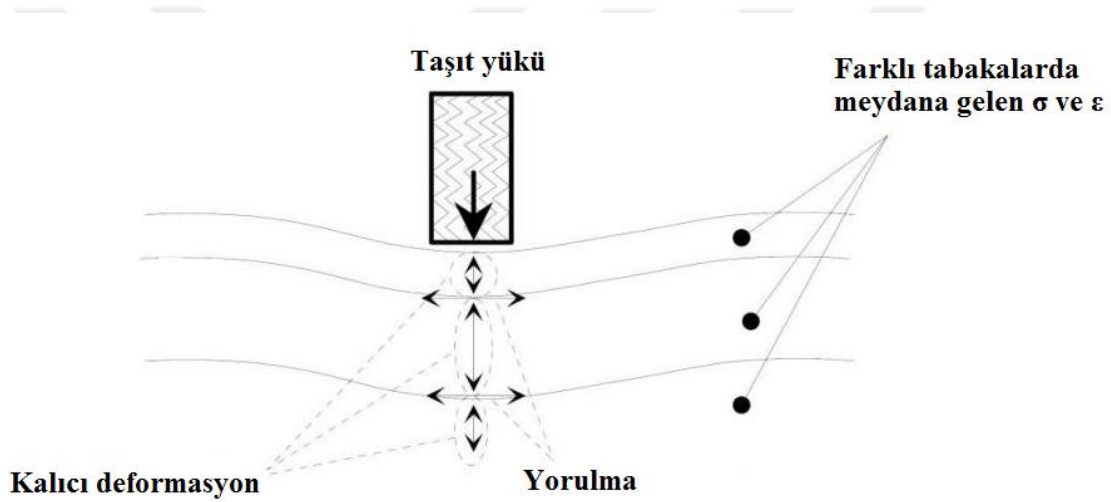
### **2.3.7 İşlenebilirlik**

Sıcak karışımların plentte hazırlanma ve yolda serilip sıkıştırılma esnasındaki işlemlerin kolaylıkla yapılabilmesi işlenebilirlik olarak tanımlanmaktadır. HMA içerisindeki iri agreganın fazla olması, karışımdaki bağlayıcı miktarının az olması ve bağlayıcının viskozitesinin yüksek olması karışımın işlenebilirliğini zorlaştırmaktadır. İşlenebilirliği azalan karışımların kalıcı deformasyonlara karşı direnci azalır ve hizmet ömrü düşer. Bu sebeple, agrega özelliklerinin iyi bilinmesi, karışım gradasyonunun uygun oranlarda hazırlanması ve ideal viskoziteye sahip uygun miktardaki bağlayıcının sıcak karışımda kullanılması gerekmektedir [7,41,42].

## 2.4 HMA Kaplamalardan Meydana Gelen Bozulmalar

Ağır taşıt yükleri, yapım ve tasarım hataları, ani sıcaklık değişimleri ve diğer çevresel etmenler (su vb.) sebebiyle HMA kaplamalarda yorulma çatlakları, tekerlek izi oluşumu, termal çatlaklar, ayrışmalar ve sökülmeler gibi bozulmalar meydana gelmektedir. Meydana gelen bu bozulmalar, HMA kaplamada sık görülen bozulmalar olup, kaplamanın belirli bir bölümünde ya da kaplama boyunca devam edebilmektedir.

Kaplama tabakasındaki tekerlek yükü, Şekil 2.35’de görüldüğü gibi kaplamanın her bir alt tabakasından yatayda çekme gerilmelerine ( $\sigma$ ) (yorulma), düşeyde ise basınç gerilmelerine ( $\epsilon$ ) neden olarak kaplamaların şekil değiştirmesine (kalıcı deformasyon) sebep olurlar [67].



Şekil 2.35 : Taşıt yükü ve kaplama tepkisi.

### 2.4.1 Yorulma çatlakları

HMA kaplamalarda 10 °C ile 40 °C sıcaklıkları arasındaki ara sıcaklıklarda, kaplama alt tabakalarının yetersiz kalınlıklarda olması, ağır dingil yükleri ve çok miktarda yük tekrarları sebebiyle yorulma çatlakları (Şekil 2.36) meydana gelmektedir. Yorulma çatlakları, kümes teli ya da timsah sırtı görünümünde olup birbiri ile örüntü şeklinde bağlantılıdır. Kaplama yüzeyinin %20'sinde bu çatlaklar varsa, kaplama bozulmuş olarak kabul edilmektedir [42,67].

Kaplamalardaki yorulma çatlaklarını önlemek amacıyla, kalın tabaka kalınlıklarına sahip kaplamalar tasarlamak, kaplama tasarımı esnasında ağır taşıt yüklerini doğru hesaplamak, yüksek stabiliteye ve yeterli esnekliğe sahip kaplama tasarımları yapmak gerekmektedir [41].



**Şekil 2.36** : Yorulma çatlaklarına örnek.

#### 2.4.2 Tekerlek izi

Hava sıcaklığının yüksek olduğu durumlarda (özellikle 40 °C sıcaklık ve üstünde) ve ağır taşıt trafiğinin yoğun olduğu yollarda, asfalt bağlayıcı daha yumuşak kıvamlı ve viskoz olma eğilimindedir. Bu koşullarda, kaplamalarda tekerlek izi veya kalıcı deformasyonlar meydana gelmektedir [67] (Şekil 2.37).

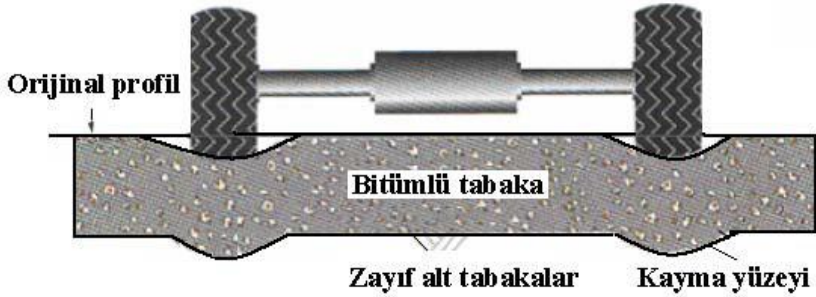


**Şekil 2.37** : Tekerlek izine örnek.

Tekerlek izi, kaplamanın her bir tabakasındaki malzemelerin plastik deformasyonuna neden olan, artan trafik yükü tekrarlarının bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır (Şekil 2.38). Bununla birlikte, inşası tamamlanan kaplamaların trafik etkisiyle konsolidasyonu da tekerlek izine neden olabilmektedir (Şekil 2.39) [41,67].



**Şekil 2.38** : Plastik deformasyon sebebiyle tekerlek izi oluşumu.

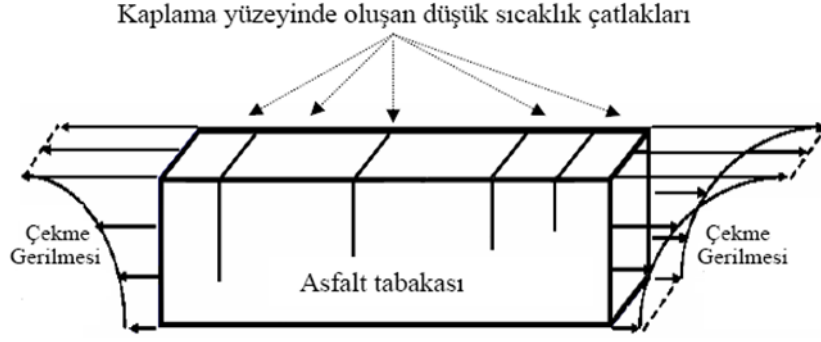


**Şekil 2.39** : Konsolidasyon sebebiyle tekerlek izi oluşumu.

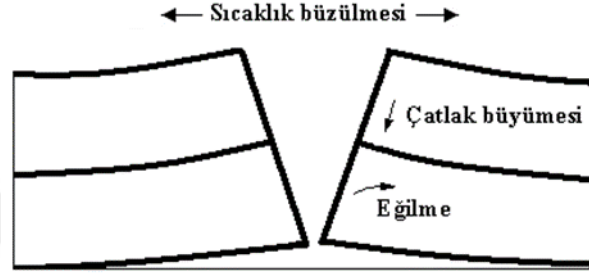
HMA'nın uygun sıcaklıklarda üretilmemesi ve sıkıştırılmaması, sıcak karışımda yüksek oranda bağlayıcı kullanılması, yetersiz tabaka kalınlığı, agrega olarak dere malzemesi kullanımı ve agrega parçacıkları arasındaki iç fraksiyonun kaybı sebebiyle de tekerlek izi deformasyonları oluşabilmektedir. HMA kaplamada, 20 mm'lik bir tekerlek izi derinliği varsa, kaplama bozulmuş olarak kabul edilmektedir. Tekerlek izini önlemek amacıyla, yüksek içsel sürtünme direncine sahip agrega ve elastik bir katı gibi davranan asfalt bağlayıcılar kullanılarak ideal uygulama sıcaklıklarında HMA üretimi ve uygulaması yapılmalıdır [41].

### 2.4.3 Termal çatlaklar

Düşük hava sıcaklıklarında, kaplama yüzeyinde soğuma ile birlikte büzülme meydana gelir ve kaplamada çekme gerilmeleri gelişmeye başlar (Şekil 2.40). Bu gerilmeler, kaplama tabakasının kırılma dayanımını aştığı zaman kaplama merkezine dik doğrultuda, enine çatlaklar oluşur ve bunlara termal çatlaklar denilmektedir. Termal çatlaklar, önce kaplama yüzeyinde oluşur ve zamanla ağır dingil yükleriyle alt tabakalarda da oluşmaya başlar [42,67] (Şekil 2.41).



Şekil 2.40 : Kaplamadaki çekme gerilmeleri ve oluşan çatlaklar.



Şekil 2.41 : Çatlakların büyümesi.

Bu çatlak türünün oluşumunda, bağlayıcının kıvamı oldukça önemli bir etkidir. Bu sebeple, düşük sıcaklığa sahip bölgelerde yumuşak kıvama sahip olan ve sıcaklığa karşı hassasiyeti az olan bağlayıcılar kullanılması bu çatlakların oluşumunu azaltmaktadır. Bununla birlikte, HMA içerisinde bağlayıcı miktarı, bağlayıcının yaşlanması, meteorolojik verilere dayanarak bağlayıcı seçimi ve kaplama tasarımı yapımı termal çatlakları önleme de önemli diğer etmenlerdir [1,62,68]. Şekil 2.42’de kaplamada görülen termal çatlaklara ait görsel verilmiştir [67].



Şekil 2.42 : Termal çatlak örneği.

#### 2.4.4 Ayrışmalar

HMA kaplama su, trafik ve diğer çevresel etmenler sebebiyle zaman içerisinde küçük parçalar halinde kopar ve parçalanmaya başlar. Kaplamadan agregaların birbirinden ayrışıp ayrılması genel olarak kaplama tasarımında yapılan hatalar, kullanılan malzemelerin kalitesinin yetersiz olması, kaplamanın inşası sırasında yeterli özenin gösterilmemesi (yetersiz sıkıştırma veya yanlış serim işlemi gibi), yetersiz bağlayıcı miktarı ve adezyon sebebiyle meydana gelmektedir [42].



**Şekil 2.43 :** Kaplamada meydana gelen ayrışmalara örnek.

Kaplamada meydana gelen ayrışmaların (sökülme, parçalanma ve soyulma gibi) önlenmesi için, kaliteli malzeme kullanılmalı, kaplama inşası sırasında yeterli özen gösterilmeli ve sıcak karışım hazırlanırken bağlayıcı miktarının iyi belirlenmesi gerekmektedir.

HMA kaplamalarda, sık görülen bu bozulmalar dışında, büzülme, kenar, derz, kayma ve yansıma olmak üzere çeşitli diğer çatlaklarda meydana gelmektedir. Bu çatlakların da oluşmasındaki sebepler, yukarıdaki bozulmalarda olduğu gibi, yapım ve işçilik hataları, agrega ya da bağlayıcının özelliklerinin tam olarak bilinmemesi, malzemenin kalitesiz olması ve yetersiz kaplama kalınlığıdır [1,34,69].

#### 2.5 HMA Tasarım Yöntemleri

Dünyada ve ülkemizde, ideal sıcak karışım asfaltların tasarımında son derece iyi planlaması yapılmış bir laboratuvar programı ile doğru belirlenmiş tasarım kriterleri olmazsa olmazdır. Agreganın yeterli sıcaklıkta ısıtılarak kurutulması ve yeterince ısıtılarak akıcı kıvama getirilen bağlayıcının asfalt plentinde karıştırılmasıyla elde edilen HMA'lar, diğer

bitümlü kaplamalara kıyasla daha yüksek maliyetlidirler. Bu sebeple, tasarım yöntemlerinin titizlikle hazırlanmasıyla HMA kaplamadan beklenen performansları sağlaması için istenilen mühendislik özelliklerinin uygun koşullarda ve doğru şekilde tespit edilmesi gerekmektedir.

HMA'ların tasarım yöntemleri ve bu yöntemlere ait gerekli bilgiler Asphalt Enstitüsünün yayınladığı "Manuel Series No.02 (MS-2 Asphalt Mix Design Method)" da belirtildiği üzere, üç farklı yöntemle yapılmaktadır. Bunlar Marshall, Hveem ve Superpave tasarım yöntemleridir.

Bu çalışmada, karışım tasarımında Marshall tasarım yöntemi esas alınmıştır. Bunun için, ilk olarak Hveem ve Superpave tasarım yöntemlerine ait gerekli bilgiler bu bölümde kısaca alt başlıklar halinde açıklanmış, ardından Marshall tasarım yöntemine ait gerekli bilgiler genişçe izah edilmiştir [7].

### **2.5.1 Hveem tasarım yöntemi**

Hveem karışım tasarım yöntemi, oldukça yüksek sıcaklığa sahip bölgelerde (çöl gibi) kalıcı deformasyona karşı dirençli sıcak karışımların tasarımında oldukça faydalı bir yöntemdir. Bu yöntemle, seçilmiş bir agrega gradasyonuna göre 4 farklı bağlayıcı içeriğine göre briket numuneleri hazırlanır ve değişik şartlar için testler uygulanır. Elde edilen test sonuçlarına göre bir karar piramidi çizilir ve bu piramit kullanılarak her seferinde şartı sağlayan maks. asfalt içeriği seçilerek üç aşamada optimum asfalt içeriği belirlenmiş olur. Hveem tasarım yöntemiyle hazırlanan briket numuneleri 63.5mm yükseklikte ve 101.6 mm çapındadır. Bu briket numuneleri, uygulama sıcaklıkları (karıştırma ve sıkıştırma) tespit edilmiş şekilde hazırlanır. Hveem karışım tasarım sistematğinde, ilk olarak optimum asfalt içeriğini tespit etmek için santrifüj kerosen eşitliği (CKE) (agrega yüzey alanına göre), daha sonra, sıcak karışımdaki boşluk miktarı, stabilite, kohezyon ve şişme testleri esas alınmaktadır. Hveem karışım tasarım yönteminde, sıkıştırılmış numune içerisindeki agrega stabilitesi daha fazla deneye tabi tutulur ve bu da Marshall karışım tasarımından en önemli farkıdır. Optimum asfalt içeriği tayininde de, Hveem ile belirlenmiş karışımların optimum içeriği, Marshall ile belirlenen karışımlardan neredeyse %0.3 daha az elde edilmektedir [7].

### **2.5.2 Superpave tasarım yöntemi**

Superpave tasarım yöntemi, 20. yüzyılın sonlarına doğru geliştirilmiş olan yeni bir tasarım yöntemidir. Bu yöntemde, asfalt bağlayıcı (PG) ve agregadan beklenen

performanslar ile sıcak karışımın hacimsel özelliklerini esas alan performansa dayalı bir tasarım esas alınmaktadır. Superpave tasarım yöntemindeki aşamalar sırasıyla aşağıda verilmiştir.

- İlk olarak tasarım yöntemine göre asfalt bağlayıcı ve agrega seçilir.
- İkinci aşamada, seçilen bağlayıcı ile agrega (gradasyona göre) karıştırılır ve kısa dönem yaşlandırmaya tabi tutulur.
- Üçüncü aşamada, bir trafik değeri seçilir ve bu trafik değerine göre yoğurmalı sıkıştırıcı ile briket numuneleri hazırlanır.
- Hazırlanan numunelerin hacimsel özellikleri tespit edilir.
- Belirlenmiş performansa göre sıcak karışım için en uygun bağlayıcı oranı ve agrega gradasyonu seçilir.
- Karışımlar performans testlerine tabi tutulur [7].

### 2.5.3 Marshall tasarım yöntemi

Marshall tasarım yöntemi, iklim ve çevre şartlarına dirençli, trafik yükleri altında deformasyon göstermeyecek kadar dayanıklı ve esnek olan ve yeterli hava boşluğuna sahip bir sıcak karışım için gereken optimum asfalt içeriğini belirlemede kullanılmaktadır. Bununla birlikte, ideal serim ve sıkıştırma koşulunu yerine getiren agrega gradasyonu ile ekonomik bir HMA hazırlamak bu tasarım yönteminin diğer bir hedefidir. Marshall karışım tasarım yönteminin aşamaları aşağıda sırasıyla verilmiştir.

- İlk olarak karışımda kullanılacak agrega ve bölge iklim şartlarına uygun asfalt bağlayıcı belirlenir.
- İkinci aşamada agregaya ait gerekli analizler yapılır ve bir agrega gradasyonu (maks. dane boyutu 25 mm) oluşturulur.
- Üçüncü aşamada, en az 5 farklı oranda asfalt bağlayıcı kullanılarak karışım numuneleri hazırlanır.
- Hazırlanan numuneler Marshall tokmağı ile sıkıştırılır ve böylece briket numuneleri elde edilmiş olur.
- Briket numunelerinin çeşitli hacimsel özellikleri tespit edilir.

- Numuneler Marshall stabilite ve akma testine tabi tutulur. Elde edilen sonuçlar, bir önceki aşamada elde edilen sonuçlarla birlikte işlenir.
- Hazırlanan her oran için, ortalama pratik yoğunluk ( $D_p$ ), maks. teorik özgül ağırlık ( $D_t$ ), hava boşluğu yüzdesi ( $V_h$ ), agregalar arası boşluk yüzdesi (VMA) ve asfaltla dolu boşluk yüzdesi (VFA) değerleri hesaplanır.
- Stabilite ve akma sonuçlarıyla birlikte, ortalama  $D_p$ , VMA,  $V_h$ , VFA, Marshall Stabilite ve akma değerleri grafikleri çizilir.
- Grafiklerden, yoğunluk ve stabilitenin maks. olduğu, %4  $V_h$ 'nin tekabül ettiği ve %70  $V_f$ 'ye tekabül eden değerlerin ortalaması alınarak optimum asfalt içeriği belirlenir.
- Belirlenen optimum bağlayıcı içeriği değerine göre KTŞ limitleri kontrol edilir ve kıyaslama yapılır.

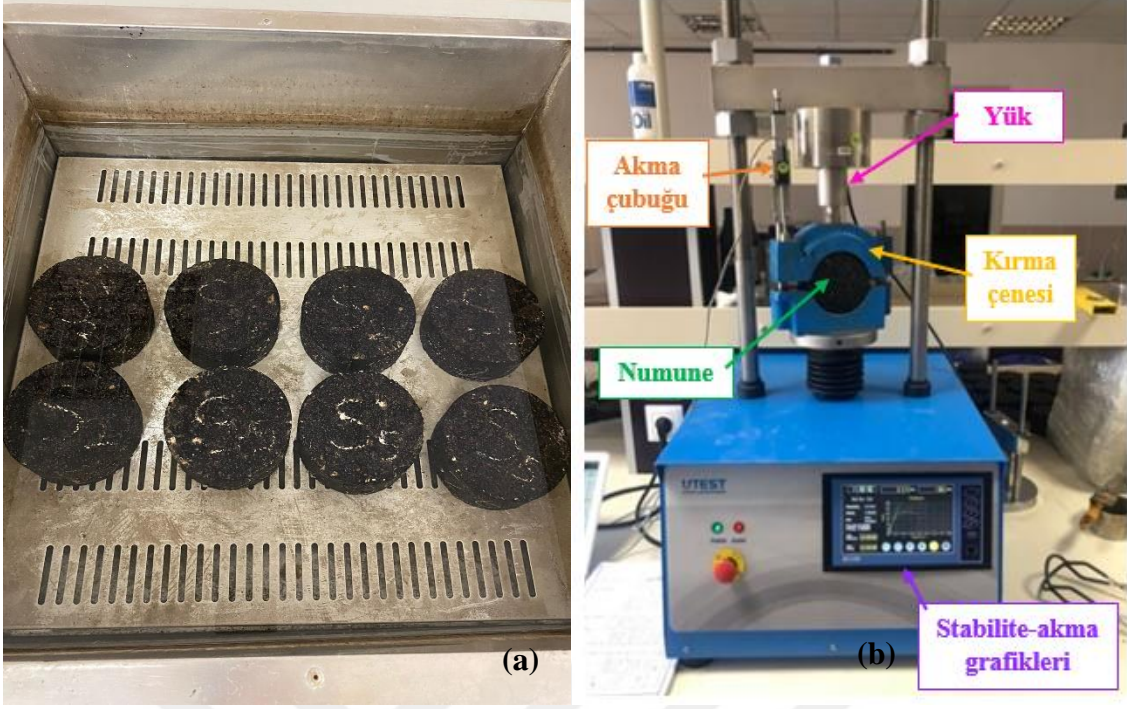
Güncellenen şartnameye göre, optimum içerik belirlenirken asfalt betonu aşınma tabakası için % 4, binder için % 4.5 - % 5 ve bitümlü temel tabakası için de % 5 - % 5.5 arası  $V_h$  değerlerine tekabül eden değer optimum içerik olarak kabul görülmektedir [7,42].

## 2.6 HMA Testleri

Sıcak karışımların mekanik özelliklerini belirlemek ve kaplamaların performansı hakkında bilgi sahibi olmak için karışım numuneleri üzerinde çeşitli testler yapılmaktadır. HMA'lar üzerinde uygulanan bu testler Marshall stabilite ve akma, kalıcı Marshall stabilitesi (RMS), dolaylı çekme mukavemeti (ITS), Modifiye Lottman, dolaylı çekme rijitlik modülü (ITSM), statik ve dinamik sünme ve dolaylı çekme yorulma testleridir.

### 2.6.1 Marshall stabilite ve akma testi

HMA'ların ASTM D6927 standardına göre maks. yüke karşı gösterdikleri dayanım ve maks. dayanım anındaki düşey deformasyonlarını belirleyebilmek için Marshall stabilite ve akma bu testi uygulanmaktadır. Teste başlamadan önce çeşitli fiziksel ve hacimsel özellikleri belirlenen sıcak karışımlar ilk olarak 60 °C sıcaklıkta 40 dk. kadar bekletilir (Şekil 2.44a). Ardından su banyosundan sırayla çıkarılan numuneler 50.8 mm/dk sabit hız ile yüklemeye tabi tutulur (Şekil 2.44b). Yükleme sonucunda numuneye ait stabilite ve akma değerleri cihaz ekranında otomatik olarak verilir. Bununla birlikte, asfalt karışımının kalıcı deformasyonunu, mukavemetini ve tekerlek izine karşı dayanımını tahmin etmek amacıyla stabilitenin akmaya oranlanması ile Marshall oranı (MQ) değeri belirlenir [70].



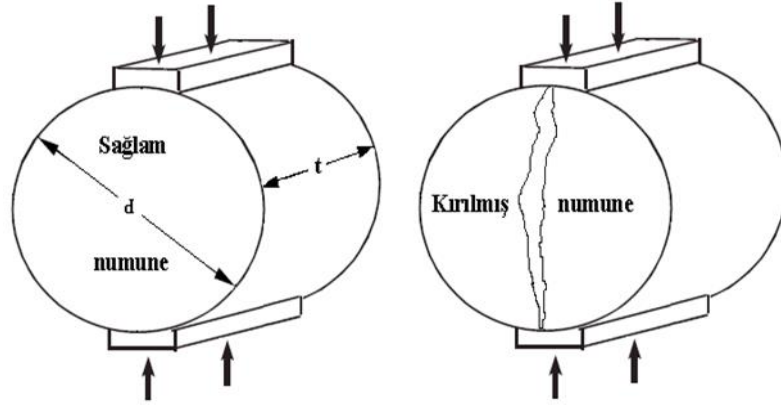
Şekil 2.44 : (a) Suda bekletilen numuneler (b) numunelerin deneye maruz bırakılması.

### 2.6.2 RMS testi

HMA kaplamaların sudan kaynaklı nem hasarlarına karşı dayanımları RMS testi ile belirlenmektedir. Bu amaçla, briket numuneler yaklaşık 60°C sıcaklığa sahip su banyosunda 24 saat bekletilir ve ardından Marshall stabilite cihazı ile yüklemeye maruz bırakılmaktadır. Burada yükleme sonucu belirlenen stabilite değerinin numunenin normal stabilite değerine oranlanmasıyla RMS değeri elde edilmektedir. Yüksek RMS değerine sahip olan HMA'ların su etkilerine karşı daha yüksek dirence sahip olduğu değerlendirilmektedir [70].

### 2.6.3 ITS testi

HMA kaplamalarda yorulma ve sıcaklık sebebiyle meydana gelen çekme mukavemeti özelliklerinin belirlenebilmesi için AASHTO T245 veya ASTM D4123 standardına göre ITS testi yapılmaktadır. Test, Marshall cihazı kullanılarak dakikada 50 mm'lik yük artış hızında gerçekleştirilir ve çap doğrultusunda yüklenen silindirik briket numunesinin kırılması ile sonuçlandırılır (Şekil 2.45). ITS testi ile birlikte HMA kaplamaların yüzeyinin kırılma özellikleriyle ilgili bir bağlantı da kurulabilmektedir [42].

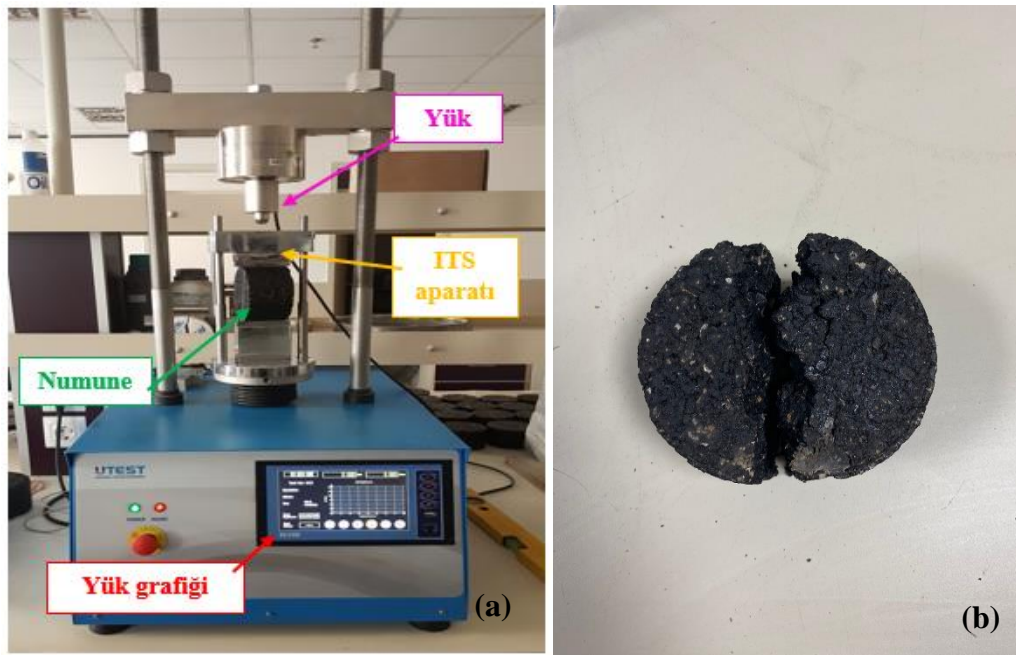


Şekil 2.45 : ITS testinde yükleme durumu ve numunenin kırılması.

Sıcak karışımların ITS değeri Denklem (2.22) yardımı ile hesaplanmaktadır. Burada,  $P_{maks}$  uygulanan maks. yükü (kN),  $d$  numune çapını (mm),  $t$  ise numune kalınlığını (mm) ifade etmektedir.

$$ITS = \frac{2P_{maks}}{\pi \cdot t \cdot d} \quad (2.22)$$

ITS testi, sıcak karışımların kohezyon kuvveti, sertlik ve durabilitesi hakkında değerlendirme yapabilmek için de kullanılmaktadır. Test sonucunda artış gösteren ITS değerinin elde edilmesi, sıcak karışımın kohezyon kuvvetinin de arttığını göstermektedir [42]. Şekil 2.46'da ITS testine tabi tutulan numune ve test sonrası kırılan numune gösterilmiştir.

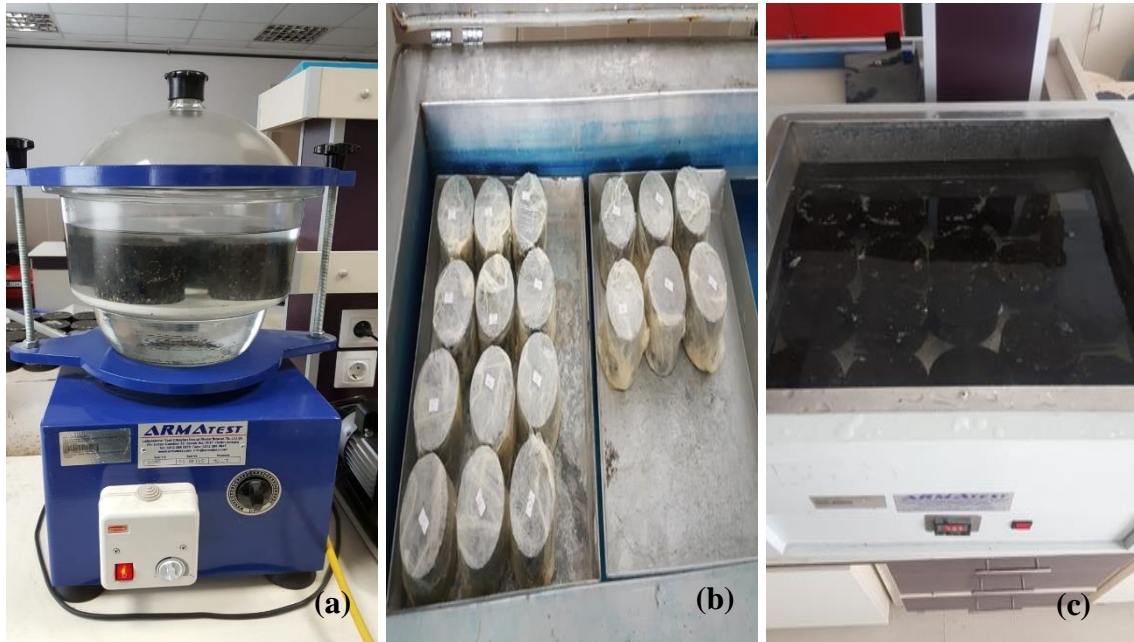


Şekil 2.46 : (a) ITS testine tabi tutulan numune (b) test sonrası kırılmış numune.

#### 2.6.4 Modifiye Lottman testi

HMA kaplamaların su ile teması sonucu hasar görmeye karşı gösterdiği direnç nem hassasiyeti olarak ifade edilmektedir. Kaplama bünyesindeki su, asfalt bağlayıcı ve agregalar arasındaki bağı zayıflatarak kaplamaya zarar vermektedir. AASHTO T283 standardına göre sıcak karışımların nem hassasiyeti bu test ile belirlenmektedir. Testte numuneler “koşullandırılmış” ve “koşullandırılmamış” olmak üzere iki gruba ayrılır. Koşullandırılmış numunelerde, numunenin hava boşluk hacmi bir vakum ile %60-80’i su ile doldurulur (Şekil 2.47a). Ardından streç sargı ile çevrenir ve bu numuneler -18°C sıcaklıkta 16 saat bekletilir (Şekil 2.47b). Süre bitiminde numuneler 60°C sıcaklıktaki su banyosunda 24 saat bekletilir (Şekil 2.47c). Buradan çıkartılan numuneler 25°C’deki su banyosunda 2 saat daha bekletilir. Aynı anda koşullandırılmamış numuneler ise 25°C’deki su banyosuna 2 saat süreyle yerleştirilir. Daha sonra hem koşullandırılmış hem de koşullandırılmamış numunelerin dolaylı çekme direnci (ITS) belirlenir. Koşullandırılmış numunelerin dolaylı çekme direnci ( $ITS_{yaş}$ ), koşullandırılmamış numunelerin dolaylı çekme direnci ( $ITS_{kuru}$ ) olarak ifade edilir ve dolaylı çekme direnci oranı (ITSR) değeri Denklem (2.23) ile belirlenmektedir. HMA numunelerinin sudan kaynaklı bozulmalara karşı dirençleri bakımından ITSR değerlerinin %80’den daha fazla olması istenmektedir [70].

$$ITSR = (ITS_{yaş} / ITS_{kuru}) \times 100 \quad (2.23)$$

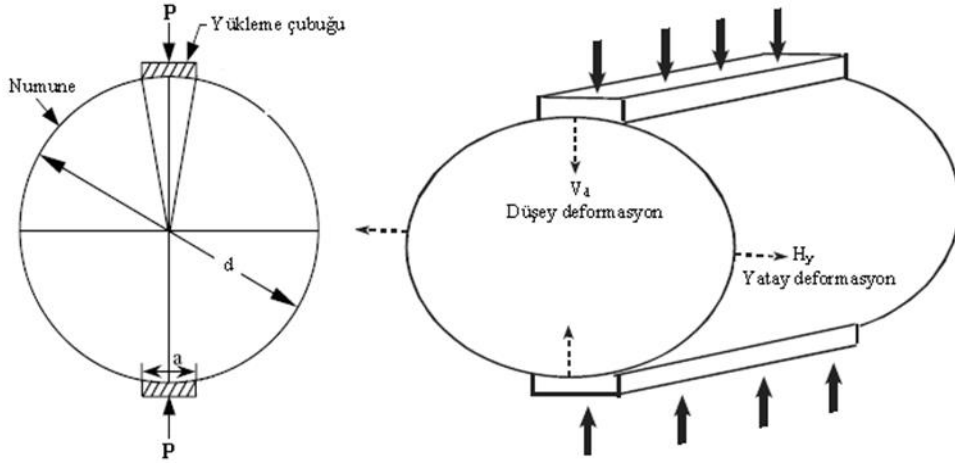


Şekil 2.47 : (a) Vakum işlemi (b) numunelerin dondurucuda dondurulması (c) su banyosunda bekletilmesi.

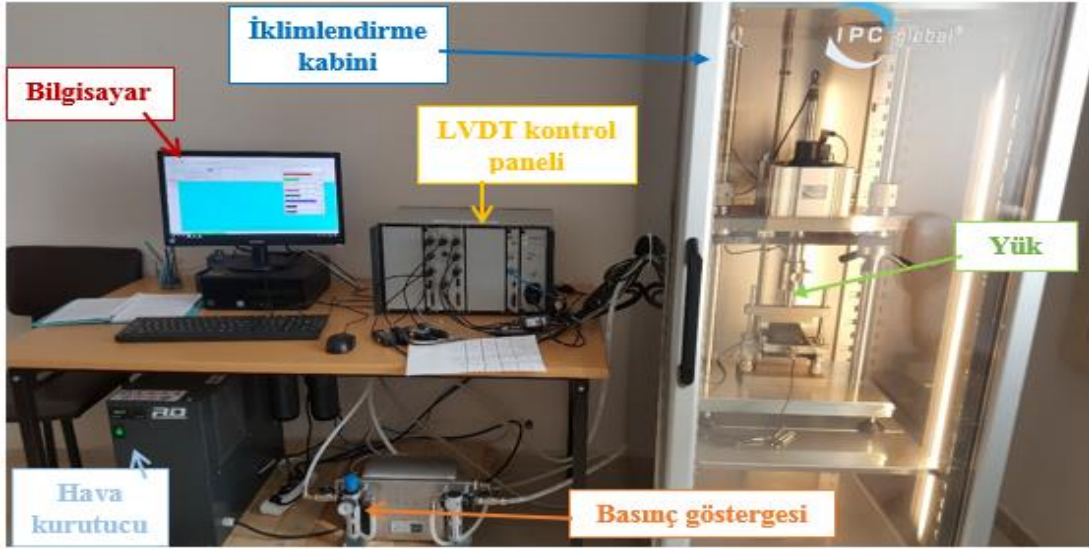
### 2.6.5 ITSM testi

Asfalt karışımların sertlik modülü, ASTM D4123 standardına göre ITSM testi ile belirlenmektedir. Sertlik modülü, HMA kaplamanın dinamik yükler altındaki taşıma kapasitesini değerlendirmek için önemli bir parametredir ve kaplamanın yorulma davranışı ve performansı hakkında da fikir sahibi etmektedir. Ayrıca, HMA kaplamadaki tabakaların yük yayma kabiliyeti ve viskoelastik davranışı da yine sertlik modülü yardımıyla analiz edilebilmektedir. Test, haversine yükleme şekli ile tekrarlanan yük uygulanarak gerçekleştirilmektedir. Karışım numuneleri genellikle 0°C ve 25°C'lik sıcaklıklarda test tabii tutulmaktadır. Test bitiminde sertlik modülü Denklem (2.24) yardımı ile hesaplanmaktadır. Burada  $S_m$  rijitlik modülü (MPa),  $P$  tekrarlanan yük (N),  $t$  numunenin kalınlığı (mm),  $\Delta H$  geri kazanılabilir yatay deformasyon (mm) ve  $\nu$  ise Poisson oranını (0.35 olduğu varsayılır) ifade eder [71]. ITSM testi uygulanan numunede meydana gelen deformasyon Şekil 2.48'de [42], ITSM test düzeneği Şekil 2.49'de, teste tabii tutulan numune ve elde edilen şekil değiştirme grafiği ise Şekil 2.50'de verilmiştir.

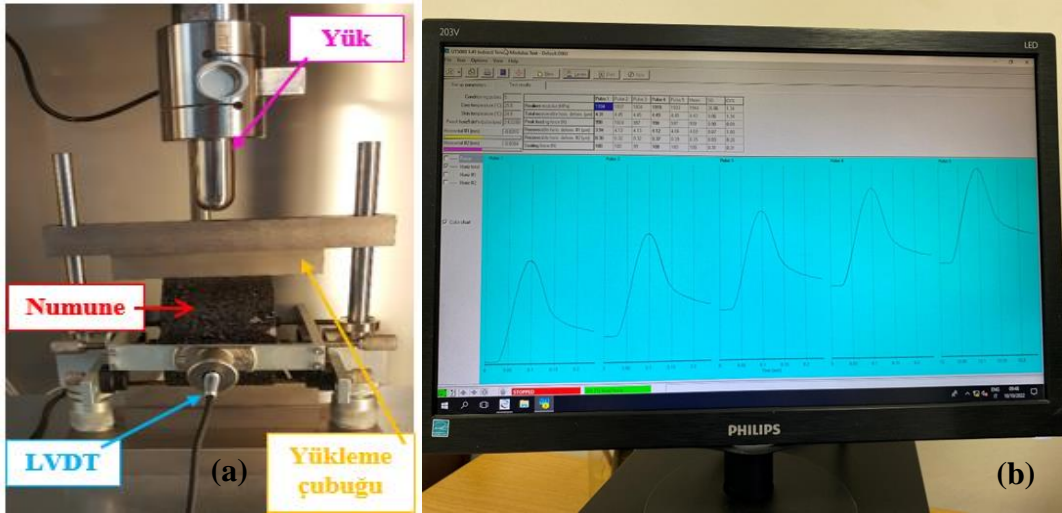
$$S_m = \frac{P \times (\nu + 0.27)}{t \Delta H} \quad (2.24)$$



Şekil 2.48 : ITSM testi uygulanan numunede meydana gelen deformasyon.



Şekil 2.49 : ITSM test düzeneği.



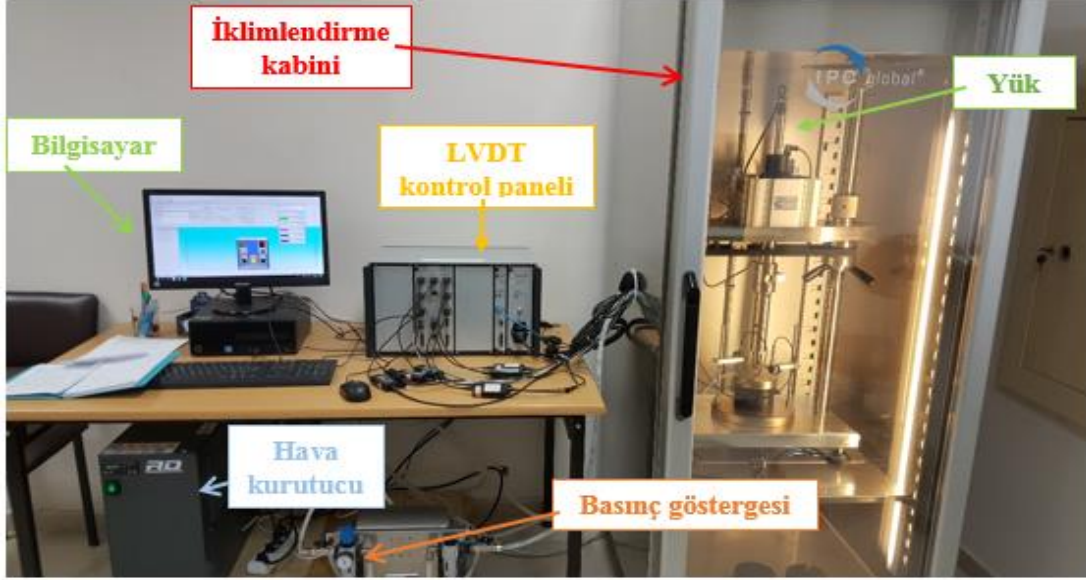
Şekil 2.50 : (a) Teste tabi tutulan numune (b) şekil değiştirmeler.

### 2.6.6 Sünme testi

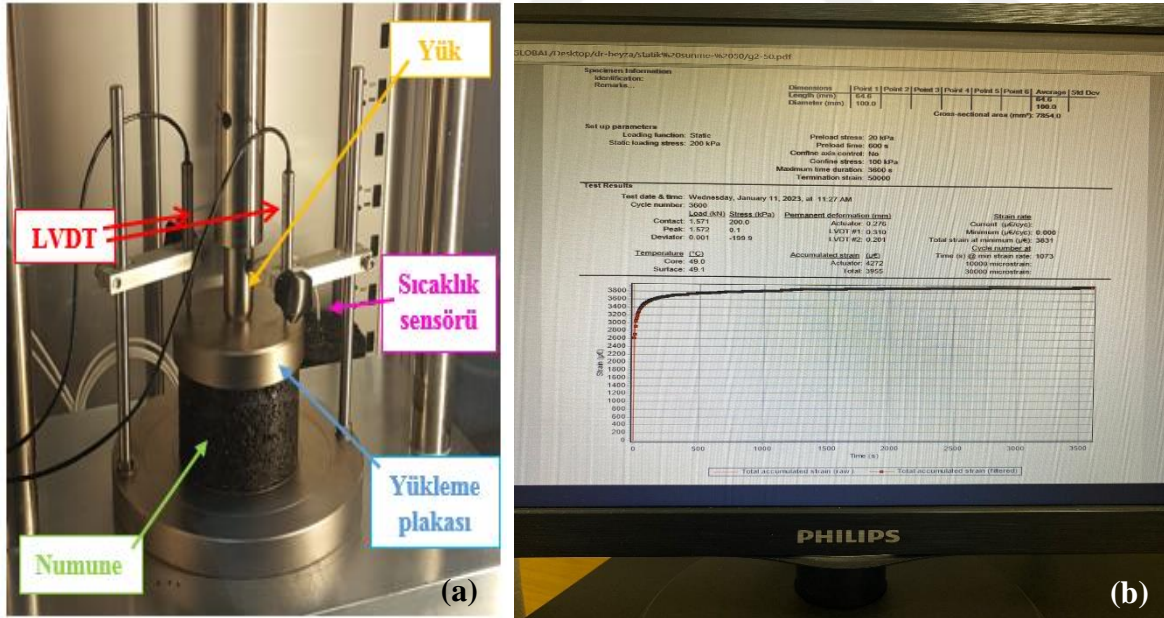
HMA kaplamalarda, yük çeşidine göre iki farklı şekilde sünme testi uygulanmaktadır. Kaplamada sabit trafik yükleri sebebiyle meydana gelen kalıcı deformasyonlara karşı direnç EN 12697-25A standardına göre statik sünme testi ile belirlenmektedir. Statik tek eksenli sünme testinin gerçekleştirildiği koşullar şunlardır: (a) 40°C standart test sıcaklığı, çok sıcak iklimlerde 50°C; (b) 0.01 MPa şartlandırma stresi altında 10 dakikalık ön yükleme; (c) test 0.2 MPa'ya eşit sabit yük stresi; (d) Test süresi: 1 saat yükleme ve 1 saat boşaltma olarak ayarlanmaktadır. Test sırasında eksenel deformasyon zamanın bir fonksiyonu olarak ölçülmektedir. Numunenin ilk yüksekliği bilindiğinden, herhangi bir yükleme anında uygulanan gerilme ( $\sigma$ ) eksenel gerinim ( $\epsilon$ ) ve rijitlik modülü

( $S_{mix}$ ) Denklem (2.25) ile belirlenebilmektedir. Sünme test düzeneği Şekil 2.51’de, teste tabi tutulan numune ve statik sünme deneyinden elde edilen toplam birim şekil değiştirme deformasyon grafiği Şekil 2.52’de verilmiştir [72].

$$S_{mix} = \sigma / \varepsilon \quad (2.25)$$



Şekil 2.51 : Sünme test düzeneği.



Şekil 2.52 : (a) Sünme testine tabi tutulan numune (b) elde edilen birim şekil değiştirme grafiği.

HMA kaplamada hareketli yükler sebebiyle meydana gelen kayma deformasyonları kaplamada tekerlek izi oluşmasına sebep olacağından, kaplamaların kayma deformasyonlarına karşı yeterince dayanıklı olması gerekmektedir. Dinamik sünme testi, EN 12697-25A standardına göre sıcak karışımların kayma deformasyonlarına karşı direncini değerlendirmek için kullanılan bir testtir. Test, çeşitli sıcaklık ve yüklemelerde yapılabilmektedir. NCHRP 9–19'da açıklanan yöntemine göre, test genellikle 50°C sıcaklıkta gerçekleştirilmektedir. Ana yüklemeye önce numuneler 10 dakika boyunca 10 kPa ön yüklemeye tabi tutulmaktadır. Ana yük, 10 kPa'lık bir temas gerilimi ve 500 kPa'lık bir saptırıcı gerilimi olan yarı sinüzoidal bir yüküdür ve bu yükleme bozulmaya (failure) kadar devam ettirilir. Sonuçta, numunelerin bu yük altında kümülatif deformasyonları ölçülmüş ve deformasyon-yüklemeye döngüleri grafikleri çizilmiş olmaktadır [71]. Test sonucunda Denklem (2.26) – Denklem (2.30) kullanılarak sünme sertliği değeri belirlenmektedir [73]. Burada;  $E_c$  sünme sertliği (MPa);  $\sigma$  uygulanan dinamik gerilme (MPa);  $\epsilon_c$  toplam plastik kalıcı gerilim,  $E_r$  esneklik modülü,  $\epsilon_r$  toplam elastik aksenal şekil değiştirme,  $L_1$  başlangıç LVDT deplasmanı (mm),  $L_{2n}$  n.darbedeki maks. deplasman (mm),  $G$  yükseklik,  $F$  maks düşey yük (kN),  $A$  numune kesit alanı ( $\text{cm}^2$ )'dir.

$$E_c = \sigma / \epsilon_c \quad (2.26)$$

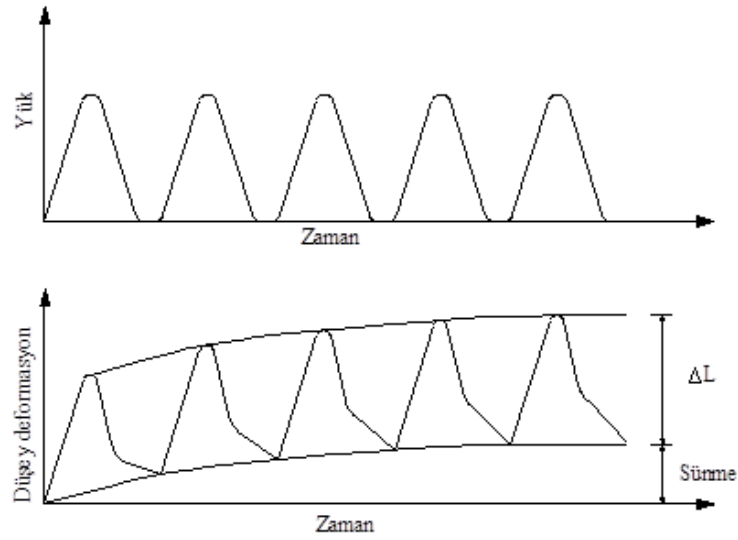
$$E_r = \sigma / \epsilon_r \quad (2.27)$$

$$\epsilon_c = (L_{3n} - L_1) / G \quad (2.28)$$

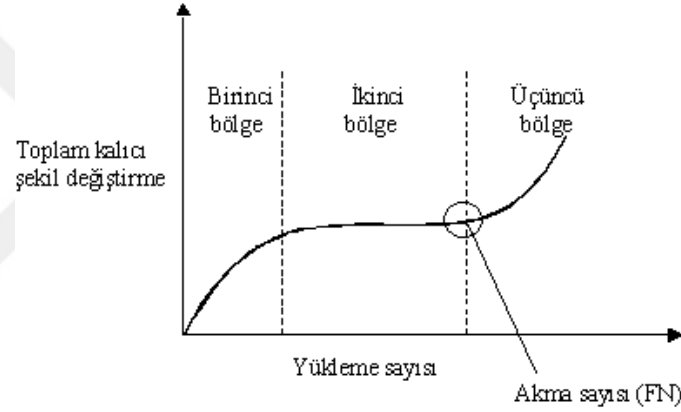
$$\epsilon_r = (L_{2n} - L_{3n}) / (G - (L_{3n} - L_1)) \quad (2.29)$$

$$\sigma = F / A \quad (2.30)$$

Test, silindirik bir numuneye dinamik bir yük uygulamayı ve bunun sonucunda meydana gelen deformasyonu ölçmeyi içermektedir. Numune üzerinde uygulanan yük-zaman ve oluşan düşey deformasyon-zaman grafiği Şekil 2.53'de verilmiştir. Ölçümden sonra, karışımın kalıcı deformasyona karşı performansını belirleyebilmek için yükleme altındaki toplam kalıcı şekil değiştirme-zaman grafiği çizilmektedir (Şekil 2.54).



**Şekil 2.53 :** Yük-zaman ve düşey deformasyon-zaman grafikleri.

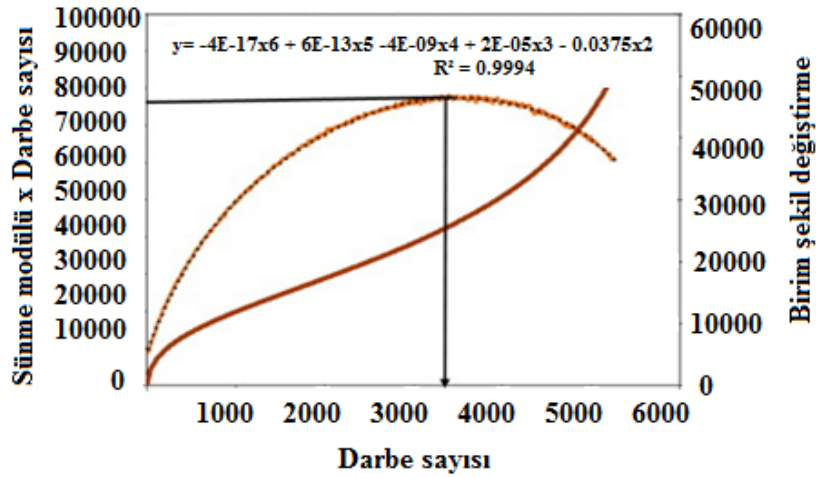


**Şekil 2.54 :** Toplam kalıcı şekil değiştirme- yükleme sayısı grafiği.

Şekil 2.54’de görüldüğü gibi, yüklemeye maruz kalan karışım için çizilen grafik üç bölgeden geçen eğriden oluşmaktadır. I. bölgede oturma meydana gelir ve hacim azalır, bununla birlikte şekil değiştirme hızlı bir artış gösterir fakat sonra bu artış azalır. II. bölgede, lineere yakın bir şekil değiştirme meydana gelmektedir. III. bölgede ise kayma deformasyonları oluşmaya başlar ve toplam şekil değiştirme tekrar hızlıca artış gösterir. Burada III. bölgenin başladığı andaki yük tekrarı, “akma sayısı (flow number- FN)” olarak kabul edilir ve FN, karışımın tekerlek izine karşı direncinin bir ölçüsüdür [74–77].

Akma sayısının tespit edilmesinde, çok fazla yöntem vardır. Bu yöntemlerden en çok Bausano ve Williams (2007) tarafından geliştirilen yöntem kullanılmaktadır. Buna göre, düşey eksene sünme modülü ile darbe sayısının çarpılarak yazılır. Yatay eksene ise darbe

sayısı yazılır. Buradan bir grafik çizilir ve grafiğin pik noktası FN olarak kabul edilmektedir (Şekil 2.55) [78].



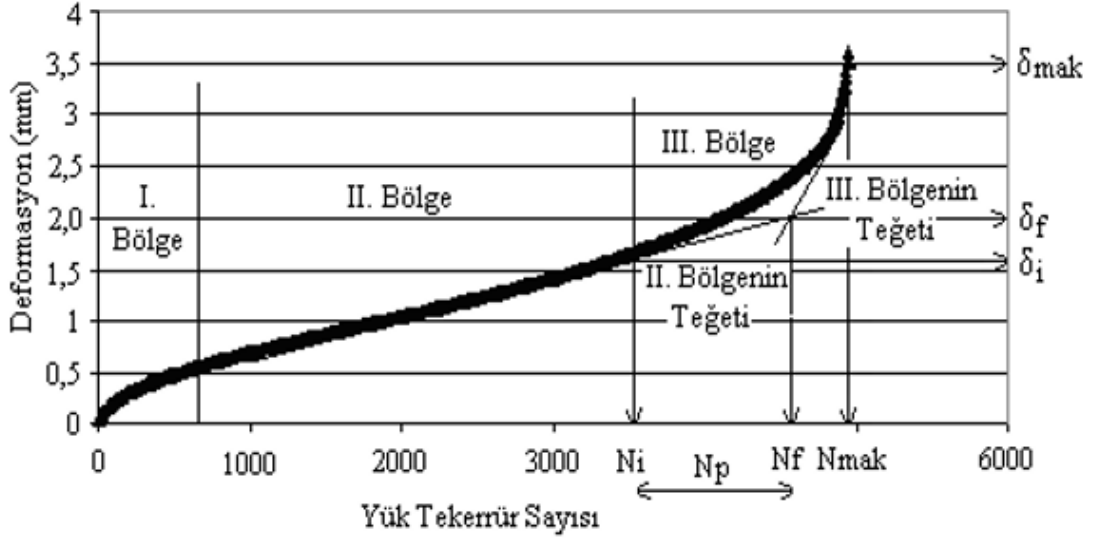
Şekil 2.55 : Akma sayısının bulunması.

### 2.6.7 Dolaylı çekme yorulma testi

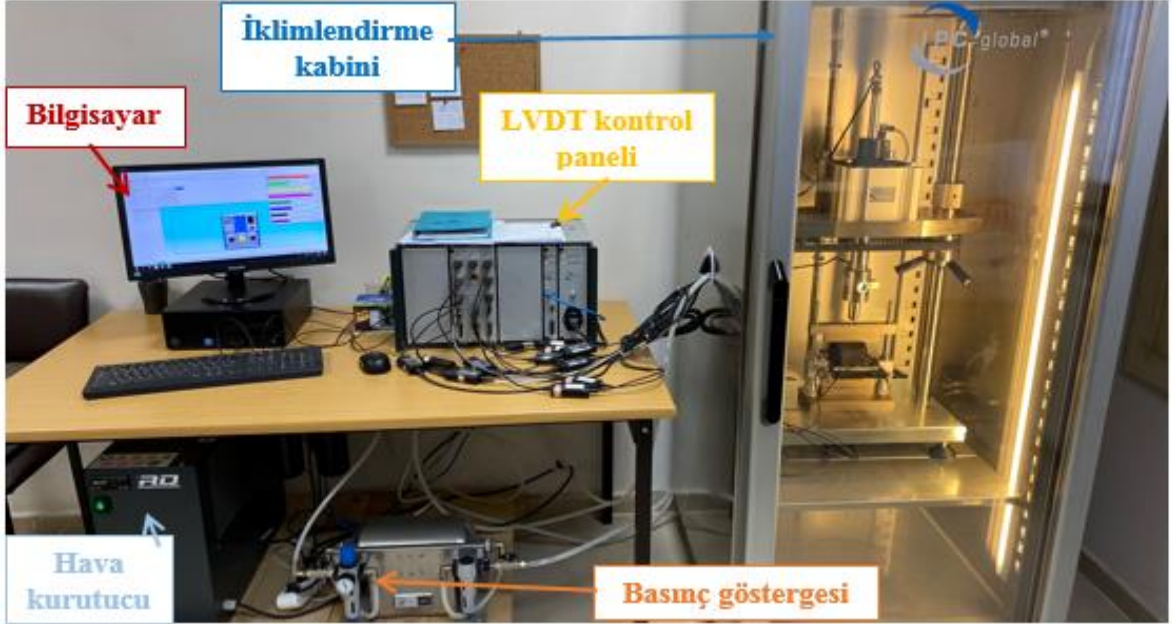
HMA kaplamalarda tekrarlı trafik yükleri sebebiyle çatlaklar oluşur ve bu çatlaklar zamanla artmaya başlar. Bu sebeple de kaplamanın rijitliği azalır ve kaplama yüzeyinde yorulma çatlakları meydana gelir.

Yorulma testi EN 12697-24E standardına göre genellikle 25°C sıcaklıkta gerçekleştirilmektedir. Teste başlamadan önce, karışım numuneleri iklimlendirme kabini içinde en az 2 saat şartlandırılır. Süre bitiminde numunenin yüksekliği, uygulanacak gerilme, yük sayısı ve periyodu programa girildikten sonra numune yerleştirilir ve LVDT'ler ayarlanarak teste tabi tutulur. Numune tam kırılıncaya kadar test devam eder ve kırılma gerçekleştiğinde bilgisayarda otomatik olarak yük tekrarı sayısı – deformasyon grafiği elde edilir (Şekil 2.55). Yorulma testi, basit ve zahmetsiz bir test olması sebebiyle HMA numuneler üzerinden en çok uygulanan testlerden biridir. Test bitiminde,  $N_f$  yorulma ömrü ve  $\sigma$  gerilme arasındaki ilişki Denklem (2.31) ile belirlenmektedir [71]. Burada,  $k_1$  ve  $k_2$  malzeme karakteristiğini ifade etmektedir. Yorulma test düzeneği Şekil 2.56'da, teste tabi tutulan numune, test sonrası kırılan numune ve elde edilen deformasyon- yük tekrar sayısı grafiği Şekil 2.57'de verilmiştir [79,80].

$$N_f = k_1 \times \left(\frac{1}{\sigma}\right)^{k_2} \quad (2.31)$$



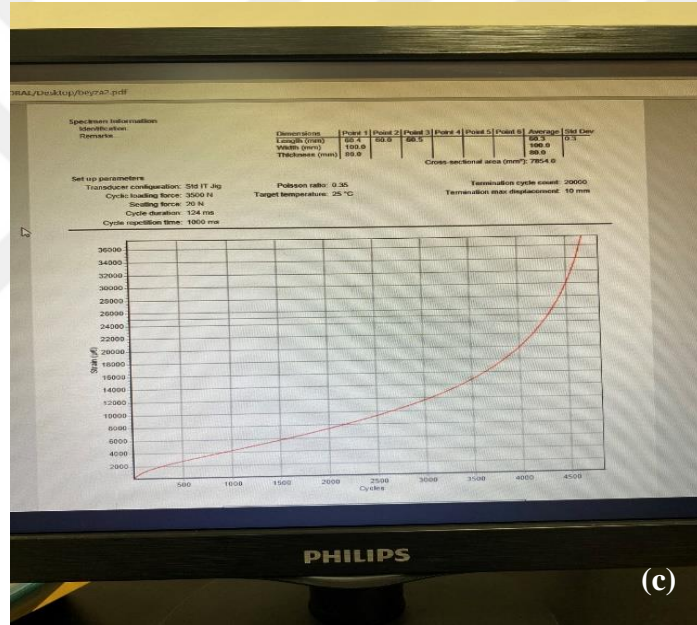
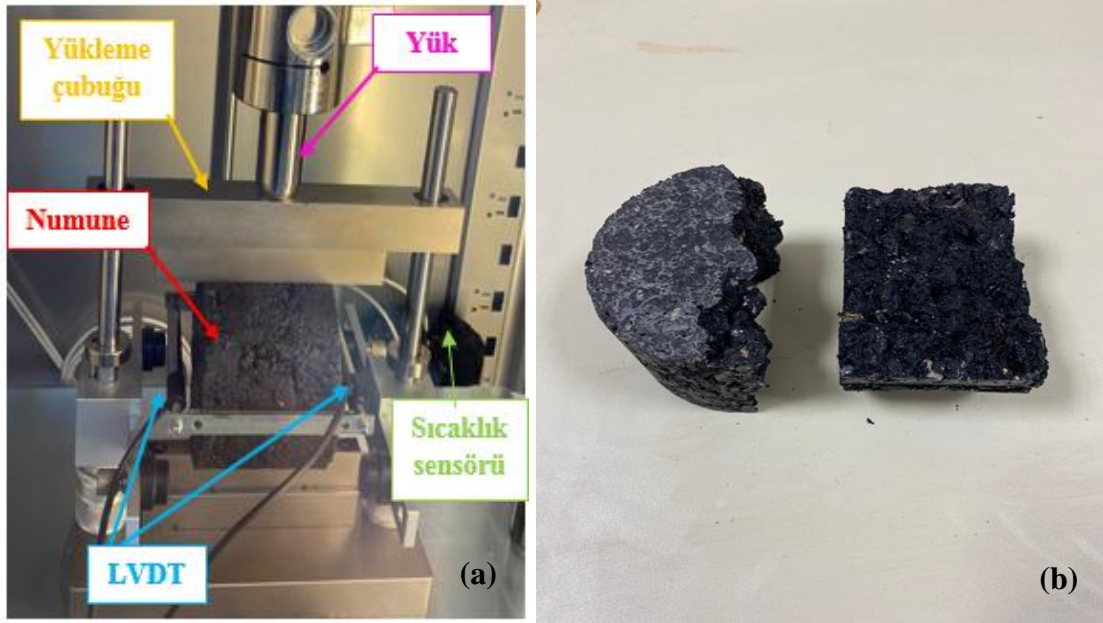
Şekil 2.55 : Temsili deformasyon – yük tekerrür sayısı grafiği.



Şekil 2.56 : Yorulma test düzeneği.

Yorulma testi sonunda, numunede yorulma ömrünün tamamlanmasına kadar her 1 mm'lik deformasyonun meydana gelebilmesi için gereken yük tekrar sayısının oluşan deformasyon miktarına oranı “çatlak ilerleme oranı ( $r_p$ )” olarak ifade edilmektedir. Denklem (2.32) yardımı ile  $r_p$  hesaplanmaktadır. Burada  $N_p$ , çatlakın devam edebilmesinde gereken yük tekrar sayısı,  $\delta_i$  Çatlakın oluştuğu esnadaki toplam deformasyon (mm),  $\delta_f$  yorulma ömründeki toplam deformasyonu (mm) ifade etmektedir [80].

$$r_p = \frac{N_p}{\delta_f - \delta_i} \quad (2.32)$$



**Şekil 2.57 :** (a) Teste tabi tutulan numune (b) kırılmış numune (c) deformasyon-yük tekrar grafiği.

## 2.7 Malzemelerin Karakterizasyonu

Bu çalışmada kullanılan malzemeler (saf asfalt ve ÇAK) ile hazırlanan modifiye bağlayıcıların (kül ve geopolimerli) kimyasal özellikleri, çeşitli karakterizasyon testleri ile belirlenmiştir.

### **2.7.1 SEM analizi**

SEM, çok yüksek büyütme gücüne sahip ve yüksek enerjiye sahip elektronlar ile malzemenin yüzeyinin taranması sonucunda malzeme yüzeyinin yüksek çözünürlüklerle fotoğrafının çekilmesi işlemidir. Bu işlem sonucunda iyi kalitede sayılabilecek mikro fotoğraflar elde edilmekte ve bu fotoğraflardan malzemenin morfolojik yapısı, faz dağılımı ve kristal yapısı hakkında bilgi sahibi olunabilmektedir. Sıvı olmayan her türlü metal, plastik, tekstil, polimer, çeşitli parçacıklar (kum, çakıl vb.) gibi birçok malzemenin SEM görüntüsü elde edilebilmektedir [81,82].

### **2.7.2 XRD analizi**

Bir malzemenin atomik düzeni, kristal, amorf ve yarı kristalin yapısı, kafes parametreleri ve tane büyüklüğü gibi özellikleri XRD analizi ile belirlenebilmektedir. Çeşitli minerallerin ve kayaçların tanımlanmasında, çimento sanayisinde, polimerlerin analiz edilmesinde, çeşitli tarihi yapılardaki malzemelerin tayininde ve asfalt/bitüm gibi petrol ve türevi malzemelerin yapısal analizinde XRD analizi çoğunlukla kullanılmaktadır [82].

### **2.7.3 FT-IR spektroskopisi**

IR spektroskopisi, kalitatif ve yapı analizinde, hidrojen bağının bulunmasında, atomlar arası bağ yapısı, açı ve uzunlukların tayin edilmesinde kullanılmaktadır. Özellikle son yıllarda karayolu mühendisliğinde modifikasyon işlemi ile birlikte asfaltın bağ yapısında meydana gelen değişimleri belirleyebilmek amacıyla çoğunlukla kullanılmaktadır. Bununla birlikte, çeşitli malzemelerin saflık tayininde de IR spektroskopisi kullanılmaktadır. IR absorpsiyonu veya emisyon spektrumu, dalga boyu ( $\mu\text{m}$ ) veya dalga sayısı ( $\text{cm}^{-1}$ ) ile elde edilir ve ortaya çıkan dalga boyu ( $\mu\text{m}$ ) veya dalga sayısı ( $\text{cm}^{-1}$ ) ile farklı işlevselliğe sahiptir ve bu, bağlayıcıların “parmak izi” olarak tanımlanmaktadır [81–85].

### **2.7.4 Elementel analiz**

Bir malzemenin yapısındaki temel bileşimleri tayin edebilmek için elementel analiz metodu sıklıkla kullanılmaktadır. Bu yöntemle malzemelerin yapısında yer alan karbon (C), hidrojen (H), azot (N), kükürt (S) oranları tayin edilmektedir. Ayrıca, bu oranlarda arta kalan oranda da oksijen (O) oranı tayin edilmektedir [82].

### 3. MODİFİKASYON VE LİTERATÜR ÇALIŞMALARI

Sıcak karışım asfalt (HMA) kaplamalarda, artan trafik yükleri, sıcaklık ve çevre etkisiyle zaman içerisinde kalıcı deformasyonlar (tekerlek izi), çatlaklar (termal, yorulma) ve ayrışmalar gibi çeşitli bozulmalar meydana gelmektedir [45]. Bu bozulmaları önlemek veya geciktirmek dolayısıyla kaplama performansını ve hizmet ömrünü arttırmak amacıyla asfalt bağlayıcı ya da karışım içerisine çeşitli katkı malzemeleri eklenmektedir. Bağlayıcı ya da karışıma katkı malzemesi eklenmesi işlemine “modifikasyon” denilmektedir. Modifikasyon işlemi iki şekilde gerçekleştirilmektedir. Bunlardan ilki, “yaş proses” olarak adlandırılan, bağlayıcı içerisine katkı malzemesinin eklenmesi, ikincisi ise, “kuru proses” olarak adlandırılan ve katkı malzemesinin doğrudan karışıma ilave edilmesi işlemidir [70].

Asfalt bağlayıcı içerisine katkı malzemesi eklenmesiyle elde edilen “modifiye bağlayıcılar” a ait karakteristik özellikler, bu bağlayıcılar üzerinde uygulanan standart test yöntemleri ile belirlenebilmektedir. Bağlayıcının modifiye edilmesinde kullanılan bu yöntemde çeşitli ek ekipmanlara ihtiyaç duyulmakta ve modifiye bağlayıcının depolanması ve taşınması esnasında da çeşitli problemler ortaya çıkmaktadır [34,86]. Bu sebeple, bağlayıcı modifikasyonunda asfalt ile homojen bir karışım sağlayan ve depolama esnasında bağlayıcıdan ayrışma, çökme vb. sorunların yaşanmaması için asfalt ile kimyasal bir etkileşim sağlayabilecek malzemelerin bağlayıcı modifikasyonunda kullanılması büyük önem taşımaktadır [45].

Karışım içerisine katkı malzemesi eklenmesiyle elde edilen “modifiye karışımlar” için çeşitli özellikler ise performans deneyleri ile belirlenmektedir. Modifiye karışım hazırlanırken katkı malzemesi doğrudan plentte karışıma ilave edildiğinden, ek ekipmanlara ihtiyaç duyulmaz ve modifiye karışımların depolanması ve taşınması esnasında sorunlar meydana gelmez. Bu sebeple, bağlayıcı modifikasyonuna kıyasla çok daha kolay bir metottür. Ancak, karışım modifikasyonun tek dezavantajlı tarafı ise modifikasyon esnasında özelliği ve yapısı değişebilen asfalt bağlayıcının doğrudan elde edilmesi ve değerlendirilebilmesinin kolay olmamasıdır [34,86].

#### 3.1 Modifikasyonun Amaçları

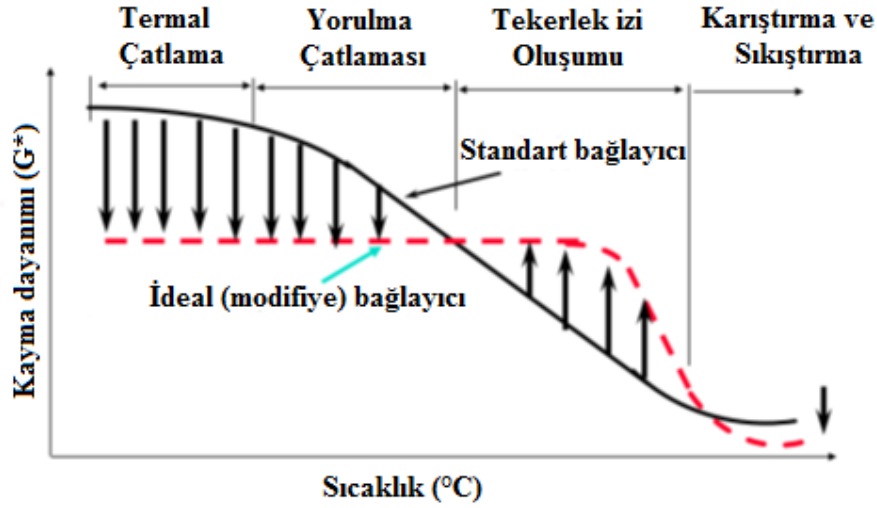
Asfalt bağlayıcılar veya sıcak karışımlar modifiye edilerek, kaplamanın yüksek sıcaklıklarda tekerlek izi deformasyonlarına karşı, düşük sıcaklıklarda termal çatlaklara ve kırılmalara karşı direnci artırılarak performansı geliştirilmeye ve hizmet ömrü arttırılmaya

çalışılmaktadır. Bununla birlikte, kaplamaların sudan kaynaklı ayrışma ve sökülme gibi bozulmalara karşı dirençli olması da beklenmektedir.

Asfalt bağlayıcıların ve karışımların modifiye edilme sebepleri genel olarak şu şekilde ifade edilebilir [87]:

- Yüksek sıcaklığa sahip bölgelerde daha sert bağlayıcılar/karışımlar elde etmek ve böylece kaplamada oluşan tekerlek izi bozulmalarını önlemek,
- Soğuk iklim koşullarına sahip bölgelerde daha yumuşak kıvamlı bağlayıcılar elde ederek kaplamalarda meydana gelen düşük ısı çatlaklarını azaltmak,
- Uygulama sıcaklıklarında (karıştırma ve sıkıştırma) viskoziteyi düşürmek,
- Bağlayıcıların oksidasyon ve yaşlanmaya karşı direncini arttırmak,
- Kaplamaların kaymaya karşı direncini arttırmak ve dirençli kaplama yüzeyleri elde etmek,
- Kaplamaların dayanımını ve stabilitesini arttırmak,
- Kaplamaların yorulma ömrünü uzatmak,
- HMA'ların adezyon ve kohezyon özelliklerini arttırarak sökülme ve kopma gibi bozulmaları engellemek,
- Sıcak karışımlar hazırlanırken agregayı çevreleyen bağlayıcının daha kalın tabakaya sahip olması, böylece asfalt ve agregaların birbirine yapışma yeteneğinin geliştirilerek soyulmasını önlemek,
- Sıcak karışımların akma dayanımlarını geliştirmek,
- HMA kaplamaların yaşlanmaya karşı direncini arttırmak,
- HMA kaplamaların her yönden performansını geliştirmek,
- Kaplamanın maliyet olarak daha uygun olmasını sağlamak,
- Sıcak karışımların yapım mevsimini uzatmak.

Bağlayıcı/karışım modifikasyonu yapılmasındaki amaçlar dikkate alındığında, ideal modifiyeli bağlayıcıdan beklenen davranışın sıcaklık koşullarına göre değişimi Şekil 3.1'de verilmiştir [88].



Şekil 3.1 : İdeal bağlayıcı modifikasyonu.

Burada, düşük sıcaklıklarda termal çatlaklara karşı oluşumun engellenmesi için ideal bağlayıcının normal bağlayıcıya göre daha yumuşak kıvamda olması istenmektedir. Orta ve yüksek sıcaklıklarda ideal bağlayıcının sertlik değeri sıcaklık artışı ile azalmamalı, böylece yorulma çatlakları ve tekerlek izi oluşumuna karşı direnç sağlanmalıdır. Ayrıca, karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları incelendiğinde, yüksek sıcaklık mertebelerinde ideal bağlayıcının sertliğinin normal bağlayıcıya göre daha düşük olması, böylece akıcılığını kaybetmemesi istenmektedir [88].

İdeal modifiye bağlayıcılara ait özellikler dikkate alındığında, bağlayıcıya eklenen katkı malzemelerinin de önemi ortaya çıkmaktadır. Bağlayıcılara eklenen katkı malzemelerinden beklenen özellikler şu şekildedir [23]:

- Kolay olarak elde edilebilmeli,
- Ekonomik olmalı,
- Asfalt içerisinde homojen olarak karışabilmeli,
- Plentte karışım esnasında özelliğini kaybetmemeli,
- Düşük sıcaklıklarda bağlayıcının çok sert veya kırılğan olmaması,
- Uygulama sıcaklıklarında (karıştırma ve sıkıştırma), bağlayıcı aşırı viskoz hale gelmemeli.

Katkı malzemelerinin bağlayıcı ile karıştırılmasıyla elde edilen modifiye bağlayıcıların şu özelliklere sahip olması beklenmektedir:

- Uygun işlenebilirliğe sahip olması,
- Normal üretim sıcaklığında rahatlıkla püskürtülerek agregayı çevreleyebilmeli,
- Plentte depolama, yolda serme ve sıkıştırma, ayrıca hizmet esnasında özelliklerini kaybetmeden koruyabilmelidir.

### **3.2 Modifikasyonda Kullanılan Katkı Malzemeleri**

Bağlayıcı içerisine ilave edilen katkı malzemeleri, farklı şekillerde sınıflandırılabilir. Katkı malzemesinin türü, bu malzemeye ait örneklemeler ve bu malzemelerin etkileri Çizelge 3.1’de verilmiştir. Bununla birlikte, modifiye bağlayıcıların hazırlanmasında modifikasyon şekline göre kullanılan katkıları Çizelge 3.2’de verilmiştir [34].

Çizelge 3.1’de görüldüğü gibi, filler malzemeler, kauçuk ve plastikler başta olmak üzere, çok çeşitli malzemeler bağlayıcı modifikasyonunda katkı malzemesi olarak kullanılmaktadır. Özellikle son yıllarda polimer malzemelerin modifikasyonda geniş bir yer tuttuğu görülmektedir.

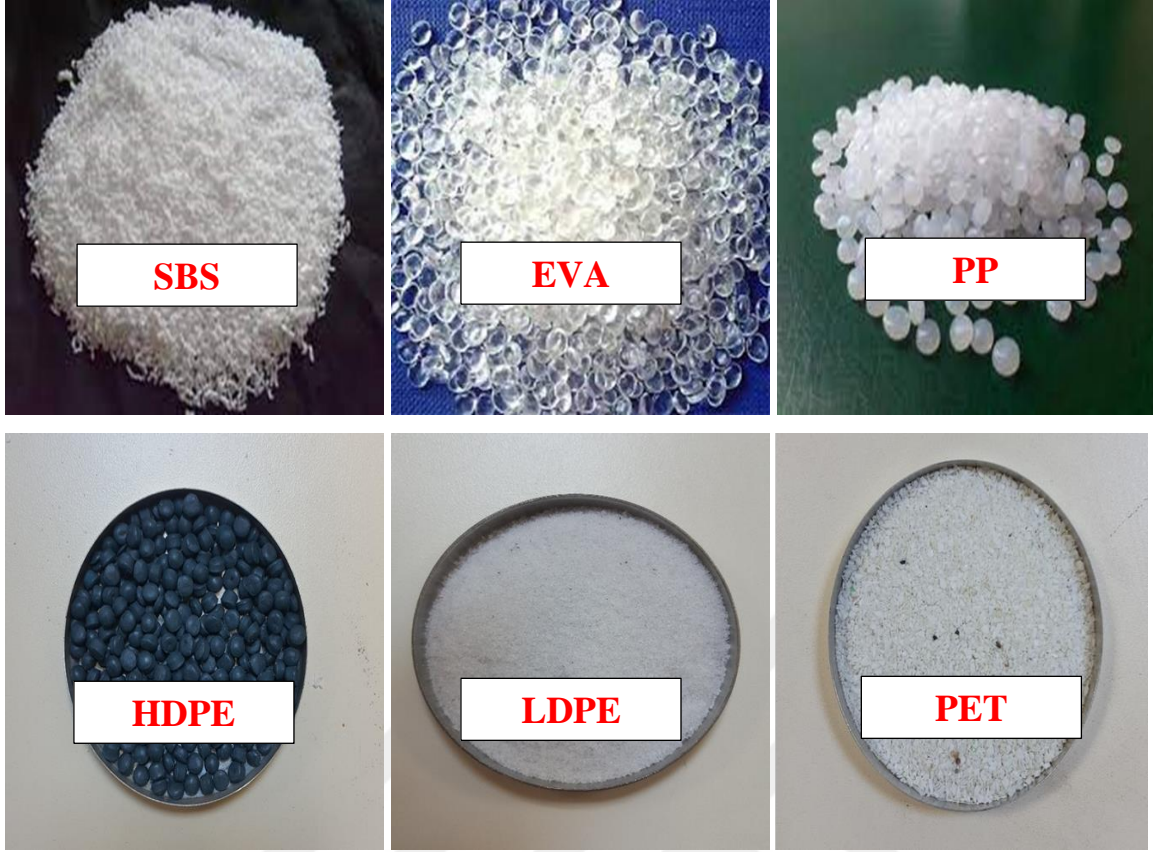
Yapılan çalışmalarda, SBS [89–92], EVA [93–96], düşük yoğunluklu polietilen (LDPE) [10,97–99], yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) [100–103], PP [97,104–106], polietilen tereftalat (PET) [9,70,107,108] gibi malzemelerin (Şekil 3.2) modifikasyonda sıklıkla kullanıldığı görülmektedir. Bu katkılardan SBS’nin, asfaltın sertliğini arttırdığı, yüksek sıcaklıklardaki kalıcı deformasyona karşı direnci üzerinde olumlu etkisi olduğu belirtilmiştir [109–111]. Ayrıca LDPE, HDPE, PET ve PP gibi plastiklerin ise asfaltın kıvamı üzerinde etkili olduğu ve reolojik özelliklerinde iyileşmeler meydana getirdiği görülmüştür [9,10,15,112]. Polimerlerin yanı sıra fiber malzemeler [113–116], karbon siyahı [117–120] ve mermer tozu [121–124] gibi filler malzemeler de birçok çalışmaya konu olmuştur. Fiber malzemelerin, asfaltın dayanıklılığı üzerinde [113,125,126], karbon siyahının ise asfaltın reolojik ve mekanik özellikleri üzerinde olumlu etkileri olduğu çalışmalarda belirtilmiştir [127–129].

**Çizelge 3.1 : Bağlayıcı katkı malzemelerinin genel sınıflandırması.**

Katkı malzemesi	Örnekler	Etkileri	
1. Filler türü	<ul style="list-style-type: none"><li>❖ Mineral filler</li><li>❖ Kireç</li><li>❖ Portland çimentosu</li><li>❖ Uçucu kül</li><li>❖ Karbon siyahı</li><li>❖ Sülfür</li></ul>	Sertleştirme	
2. Genleştirici (Ekstender)	<ul style="list-style-type: none"><li>❖ Sülfür</li><li>❖ Lignin</li></ul>	Sertleştirme	
3. Kauçuk a. Doğal lateks b. Yapay lateks c. Blok kopolimer d. İşlenmiş kauçuk	Polimerler	<ul style="list-style-type: none"><li>❖ Stiren bütadien stiren (SBS)</li><li>❖ Etilen vinil asetat (EVA)</li><li>❖ Stiren bütadien kauçuk (SBR)</li><li>❖ Doğal kauçuk</li><li>❖ Stiren isopren stiren (SIS)</li><li>❖ Dönüştürülmüş kauçuk</li><li>❖ Atık tekerlek lastikleri</li></ul>	-
4. Plastik		<ul style="list-style-type: none"><li>❖ Polietilen (PE)</li><li>❖ Polipropilen (PP)</li><li>❖ EVA</li><li>❖ Polivinil klorür (PVC)</li></ul>	Sertleştirme
5. Bileşim		3 ve 4. Maddedeki polimerlerin karışımı	-
6. Fiber	<ul style="list-style-type: none"><li>❖ Doğal: (asbest)</li><li>❖ Taş yünü</li><li>❖ Cam fiber</li><li>❖ Yapay: PP</li></ul>	Sertleştirme	
7. Oksidan	Manganez tuzu	Sertleştirme	
8. Antioksidan	<ul style="list-style-type: none"><li>❖ Kurşun karışımları</li><li>❖ Karbon</li><li>❖ Kalsiyum tuzu</li></ul>	Yumuşatma	
9. Hidrokarbon	<ul style="list-style-type: none"><li>❖ Yeniden kullanma ve gençleştirme yağları</li><li>❖ Doğal asfaltlar</li></ul>	Yumuşatma ve sertleştirme	
10. Soyulma önleyici	<ul style="list-style-type: none"><li>❖ Aminler</li><li>❖ Kireç</li></ul>	Yumuşatma	

**Çizelge 3.2 : Bağlayıcı modifikasyon tipleri.**

Modifikasyon tipleri	Örnekler
1. Polimer olmayan katkıyla modifikasyon	❖ Kil, Karbon siyahı, Uçucu kül
a. Filler malzemeler	❖ Organik aminler ve amidler
b. Soyulma önleyici katkılar	❖ Lignin ve sülfür
c. Genleştiriciler	❖ Çinko ve kurşun Antioksidanları,
d. Antioksidanlar	❖ Fenolikler, Aminler
e. Organo-metal bileşimleri	❖ Organo manganerz bileşimleri
f. Diğerleri	❖ Organo karbon bileşimleri
2. Polimer katkıyla modifikasyon	❖ Polietilen (PE), Polipropilen (PP)
a. Plastikler	❖ Polivinil klorid (PVC), Polistiren (PS)
1. Termoplastikler	❖ Etilen vinil asetat (EVA)
2. Termosetler	❖ Epoksi reçineler
b. Elastomerler	❖ Sentetik butadien kopolimer (SBR)
1. Doğal kauçuklar	❖ Stiren butadien stiren kopolimer (SBS)
2. Yapay elastomerler	❖ Etilen prokplendien harmoliper (EPDM)
3. İşlenmiş kauçuklar	❖ İsobüten isopren kopolimer (IIR)
4. Fiberler	❖ Polyester, Fiberler, Polipropan fiberler
3. Kimyasal reaksiyon modifikasyonu	❖ Katkı reaksiyonu (bağlayıcı + monomer)
	❖ Volkanizasyon (bağlayıcı + sülfür)
	❖ Nitrosyon reaksiyonu (bağlayıcı + nitrik asit)



**Şekil 3.2** : Bağlayıcı modifikasyonunda kullanılan polimerler.

Ancak bu katkılardan, SBS'nin ticari bir polimer olması ve işlenebilirlik sıcaklığının yüksek olması (yaklaşık 180 °C sıcaklık) [130], plastik katkıların ise erime sıcaklıklarının yüksek olması sebebiyle modifikasyonda kullanılırken enerji sarfiyatının fazla olması, ayrıca bu katkıların özgül ağırlıklarının asfaltın özgül ağırlığından ya daha yüksek olup karışım esnasında dibe çöktüğü ya da daha düşük olup yüzeyde kalarak bağlayıcı ile homojen olarak karışmadığı ve faz ayrışması sorunu oluşturduğu bilinmektedir [112,131,132]. Bununla birlikte fiber malzemeler de, dayanımlarının yüksek ve hafif olmaları sebebiyle çeşitli çalışmalarda kullanılsa da maliyetlerinin yüksek olması araştırmacılar tarafından büyük bir dezavantaj oluşturmaktadır [125,133–135]. Ayrıca, karbon siyahının da modifikasyonda kullanımında asfalt ile homojen bir dağılım göstermediği belirtilmektedir [136,137]. Bu sebeple, asfalt ile homojen olarak karışabilen ve faz ayrışması sorununu tamamen ortadan kaldıran, erime sıcaklığı ve maliyeti yüksek olmayan katkıların (atık gibi) modifikasyonda kullanımının araştırılması son yıllarda yapılan çalışmalara konu olmaktadır [9,10,15].

Bu tez çalışmasında ise, bir atık malzeme olan çöp atıklarının yakılması sonucu elde edilen çöp küllerinin bir katkı malzemesi olarak asfalt modifikasyonunda kullanılabilirliği araştırılmıştır.

### 3.2.1 Atık malzemeler

Ömrünü tamamlamış ve atıl durumda bulunan her türlü malzeme “atık” olarak adlandırılmaktadır [138]. Atıklar, plastik atıklar (poşetler, saklama kapları vb.), endüstriyel atıklar (çeşitli yağlar, cüruflar vb.), evsel atıklar (kanalizasyon, çöp atıkları vb.), tarım atıkları (bağ ve bahçelerde oluşan atıklar, budama kalıntıları vb.) ve orman atıkları (odun, talaş vb.) olmak üzere günümüzde hemen her alanda meydana gelmektedir (Şekil 3.3) [139–143].



Şekil 3.3 : Çeşitli atık malzemeler.

Atık malzemelerin doğada birikmesiyle, hava kirliliği (kurşun, kadmiyum vb.), küresel ısınma, yeraltı suyu kirliliği, bitki örtüsünün bozulması ve canlı yaşamının tehlikeye girmesi gibi birçok zararlı etkiler oluşmaktadır. Bununla birlikte, bu atıkların doğada beklemesiyle çeşitli parazit, sivrisinek ve haşere gibi canlıların üreyip çoğalmasına ve dolayısıyla birçok bulaşıcı hastalıkların oluşmasına neden olmaktadır. Bu sebeple, atıkların

bu zararlı etkilerinin ortadan kaldırılması ve bu malzemelerin tekrar kullanılabilmesi amacıyla “geri dönüşüm” konusu oldukça önemli bir hale gelmiştir [144].

Geri dönüşüm, atık malzemelerin yeni malzemelerin üretiminde kullanacak şekilde değerlendirilmesi işlemidir [145]. Geri dönüşüm ya da diğer bir deyişle geri kazanım, dünya üzerinde çevre kirliliğine sebep olan neredeyse tüm atık malzemelerin yeniden değerlendirilmesinde oldukça önemli bir işlemdir. Geri dönüşüm işlemi fiziksel ve kimyasal olmak üzere iki şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Fiziksel süreçte atık malzemeler ezilerek, parçalanarak veya öğütülerek geri dönüşüme tabi tutulmaktadır. Kimyasal süreçte ise atıklar çeşitli kimyasal prosedürlerden (piroliz, gazlaştırma vb.) geçirilerek geri kazanılmaya çalışılmaktadır [144,146,147].

Atıkların değerlendirilmesi konusunda günümüzde en çok kimyasal süreçler kullanılmaktadır. Çünkü kimyasal süreçlerde atıklar doğrudan yanma işlemine tabi tutulur ve böylece fazladan iş gücüne ihtiyaç duyulmamaktadır. Atık malzemelerin yakılarak değerlendirilmesiyle, hem büyük oranda ısı ve elektrik enerjisi elde edilmekte hem de atıkların çevreye ve canlılara vermiş olduğu zararlar büyük oranda azaltılmaya çalışılmaktadır. Yanma işleminde, kısmi enerji sarfiyatı meydana gelse de yanma sonucunda elde edilen enerji göz önüne alındığında bu durum göz ardı edilebilmektedir [138].

Atıkların yakılması sonucu enerji elde edilmesi, aslında çoğu atık malzemenin “biyokütle” kaynağı olduğunu göstermektedir. Biyokütle, kendini devamlı yenileyen bir enerji çeşididir. Atık malzemelerin büyük çoğunluğu biyokütle esaslı malzemeler olarak kabul edilmektedir [11,148].

### **3.2.2 Biyokütle**

Dünya üzerinde kendini devamlı yenileyebilecek tek enerji kaynağı biyokütledir. Genellikle bitki, hayvan ve insanlardan elde edilen yenilenebilir ve fosilleşmemiş organik maddeler biyokütle olarak tanımlanmaktadır. Petrol kökenli ürünlerin içeriğindeki sabit karbon, kükürt, kül ve nitrojeni bünyesinde içeren biyokütle, çeşitli kimyasal işlemler sonrasında geleneksel petrol ürünleri yerine kullanılabilir. [138].

Dünya üzerindeki biyokütle kaynağının, yıllık yaklaşık 220 milyar ton kadar olduğu bilinmektedir. Gelişmiş ülkeler, bünyelerindeki biyokütle kaynaklarının %10'unu kullanarak ısı ve elektrik enerjisi üretmektedir. Bu sebeple, gelişmekte olan ülkelerin, yerli biyokütle kaynaklarını en üst seviyede değerlendirerek ülke ekonomisinin büyümesine katkı sağlayabileceği düşünülmektedir.

Biyokütle enerjisinin karşılanmasında 3 ana temel kaynağın olduğu bilinmektedir. Bunlar; tarımsal, hayvansal ve kentsel-endüstriyel kökenli atıklardır. Genel olarak biyokütle enerjisini oluşturan kaynaklar Şekil 3.4’de verilmiştir.



Şekil 3.4 : Biyokütle kaynakları.

Şekil 3.4’de görüldüğü gibi, biyokütle kaynakları çok çeşitlidir. Bu kaynaklar, çeşitli özelliklerine göre aşağıdaki şekilde detaylandırılabilir.

1. Orman atıkları
  - ❖ Odun ve ağaç atıkları (odun, talaş, kozalak gibi)
2. Tarım atıkları
  - ❖ Yağlı tohuma sahip bitkiler (kolza, ayçiçek, soya, pamuk gibi)
  - ❖ Karbonhidrat bitkiler (patates, mısır, buğday, şeker pancarı gibi)
  - ❖ Elyaf bitkileri (keten, kenevir, kenaf gibi)
  - ❖ Protein bitkileri (fasulye, bezelye gibi)
  - ❖ Bitkisel atıklar (sap, dal, saman gibi)
3. Hayvansal atıklar (gübre, kıl gibi)
  - ❖ Hayvan dışkıları (at, koyun, sığır gibi)
  - ❖ Mezbahane atıkları
4. Evsel atıklar (çöp, kanalizasyon gibi)
  - ❖ Çöp atıkları (meyve-sebze kabukları, yemek kalıntıları, plastikler, camlar gibi)
  - ❖ Kanalizasyon atıkları

5. Endüstriyel ve sanayi atıkları (madeni yağlar, cüruflar, metal kalıntıları gibi)'dir.

- ❖ Kağıt sanayi atıkları
- ❖ Mobilya sanayi atıkları
- ❖ Gıda işleme sanayi atıkları
- ❖ Endüstriyel atıklar (madeni yağ kalıntıları, cüruflar, metal kalıntıları gibi)

Yapılan araştırmalara göre Türkiye'nin biyokütle kaynak potansiyeli, 8.6 milyon ton petrole eşdeğerdir ve ayrıca bu kaynaktan elde edilebilecek gaz miktarının ise yaklaşık 2 milyon ton petrole eşdeğer olduğu belirtilmektedir [14]. Bununla birlikte, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığının yaptığı bir çalışmada, ülkemizdeki potansiyel biyokütle enerji miktarı Çizelge 3.3'de verilmiştir.

Biyokütle kaynaklarından enerji elde etmek amacıyla, çeşitli dönüşüm yöntemleri kullanılarak sonuç üründe katı, sıvı ve gaz ürünleri ile birlikte çeşitli yakıtlar da elde edilmektedir. Dönüşüm sonrasındaki atık ürünlerden gübre, hidrojen gibi yan ürünlerle birlikte biyodizel, biyoetanol, biyogaz ve pirolitik gaz gibi ürünler elde edilmektedir.

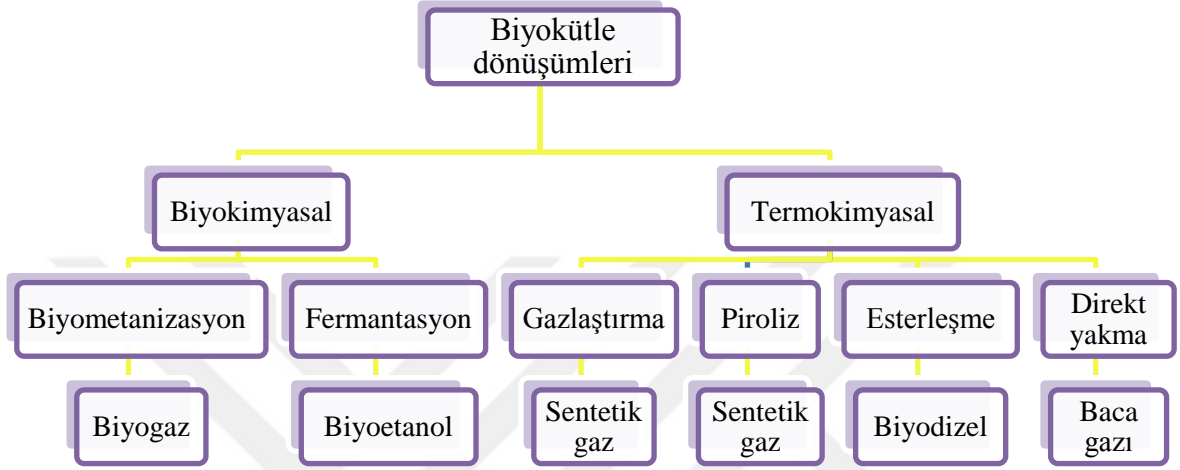
**Çizelge 3.3 : Ülkemizdeki potansiyel biyokütle enerji miktarı.**

Nüfus	79.814.871
Toplam hayvan sayısı (adet)	389.405.328
Hayvansal atık miktarı (ton/yıl)	163.297.308
Hayvansal atıkların enerji değeri (TEP/yıl)	1.176.198
Bitkisel üretim miktarı (ton/yıl)	176.313.301
Bitkisel atık miktarı (ton/yıl)	96.451.594
Bitkisel atıkların enerji değeri (TEP/yıl)	39.877.285
Kentsel katı atık miktarı (ton/yıl)	31.331.836
Kentsel organik atıkların enerji değerleri (TEP/yıl)	2.315.414
Atıkların toplam enerji değeri (TEP/yıl)	44.228.795
Biyodizel işletme lisansı sahibi firmalar	11
Biyoetanol işletme lisansı sahibi firmalar	3
Biyokütle kaynaklı elektrik üretim santral sayısı	128
Orman atıklarının enerji değeri (TEP/yıl)	859.899

### 3.2.3 Biyokütle dönüşüm yöntemleri

Biyokütle kaynakları, fiziksel süreç ve dönüşüm süreçleri (termokimyasal ve biyokimyasal) olmak üzere iki farklı prosese tabi tutulmaktadır. Fiziksel süreçte atık

malzemeler kırma, küçültme, kurutma, filtrasyon ve ekstraksiyon gibi işlemlere tabi tutulmaktadır. Dönüşüm sürecinde atıklar termokimyasal ya da biyokimyasal işlemlere tabi tutulmaktadır. Termokimyasal işlemlerde, malzemeler yanma, gazlaştırma (Fischer-Tropsch sentezi) ve piroliz gibi işlemlere maruz bırakılmaktadır. Biyokimyasal süreçte ise, fermantasyon, sindirim ve kompostlama gibi işlemlere tabi tutulmaktadır [11]. Biyokütle kaynaklarına uygulanan dönüşüm yöntemleri Şekil 3.5’de verilmiştir.



Şekil 3.5 : Biyokütle dönüşüm yöntemleri.

Biyokütle kaynakları üzerinde uygulanan dönüşümler, elde edilen yakıtlar ve yakıtların kullanım alanları Çizelge 3.4’de verilmiştir.

Çizelge 3.4 : Biyokütle kaynakları, dönüşümler, yakıtlar ve kullanım alanları.

Atıklar	Dönüşüm yöntemi	Yakıt	Kullanım alanı
Orman atıkları	Havasız çürütme	Biyogaz	Elektrik üretimi, ısınma
Tarım atıkları	Piroliz	Etanol	Isınma, ulaşım araçları
Enerji bitkileri	Doğrudan yakma	Hidrojen	Isınma
Hayvansal atık	Fermantasyon	Metan	Isınma, ulaşım araçları
Çöp atığı (organik)	Gazlaştırma	Metanol	Uçaklar
Enerji ormanları	Biyofotoliz	Motorin	Ürün kurutma
Bitkisel ve hayvansal yağlar	Esterleşme reaksiyonu	Motorin	Isınma, ulaşım araçları, seracılık

### **3.2.3.1 Doğrudan yakma**

Biyokütle kaynağının direkt olarak yakılması, atıkların değerlendirilmesinde en çok kullanılan eski yöntemlerden biridir. Günümüzde, bu yöntem ile dönüşümler gerçekleştirilse de yeni yanma yöntemleri de geliştirilmektedir. Doğrudan yakma işleminde, atıklar doğrudan yakılarak bünyelerinde yanabilen maddelerin (özellikle tarım atıklarında) sıcaklık ile birlikte oksijenle hızlı bir şekilde kimyasal reaksiyona girmesi sağlanmaktadır. Reaksiyon sonucunda, ısı enerjisi, karbondioksit, su buharı ve çeşitli metal oksitler oluşmaktadır [149].

### **3.2.3.2 Havasız çürütme**

Oksijen olmayan bir ortamda çeşitli mikroorganizmalar tarafından gerçekleştirilen havasız çürütme işlemi bir biyolojik işlemdir. Dönüşüm, oksijen olmayan ortamda bakteri+su+organik madde = gübre+bakteri+metan+karbondioksit+hidrojensülfür şeklinde olmaktadır ve bu süreçte mezofilik ve termofilik bakteriler görev almaktadır. Mezofilik bakteriler yaklaşık 35 °C sıcaklıkta, termofilik bakteriler ise 54 °C sıcaklıkta üretim gerçekleştirmektedir. Mezofilik bakteriler sıcaklık değişiminden termofilik bakteriye kıyasla daha az etkilenmektedir. Ancak termofilik bakteriler bu duruma rağmen daha hızlı metan gazı üretmektedir. Havasız çürütme işleminde bu işlem için üretilmiş olan çeşitli bitkiler, tarım atıkları ve gübre kullanılmaktadır. Bu dönüşüm sonucunda biyokütle kaynağından sıvı ve gaz (özellikle biyogaz) yakıtlar elde edilmektedir.

### **3.2.3.3 Fermantasyon**

Fermantasyon, anaerobik şartlar altında mikroorganizmaların ortamda bulunmasıyla organik bileşiklerin bozunması ve o anda oluşan enzimlerle katalize edilmiş, sonuçta enerjinin açığa çıktığı kimyasal bir süreçtir. Çeşitli biyokütle kaynakları içerisinde selüloz, lignin ve hemiselüloz bulunmaktadır. Selülozun glikoza çevrilmesinde kimyasal işlemler ya da enzimler kullanılmaktadır. Kimyasal işlem ya da enzimler kullanarak selülozun glikoza dönüştürülmesiyle, glikoz fermantasyona tabi tutulur ve sonuçta etanol, butanol ve aseton elde edilmektedir.

### **3.2.3.4 Gazlaştırma**

Gazlaştırma, yapısında karbon içeriği bulunduran biyokütle kaynaklarının, yüksek sıcaklıklarda bozunması ile yanabilir gaz elde edilmesi işlemidir. Bunun sonucunda, karbondioksit, azot ve karbonmonoksit gibi gazlar elde edilmektedir. Gazlaştırma

dönüşümünün çevreye zararlı bir etkisi olmaz, çünkü biyokütle kaynağındaki kükürt miktarı ihmal edilecek seviyededir.

Gazlaştırma işlemi, tarım atıklarına (buğday, pirinç, ayçiçeği gibi) ve kalıntılara (sap, saman gibi), gıda endüstrisi atıklarına (kayısı çekirdeği kabuğu ve ceviz kabuğu gibi) ve orman endüstrisi atıklarına uygulanmaktadır.

### **3.2.3.5 Biyofotoliz**

Tatlı veya tuzlu su içerisindeki bazı mikroorganizma boyutundaki alglerden güneş enerjisi kullanılarak hidrojen ve oksijen üretme işlemi biyofotoliz olarak adlandırılmaktadır. Algler tatlı ya da tuzlu suyu güneş pili gibi kullanarak fotosentetik olarak ayrıştırmaya olanak sağlar. Biyofotoliz işleminin, ileriki süreçte hidrojen yoluyla enerji üretim teknolojisinde oldukça önemli olacağı düşünülmektedir.

### **3.2.3.6 Piroliz**

Biyokütle kaynaklarının yüksek sıcaklıklarda termokimyasal bozulmasına piroliz ya da karbonizasyon denilmektedir. Piroliz ile atık malzemelerin yapısında bozunma sonucunda bağ kırılmaları ve kopmaları meydana gelir. İşlem sonucunda katı, sıvı ve gaz fazında ürünler elde edilmektedir. Piroliz sonucunda katı ürün oluşuyorsa buna “biyoçar”, sıvı ürün oluşuyorsa buna “biyoyağ” denilmektedir. Piroliz işlemi sonucunda, metan ve karbondioksit gibi gazlar açığa çıkmaktadır.

Piroliz, her türlü atık malzeme üzerinde gerçekleştirilebilen bir yöntemdir. İşlem sonucunda elde edilecek ürün ve miktarı, pirolizin gerçekleştirildiği sıcaklığa, piroliz hızına, atığın boyutuna ve atığın cinsine göre değişmektedir. Piroliz işlemiyle üretilen gaz ısıtılarak piroliz işleminde harcanan enerji yerine kullanılabilirdiğinden ve dolayısıyla enerji sarfiyatını azalttığından dolayı en çok tercih edilen dönüşüm yöntemlerinden biridir. Piroliz işleminde eğer katı ürün elde edilmek isteniyorsa atık malzeme yavaş pirolize, sıvı ürün elde edilmek isteniyorsa hızlı piroliz işlemine maruz bırakılmalıdır.

Biyokütle kaynaklarının çeşitli dönüşümler sonucu elde edilen kalıntıları, hemen her sektörde kullanılarak değerlendirilmeye çalışılmaktadır [150–154]. Karayolu mühendisliğinde biyokütle kaynaklarının kullanımına bakıldığında ise, özellikle doğrudan yakma ve piroliz işlemleri sonucunda elde edilen kalıntıların bağlayıcı ya da karışım modifikasyonunda kullanılarak değerlendirilmeye çalışıldığı görülmektedir. Doğrudan yakma ve piroliz sonucu elde edilen kalıntılara ait görseller Şekil 3.6’da verilmiştir.



**Şekil 3.6 :** Biyokütle kalıntılara ait görseller.

Yapılan çalışmalarda genellikle pirinç kabuğu, soya fasulyesi, hurma çekirdeği, kayısı, fındık ve ceviz kabuğu, hindistan cevizi, yulaf kabuğu, mısır, odun ve talaş kırıntılarının kullanıldığı, bu katkıların bağlayıcı modifikasyonunda kullanımı ile asfaltın reolojik özelliklerinde iyileşmeler olduğu, karışım modifikasyonunda kullanılması durumunda ise karışımların mekanik performansının arttığı belirtilmiştir [155,156,165–170,157–164].

Bu tez çalışmasında ise, bir biyokütle kaynağı olan evsel çöp atıklarının, doğrudan yakılması sonucu elde edilen küllerin sıcak karışım asfaltlarda kullanılabilirliği araştırılmıştır.

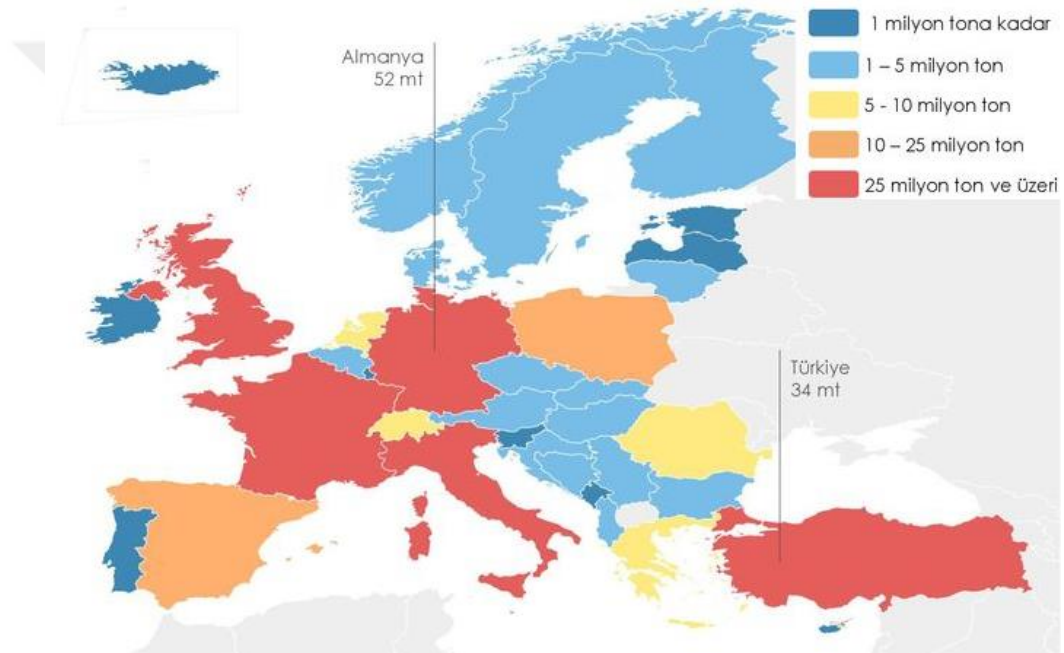
### **3.2.4 Evsel atıklar**

İnsanların, barınma ve sosyal ihtiyaçlarını sürdürdüğü ev ortamında, kullanımının sonlandığı çöp durumundaki tüm atıklara evsel atık denilmektedir [171]. Evsel atıklar içerik olarak, meyve ve sebze kabukları, yiyecek kalıntıları, plastik ve cam şişeler, kağıtlar ve kartonlar, ilaç atıkları, çeşitli su ve yağlardan oluşmaktadır [172,173].

Nüfusun hızla artış göstermesi ve tüketici toplum bilincinin giderek yaygınlaşmasıyla çöp atıklarının da giderek artış gösterdiği görülmektedir. 2016 yılında Dünya Bankasının yayınladığı rapora göre, yer küredeki tüm kentlerin ürettiği katı atık miktarı günde 2 milyar tondur. Bu atıkların, yalnızca %16'sı geri dönüşüme tabi tutulmaktayken %46'sının ise geri dönüştürülemeyecek şekilde çöpe atıldığı ifade edilmektedir. Bununla birlikte bu atıkların kişi başına düşen rakamı ise günlük 0.74

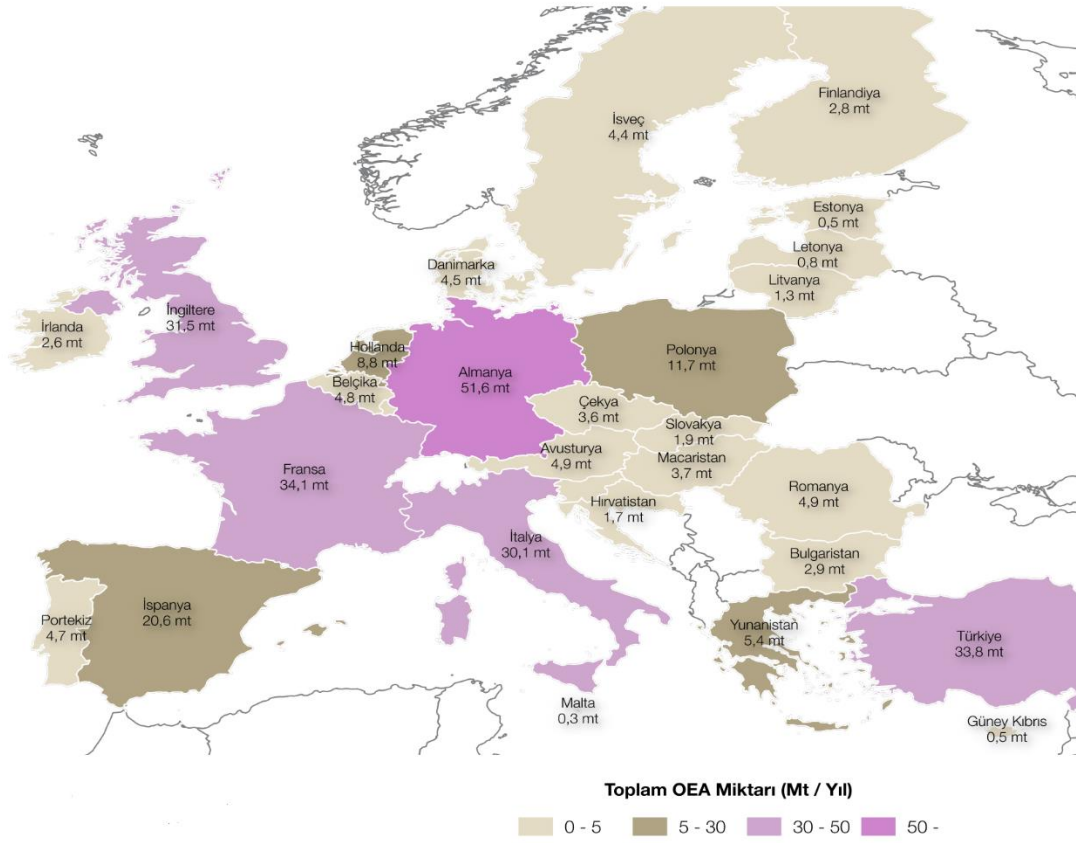
kilogramdır. Rapora göre, yıllık atık üretiminin 2050 yılında 2016 yılındaki rakama göre % 70 artış göstererek 3.40 milyar tona çıkacağı öngörülmektedir [174,175].

Çin ve Hindistan gibi nüfusun fazla olduğu ülkelerdeki toplam nüfus, dünya nüfusunun %36'sını oluşturmaktadır. Bu iki ülkeye ait toplam çöp oranı %27 olarak belirlenmiştir. Amerika Birleşik Devletleri (ABD)'nde bir kişinin yıllık 773 kg kadar çöp ürettiği, bu kişinin Çin'deki kişi başına göre 3 kat, Etiyopya'ya göre ise 7 kat fazla atığa sebep olduğu görülmektedir [176]. Bu rakamlar dikkate alındığında, atıkların ortadan kaldırılmasının önemi gözle görülür bir şekilde ortaya çıkmaktadır [174,175]. Şekil 3.7'de 2016 yılında Avrupa Birliği (AB) ülkelerine ait evsel atık miktarları [177] verilmiştir.



**Şekil 3.7 :** AB ülkelerine ait evsel atık miktarı (2016 yılı).

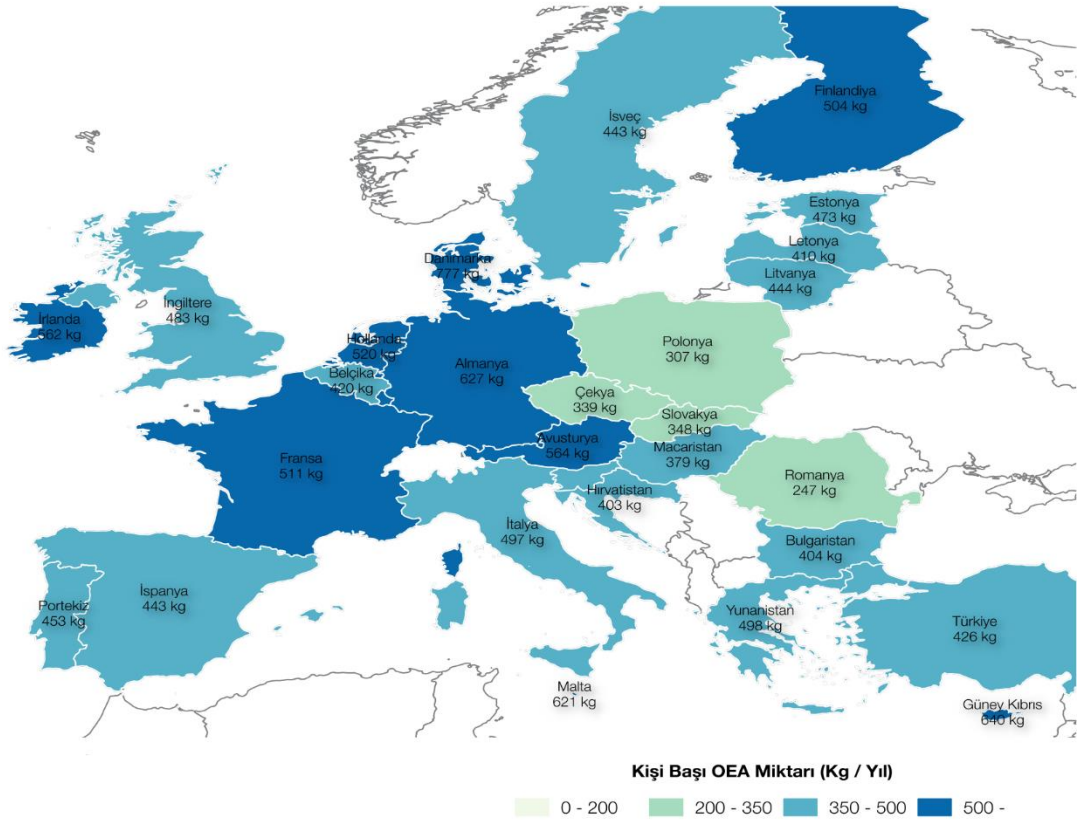
Rapora göre, AB ülkelerinde 2016 yılında oluşan evsel atık miktarı 247 milyon tondur. Bu atıkların %69'u geri dönüştürülürken, %31'i bertaraf edilmiştir. Bu sonuç, geri dönüşümde AB ülkelerinin rol model olarak alınmasında önemli bir rakam olmaktadır. Şekil 3.8'de 2016 yılında toplam oluşan evsel atık (OEA) miktarının yıl bazında kişi başına düşen milyon ton cinsinden miktarı [178] verilmiştir.



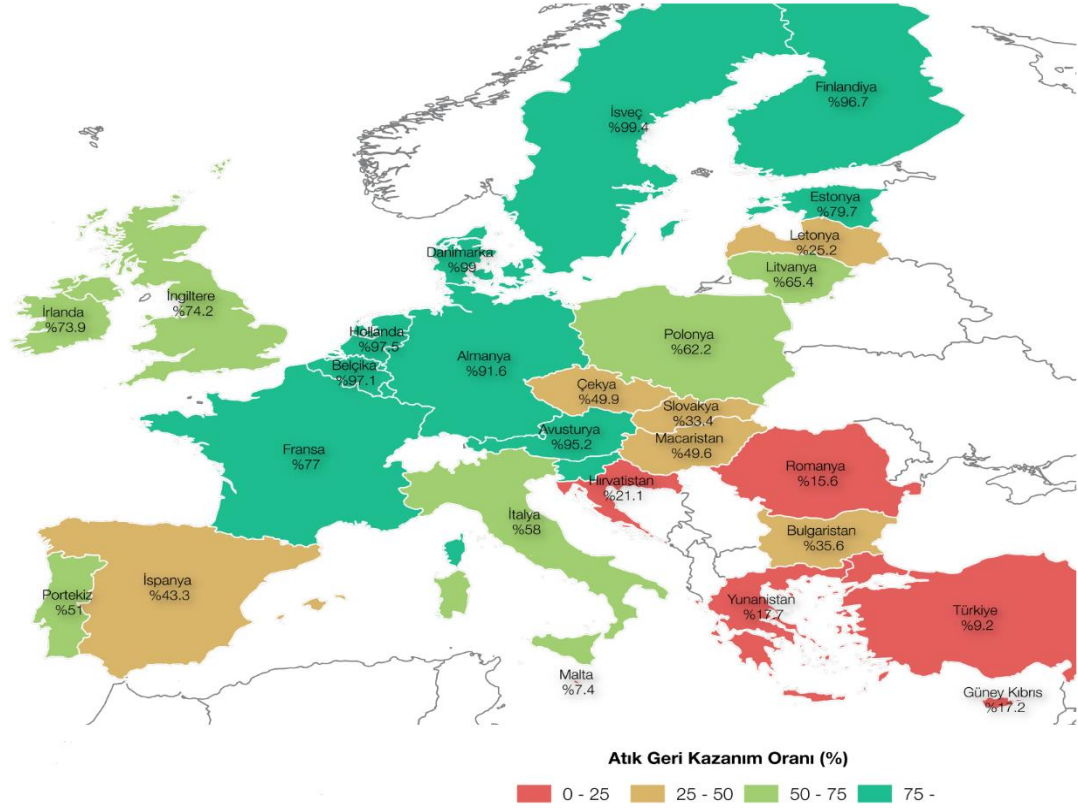
**Şekil 3.8 :** Toplam OEA miktarı (mt/yıl) (2016 yılı).

Eurostat'a göre, aynı yılda günlük en fazla atık oluşan ülke Almanya iken (52 milyon ton), ikinci sırada Fransa (34 milyon ton), üçüncü sırada İngiltere (32 milyon ton) ve dördüncü sırada İtalya (30 milyon ton) yer almaktadır. Ülkemizde ise aynı yıl verilerine göre günlük 33.8 milyon ton evsel atık oluştuğu görülmektedir. 2006-2016 yılları arasında verilere göre Türkiye'de evsel atık miktarı %12 artış göstermiştir [177].

Şekil 3.9'da yine aynı yıla ait toplam (OEA) miktarının yıl bazında kişi başına düşen kg cinsinden miktarı [178] verilmiştir. Şekil 3.9 incelendiğinde, kişi başına düşen OEA miktarında Danimarka'nın 777 kg/yıl ile 1.sırada yer aldığı, Almanya'nın ise 627 kg/yıl ile üst sıralarda yer aldığı görülmektedir. Türkiye ise 426 kg/yıl ile ortalama bir değere sahiptir. Şekil 3.10'da AB ülkeleri ve Türkiye'ye ait geri dönüşüm oranları [178] verilmiştir.

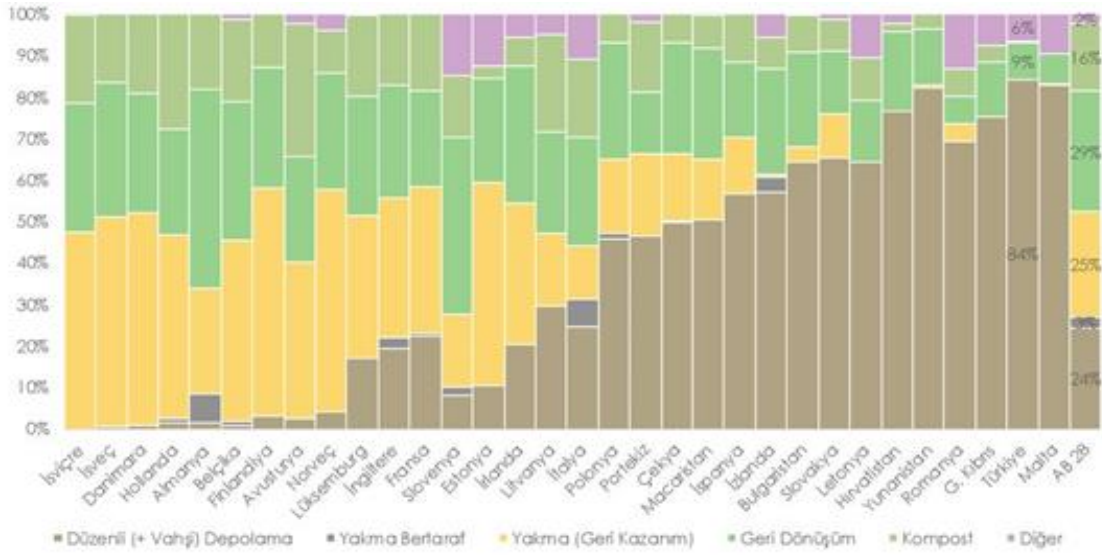


Şekil 3.9 : Toplam OEA miktarı (kg/yıl) (2016 yılı).

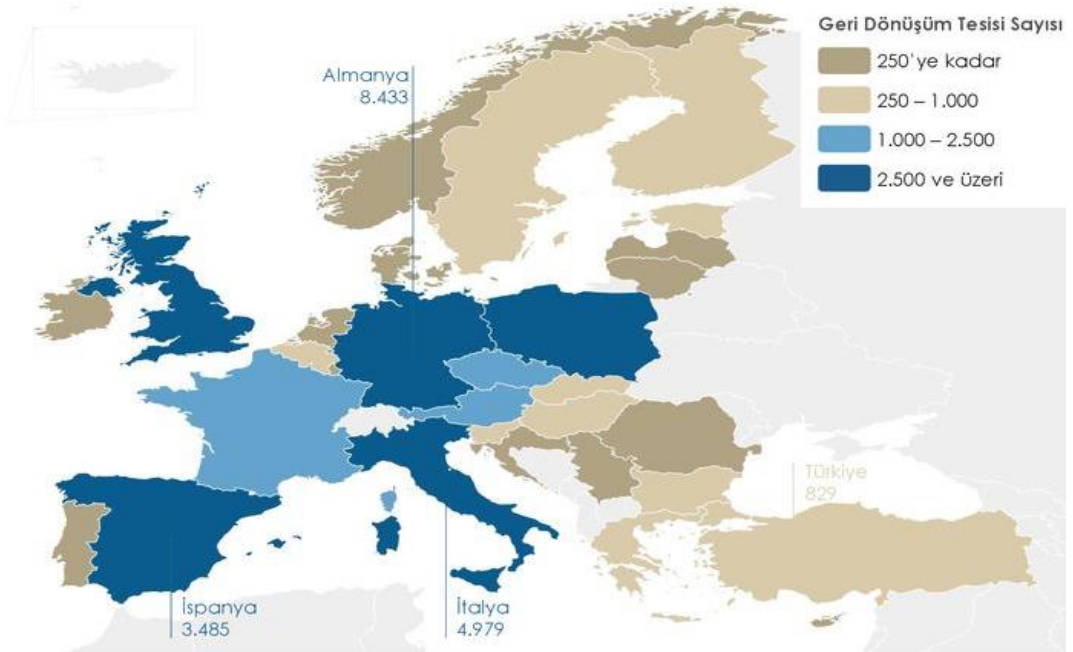


Şekil 3.10 : AB ülkeleri ve Türkiye’de atık geri kazanım oranı.

Atıkların geri dönüşüm oranları incelendiğinde (Şekil 3.10), İsveç'in %99.4 oranı ile 1. Sırada yer aldığı, diğer AB ülkelerinde de geri dönüşüm oranlarının ülkemize kıyasla çok yüksek olduğu görülmektedir. Ülkemizde ise geri dönüşüm oranı oldukça düşük olup %9.2 seviyelerindedir. Şekil 3.11'de 2016 yılında AB ülkeleri ve Türkiye'de evsel atıkların yönetimine ait sonuçlar [177] gösterilmiştir. Şekil 3.11 incelendiğinde, ülkemizde %84 oranında düzenli depolama, %9 oranında geri dönüşüm ve %6 oranında ise diğer yöntemlere başvurulduğu görülmektedir. Bununla birlikte, bu evsel atıkların geri dönüşümünün yapıldığı geri dönüşüm tesis sayılarının dağılımı Şekil 3.12'de verilmiştir.

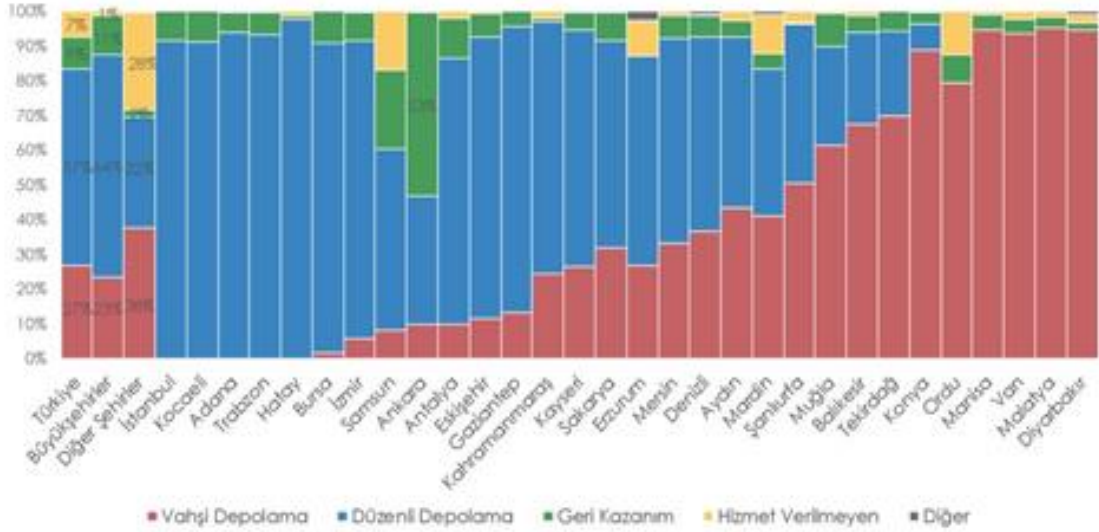


Şekil 3.11 : AB ülkeleri ve Türkiye'de evsel atıkların yöntemi (2016 yılı).



Şekil 3.12 : AB ülkeleri ve Türkiye'de geri dönüşüm tesis sayıları.

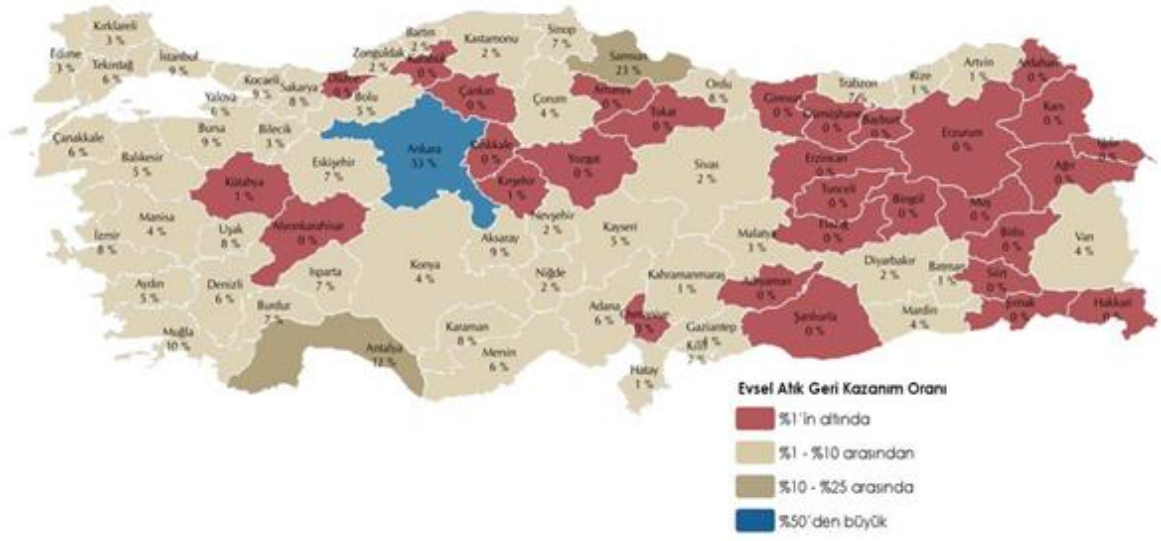
Şekil 3.12 incelendiğinde, 2016 yılında AB ülkelerinde 33.000’den fazla geri dönüşüm tesisinin bulunduğu, en fazla tesisin ise Almanya’da 8.433 adet olduğu görülmektedir. Şekilde Türkiye’ye ait 829 adet tesisin ve Finlandiya, Fransa, Hollanda, Portekiz, Sırbistan ve Yunanistan’a ait tesis sayılarının 2014 yılına ait veriler olduğu belirtilmektedir. Şekil 3.13’de ise ülkemizde yer alan büyükşehirlere ait evsel atıkların yönetimi oranlarıyla [179] gösterilmiştir.



**Şekil 3.13 :** 2016 yılına ait büyükşehirlerdeki evsel atıkların yönetimi.

Burada, en fazla geri dönüşümün %53 oranıyla Ankara’da olduğu görülmektedir. Bununla birlikte ülkenin Doğusuna gidildikçe geri dönüşüm oranının oldukça azaldığı ve ayrıca bu şehirlerde vahşi depolamanın daha fazla olduğu görülmektedir. Vahşi depolama yönteminin, çoğu yerel yönetimler tarafından zararsız olduğu düşünülmektedir. Ancak, bu yöntemde atıklar boş alanlara dökülerek ya da doğrudan toprağa gömülerek bertaraf edilmeye çalışılmaktadır. Bunun sonucunda ise atıklar yer altı ve yer üstü kaynaklarına zarar vererek çevre ve insan sağlığını ciddi anlamda tehdit etmektedir. 2016 yılının bu raporuna göre, ülkemizde vahşi depolama yöntemini en fazla uygulayan il %92 oranı ile Malatya, ikinci il %91 oranı ile Manisa, üçüncü il ise %90 oranı ile Diyarbakır’dır. Raporda, vahşi depolama yöntemini tercih eden illerin en kısa zamanda bu atıkların çevre ve insan sağlığını tehdit etmeden geri dönüştürülmesi ya da depolanmasını sağlanması gerektiği ifade edilmiştir. Çevre Bakanlığının 2023 yılına dair yaptığı ulusal atık yönetimi planlamalarında, vahşi depolama yönteminin mümkün olduğunca azaltılması gerektiği, 2023 yılında oluşacak atıkların %35’inin geri dönüşüm ile %65’inin ise düzenli depolama ile bertaraf edilmesi

gerektiği belirtilmiştir [180]. 2016 yılına ait iller bazında geri dönüşüm oranları Şekil 3.14’de verilmiştir.



Şekil 3.14 : İller bazında geri dönüşüm oranları (2016 yılı).

Şekil 3.14’de en yüksek geri dönüşüm oranını Ankara’dan sonra Samsun ve Antalya’nın takip ettiği, doğu illerine bakıldığında geri dönüşümün neredeyse hiç yapılmayan birden çok şehrin olduğu, Doğu Anadolu Bölgesinde en yüksek evsel atık geri dönüşümünün %3 ile Malatya ili olduğu görülmektedir.

Konumu, il merkezinin gelişimi ve halkın sosyo-kültürel düzeyinden kaynaklı sürekli göç alan Malatya ilinde nüfusun hızla artış göstermesi, kente ilişkin yapılacak olan Atık Entegre Tesisi’nin yer seçiminin titizlikle yapılması gerektiğinin önemini ortaya koymaktadır. Kentte, Malatya Büyükşehir Belediyesi’ne ait Malatya Entegre Çevre Tesisi (Şekil 3.15) ve Kapıkaya atık düzenli depolama ve bertaraf sahası (Şekil 3.16) olmak üzere 2 farklı alan bulunmaktadır [181].

Malatya entegre çevre tesisi’nde, şehrin genelindeki tüm katı atıklar burada toplanıp, atıkların yönetimi bu tesisten tek elden gerçekleştirilmektedir. Tesiste, atık kabul, ayrıştırma alanı, biyometanizasyon ünitesi, atıktan türetilen yakıt gazifikasyon tesisi, sera tesisi, düzenli depolama alanı ve seyir terası bulunmaktadır. İlçelerden Orduzu Katı Atık Entegre Tesisine, oradan da Entegre Çevre Tesisi’ne transfer edilen atıklar, ayrıştırma tesisinde ayrıştırılır ve burada geri dönüşüm malzemeleri ayrılır.



**Şekil 3.15 :** Malatya entegre çevre tesisi.



**Şekil 3.16 :** Kapıkaya atık düzenli depolama ve bertaraf sahası.

Ardından geriye kalan atıklar, biyometanizasyon, deponi gaz ve gazifikasyon ünitelerine gönderilir ve atıklardan elektrik enerjisi üretilir. İl genelinde 2.4 MW'e kadar enerji üretimi enerji üretim tesislerinde yapılmaktadır. Yapılan planlamaya göre, enerji tesisinden alınan atık ısıl kalıntılar (Şekil 3.17), ileride sera ısıtmasında ya da kompostlama yapılarak değerlendirileceği düşünülmektedir [181,182].



**Şekil 3.17 :** Enerji tesisinden alınan ısı kalıntıları.

Bu çalışmada ise bir katkı malzemesi olarak baca birikintisi külleri asfalt modifikasyonunda geopolimer yapıda kullanılarak elde edilen bağlayıcıların ve dolayısıyla sıcak karışımların performans özelliklerine etkisi ve kullanılabilirliği araştırılmıştır.

#### 3.2.4.1 Geopolimer

Günümüzde giderek her alanda kullanılmaya başlanan ve önemi gittikçe artan geopolimer kavramı, ilk kez 1978 yılında Davidovits tarafından kullanılmıştır. Ona göre geopolimer, kimyasal içeriği ve amorf mikro yapısıyla zeolite benzeyen, mineral bağlayıcı ailesinden bir malzemedir [183]. Davidovits'e göre, uçucu kül (UK), yüksek fırın cürufu (YFC), silis dumanı (SD), pirinç kabuğu gibi genelde endüstriyel kökenli atıklar ya da yapısında silis ve alüminlerin içeren çeşitli malzemeler, alkali bileşikler ile kimyasal reaksiyona girer ve yeni bir bağlayıcı malzeme meydana getirir (Şekil 3.18). Bu işlemdeki kimyasal tepkime, bir "polimerizasyon" işlemi olduğundan dolayı Davidovits oluşan bağlayıcıyı "geopolimer" olarak adlandırmıştır [184–187].

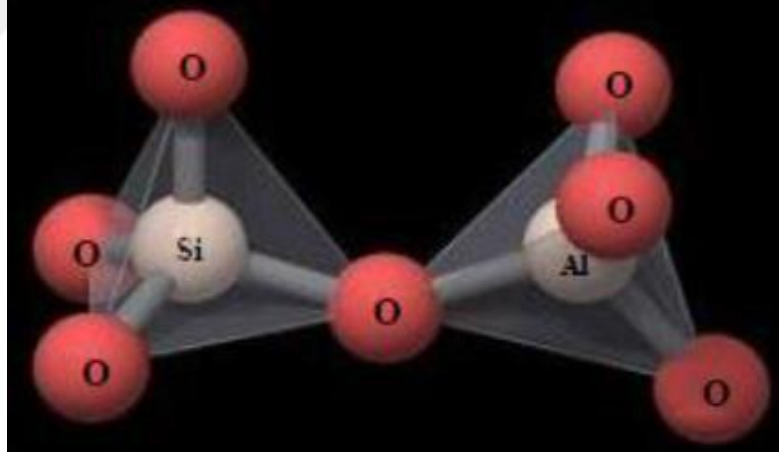


**Şekil 3.18 :** Geopolimer malzeme üretimi.

Geopolimer üretimi esnasında gerçekleşen polimerizasyon işlemi, hızlı bir kimyasal reaksiyon işlemidir ve bunun sonucunda Si-O-Al-O bağlarından meydana gelen 3 boyutlu polimerik zincir ve halka yapılı bir malzeme oluşmaktadır. Ampirik formüllerle geopolimer Denklem (3.1)'deki şekilde formülize edilmektedir. Burada, “M” potasyum, sodyum gibi kation ya da alkali elementleri, “-“ bağ varlığını, “z” 1,2,3 gibi sayıyı (32'e kadar) “n” polimerizasyon derecesini ifade etmektedir [188].



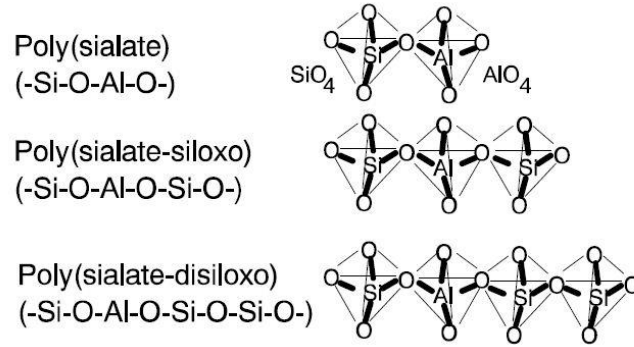
Geopolimer malzemeler yapılarında bulunan alüminyum, oksijen ve silis gibi elementlerden dolayı aynı zamanda “inorganik alüminosilikat” malzemeler olarak da isimlendirilmektedir. Davidovits'a göre geopolimer malzemelerin kimyasal tasarımında “poly(sialate)” ifadesi kullanılabilir. Sialate; silisyum-oxo-alüminatın kısa halidir. Sialate, 3 boyutlu bir ağ yapısında olup amorf tan yarı kristal yapıya kadar değişiklik göstermektedir. Bu ağ, polimerik yapıdaki temel Si-O-Al bağını oluşturan tüm -O-atomlarının paylaşılması sonucu buraya tekrarlı olarak bağlanan geometrik dörtyüzlü SiO<sub>4</sub> ve AlO<sub>4</sub> yapılarından meydana gelmektedir [189]. Sialate'ye ait geometrik konfigürasyonu Şekil 3.19'da verilmiştir.



**Şekil 3.19** : Sialate geometrik konfigürasyonu.

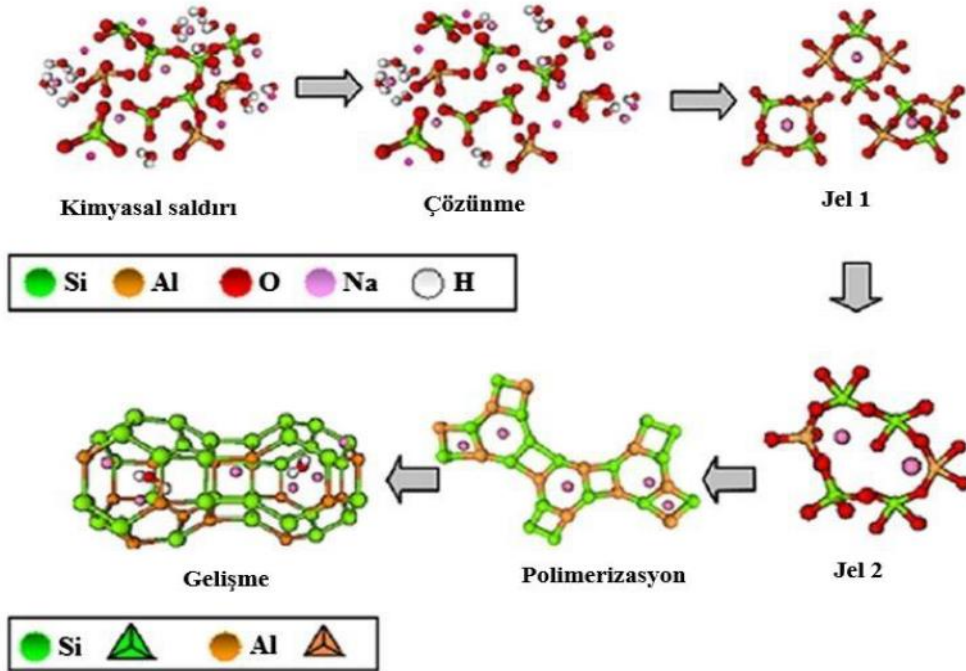
Davidovits'a göre geopolimer, esas olarak 3 farklı kimyasal yapıya ayrılmaktadır. Bunlardan ilki poly (sialate) (Si-O-Al-O), ikincisi poly (sialate-siloxo) (-Si-O-Al-O-Si-O) ve son olarak poly (sialate-disiloxo) (-Si-O-Al-O-Si-O-Si-O-) tipi yapılarıdır [153,155–157]. Söz konusu yapılara ait moleküler ağ gösterimleri Şekil 3.20'de verilmiştir. Geopolimer oluşumunda, bileşenlerdeki silis ve alümin atımları, alkali ortamda “polimerizasyon” adlı hızlı gerçekleşen bir kimyasal reaksiyon meydana getirir. Bu reaksiyon sonucunda Si-O-Al-

O bağlarından meydana gelen 3 boyutlu polimerik zincir ve halka yapılı yeni bir ürün (bileşik) meydana gelir [184].



Şekil 3.20 : Geopolimere ait moleküler yapılar.

Polimerizasyonun kimyasal reaksiyon süreci 3 aşamadan oluşur. Bunlar çözünme (ayrışma), taşıma/yönlendirme ve geopolimerizasyon/polikondansasyon'dur [193]. Geopolimerizasyon işlemi ekzotermik bir tepkimedir [191,194]. Geopolimerizasyon işlemine ait basit modelleme Şekil 3.21'de verilmiştir



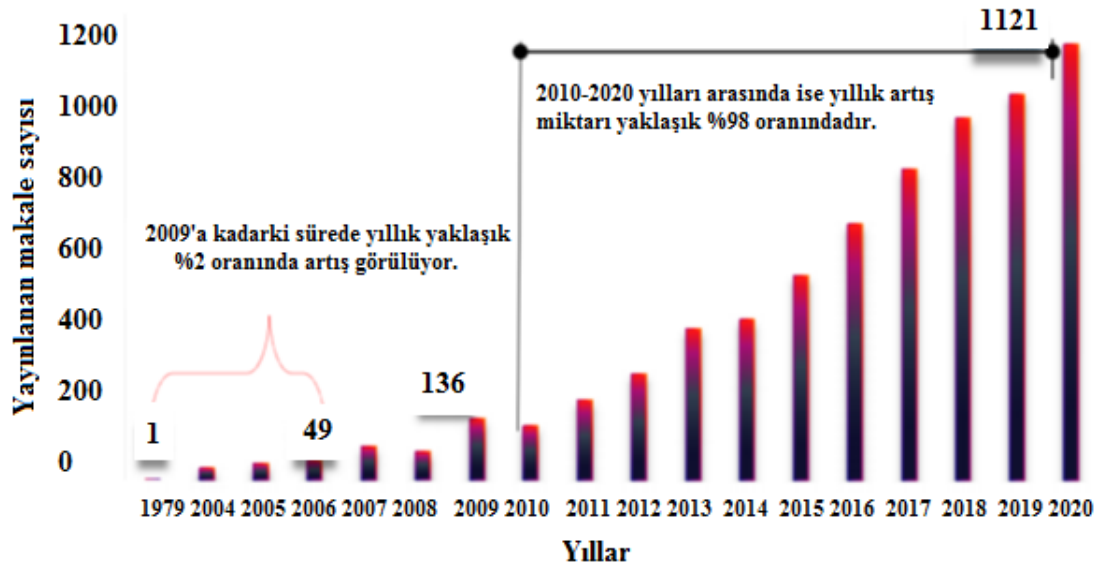
Şekil 3.21 : Geopolimerizasyon süreci.

Geopolimerizasyon sürecinde, alkali çözelti ile Si-O-Si ve Si-O-Al kovalent bağları temas ettiğinde, bu bağlar kolloid faza ayrılır. Çözünme sonucunda etkileşme meydana gelir ve birçok araştırmacı tarafından kabul gören “pıhtılaşmış yapı” oluşur. Tepkime devam



(Şekil 3.23). Bu durum, geopolimerlerin atık malzemelerin değerlendirilmesi ve sürdürülebilir çevre anlayışı içerisinde ne kadar önemli bir yer sahibi olduğunu ortaya koymaktadır [199].

Yapılan çalışmalarda geopolimer malzemelerin, İnşaat Mühendisliğinde çoğunlukla yapı ve geoteknik anabilim dallarında kullanıldığı görülmektedir. Özellikle beton teknolojisi, yeşil binalar, yapı uygulamaları, geoteknik uygulamaları ve zemin iyileştirmelerinde [200,201] geopolimer malzemeler kullanılmaktadır.



Şekil 3.23 : Yıllara göre geopolimer malzeme çalışma sayıları.

Yüksek CO<sub>2</sub> emisyonu, artan çevresel kaygılar ve kısıtlı kaynak rezervi sebebiyle Portland çimentosuna alternatif bağlayıcı malzeme arayışı sonucunda ortaya çıkan geopolimer bağlayıcılı yapı malzemelerinin yüksek erken dayanımı, düşük geçirimsizlik, yüksek kimyasal ve yangın direnci gibi üstün özelliklere sahip olduğu yapılan beton çalışmaları ile kanıtlanmıştır [202,203]. Geopolimerlerin bu üstün özellikleri, yapı sektöründe çeşitli sürdürülebilir ürünlerin geliştirilmesi, yangına dayanıklı kaplama ve fiber katkılı kompozit üretimine olanak sağlamakla birlikte kimyasal ve nükleer endüstrisinde atık depolama amacıyla kullanımı hedeflenmiştir [204]. Geopolimerlerde bağlayıcı olarak doğal alümina-silikat ya da uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumana (Şekil 3.24) gibi alümina-silikat esaslı atık malzemeler kullanılmaktadır.



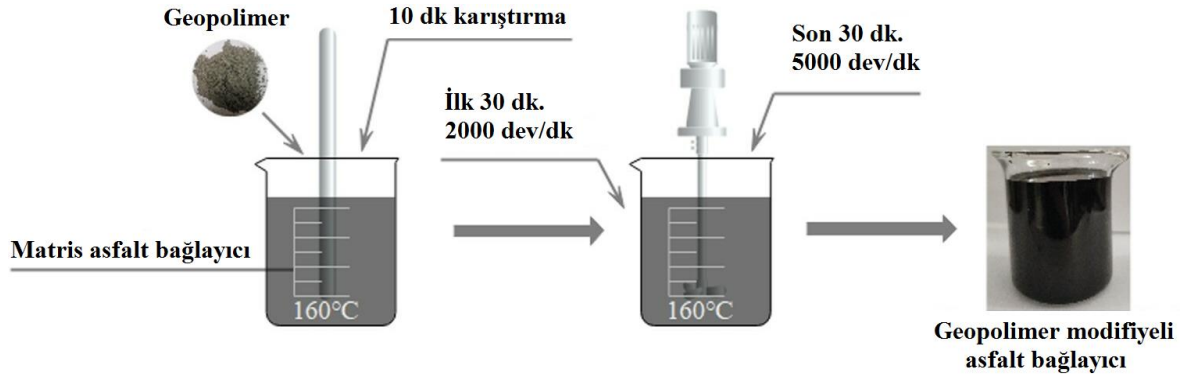
Şekil 3.24 : Geopolimer üretiminde kullanılan malzemeler.

### 3.3 Literatür Çalışmaları

Karayolu mühendisliğinde, geopolimer malzemelerin kullanımı oldukça yenidir. Asfalt bağlayıcı, sıcak karışım asfalt (HMA), ılık karışım asfalt (WMA) ve çeşitli yol tabakalarının iyileştirilmesinde özellikle 2018 yılından bu yana geopolimer malzemeler kullanılmaya başlanmıştır.

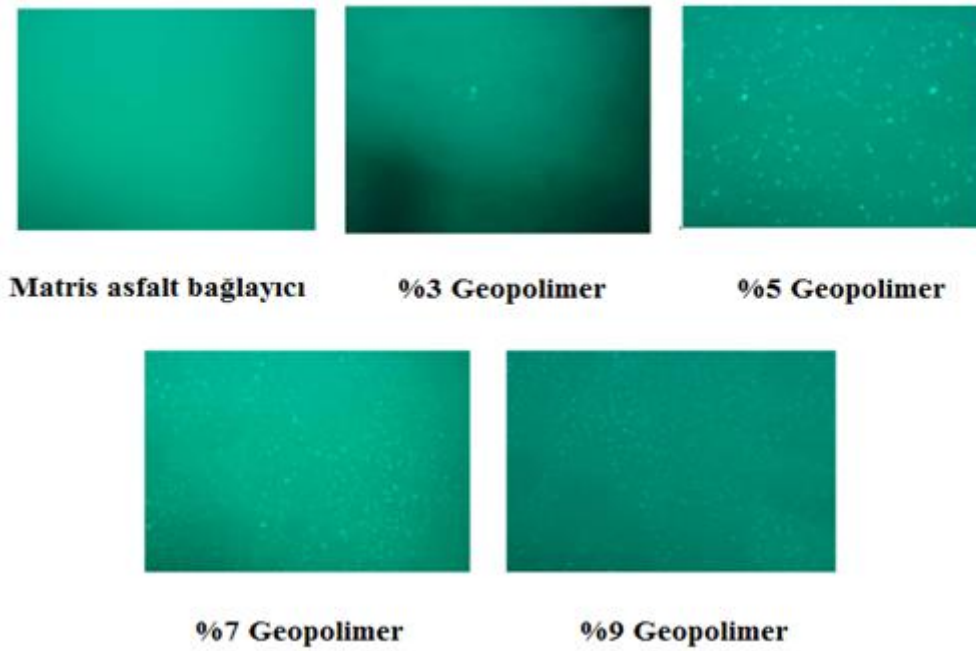
Meng ve ekibi (2022), yaptıkları çalışmada çeşitli atıklar (metakaolin, cüruf tozu ve çelik cürufu tozu) ve alkali aktivatör ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ve  $\text{NaOH}$ ) kullanarak elde ettikleri geopolimerlerin, asfalt bağlayıcılar ve asfalt karışımların mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çalışmada, Si/Al oranı 2:1 ve sıvı/katı oranı 7/10 olan geopolimerler hazırlanmıştır. Alkali aktivatör ve alüminosilikat hazırlandıktan sonra, eşit oranda karıştırmaya tabi tutulmuş ve elde edilen bulamaç, kalıba dökülerek 1 gün bekletilmiş ve böylece katılaşması sağlanmıştır. 1 günün sonunda, geopolimer ezilerek toz haline getirilmiş ve bu haliyle matris asfalt bağlayıcılara eklenmiştir. Geopolimer bağlayıcılar hazırlanırken 60/80 penetrasyon sınıfı saf bağlayıcı  $160^\circ\text{C}$  sıcaklıkta bekletilmiş ve akışkan haldeyken geopolimer eklenmeye başlamıştır. Geopolimer, asfalta %3, %5 ve %7 ve %9 oranlarında eklenmiş ve bağlayıcı ilk 30 dk boyunca 2000 dev/dk hızında, ardından aynı sürede 5000 dev/dk karıştırılmıştır. Çalışmadaki geopolimer bağlayıcıların hazırlanma süreci Şekil 3.25’de verilmiştir.

Elde edilen modifiye bağlayıcılar yumuşama noktası, duktilite, penetrasyon, elastik geri kazanım, depolama stabilitesi, viskozite, FT-IR spektroskopisi ve floresan mikroskobu (FM), DSR, MSCR ve BBR testlerine, modifiye karışımlar ise tekerlek izi, Marshall, donma çözülme testlerine tabi tutulmuştur.



**Şekil 3.25 :** Geopolimer bağlayıcıların hazırlanma süreci.

Testler sonucunda, geopolimer katkısıyla bağlayıcıların sertliğinin ve viskozitesinin arttığı, depolama stabilitesinin kararlı olduğu görülmüştür. FT-IR sonuçlarına göre, %5 geopolimer oranının optimum içerik olduğu, bu orandan sonra piklerde azalma meydana geldiği, FM sonuçlarına göre geopolimerin asfalt içerisinde topaklanmadan karıştığı ve karışımın mükemmel mühendislik performansına sahip olduğu belirtilmiştir (Şekil 3.26). DSR, MSCR ve BBR test sonuçlarına göre, hem düşük hemde yüksek sıcaklıklardaki deformasyonlara karşı direncin en iyi %5 geopolimer oranında elde edildiği görülmüştür. Mekanik test sonuçlarına göre, geopolimer katkısıyla karışımların dinamik stabilitesinin ve su hasarı direncinin arttığı, tekerlek izi derinliğinin ve düşük sıcaklık özelliklerinin azaldığı belirtilmiştir [205].



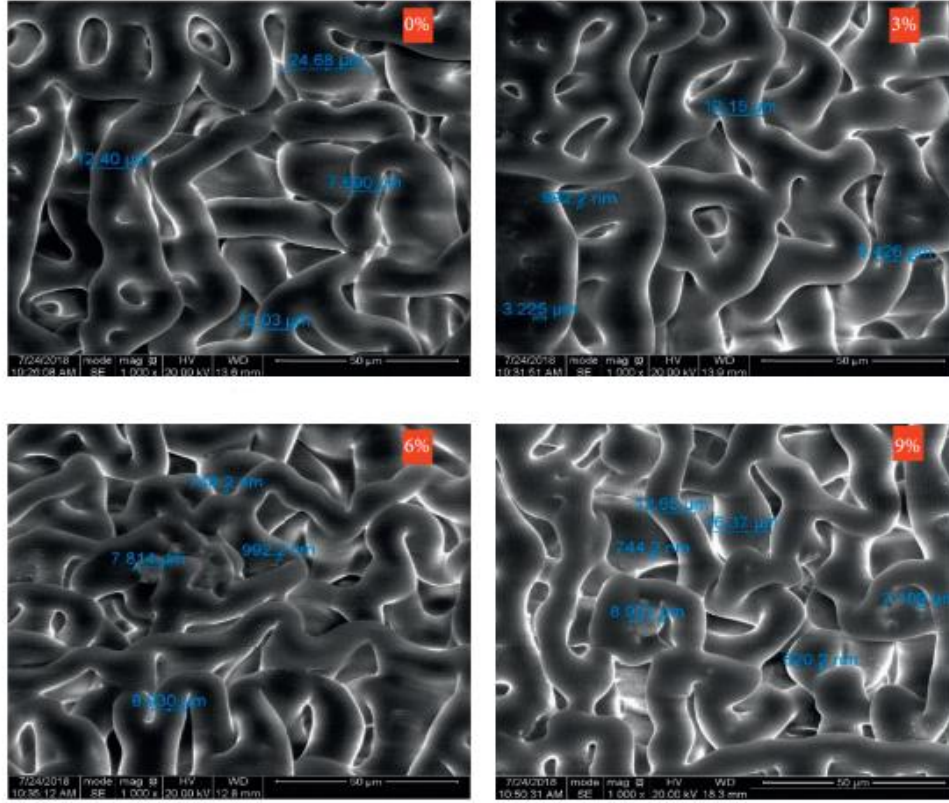
**Şekil 3.26 :** FM test sonuçları.

Hamid ve arkadaşları (2020) çalışmalarında PG 58-28 saf bağlayıcısına uçucu kül, sodyum silikat ve sodyum hidroksit ekleyerek elde ettikleri geopolimer modifiyeli bağlayıcıların reolojik ve mikroyapılarını incelemişlerdir. Çalışmada, 8 Molar sodyum hidroksit hazırlamak için kütlece sırasıyla %100 : %50 oranında sodyum silikat eklenerek alkali çözelti hazırlanmış, ardından 200 gr uçucu kül 80 gr alkali çözeltilisine eklenerek 6 dk boyunca karıştırılmış ve oluşan bulamaç kalıplara dökülmüştür. Son olarak, geopolimerler oda sıcaklığında ve fırında kurlenmiştir (Şekil 3.27). Kür süresi sonunda öğütülen geopolimerler %3, %6 ve %9 oranında PG 58-28 bağlayıcısına eklenmiştir. Karıştırma işlemi  $150^{\circ}\text{C} \pm 5'$ lik bir sıcaklıkta 2000 devir/dk'lık bir hız altında 120 dakika boyunca mekanik bir kesme karıştırıcısı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



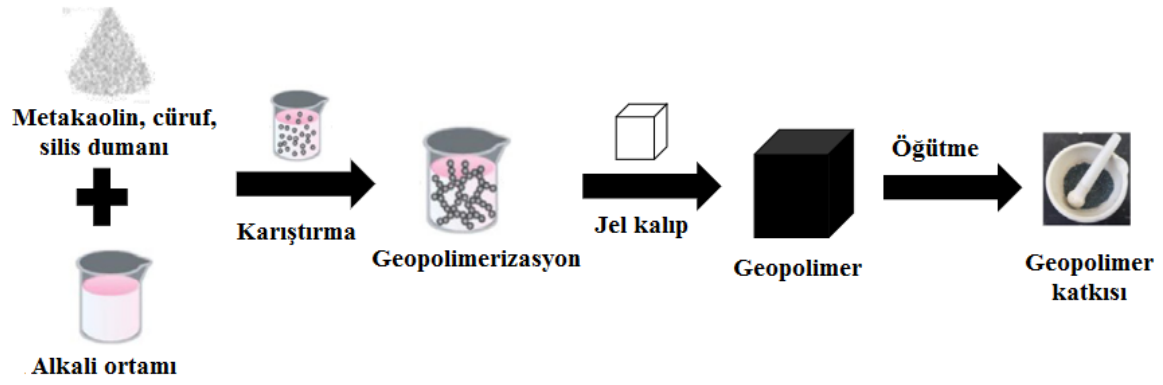
Şekil 3.27 : Geopolimer malzeme hazırlama süreci.

Elde edilen geopolimer katkılı bağlayıcıların reolojik ve mikro özellikleri RV, DSR ve çevresel taramalı elektron mikroskobu (ESEM) testleri ile belirlenmeye çalışılmıştır. Bununla birlikte, kür süresinin reolojik özellikler üzerindeki etkisi de araştırılmıştır. Test sonuçlarına göre, geopolimer oranı ve kür süresi artışıyla asfalt bağlayıcıların reolojik davranışının etkilendiği belirlenmiştir. Yüksek geopolimer içeriğiyle bağlayıcıların tekerlek izi direncine karşı performansının arttığı, ayrıca geopolimerin bağlayıcı içinde iyi bir dağılım gösterdiği (Şekil 3.28) görülmüştür [18].



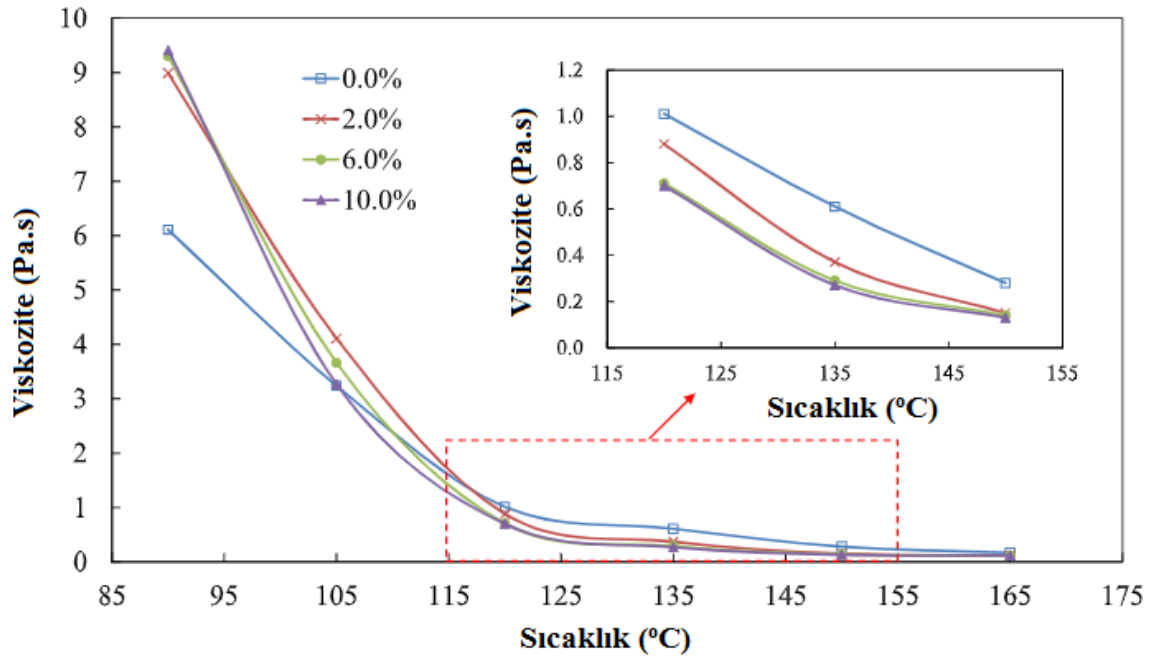
**Şekil 3.28** : Bağlayıcılara ait ESEM görüntüleri.

Tang ve arkadaşları (2018) çalışmalarında ılık karışım asfaltta geopolimer malzemenin kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Çalışmada atık malzeme olarak metakaolin, cüruf ve silis dumanı, alkali aktivatör olarak ise sodyum hidroksit ve sodyum silikat'ı farklı konsantrasyonlarda kullanılmışlardır. Geopolimer üretiminde ilk olarak, farklı konsantrasyonlar elde etmek için sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanılarak alkali ortam hazırlanmış ve üç farklı alüminosilikat ham maddesinin tozları, formülasyonlara göre 100 g tartılmıştır. Daha sonra karışıma 40 g alkali ortam ve 6 g su ilave edilmiş ve bulamaç hazırlanmıştır. Bulamaç 20mm x 20mm x 20mm boyutlarındaki plastik kalıplara aktarılarak üzeri plastik film ile kapatılmış ve ortam sıcaklığında 24 saat kür süresine tabi tutulmuştur. Ardından malzeme kalıptan çıkarılmış ve öğütülerek toz haline getirilmiştir. Son olarak, çapı 0.15 mm'lik elekten elenen malzeme bağlayıcıya eklenmeye hazır hale getirilmiştir (Şekil 3.29).



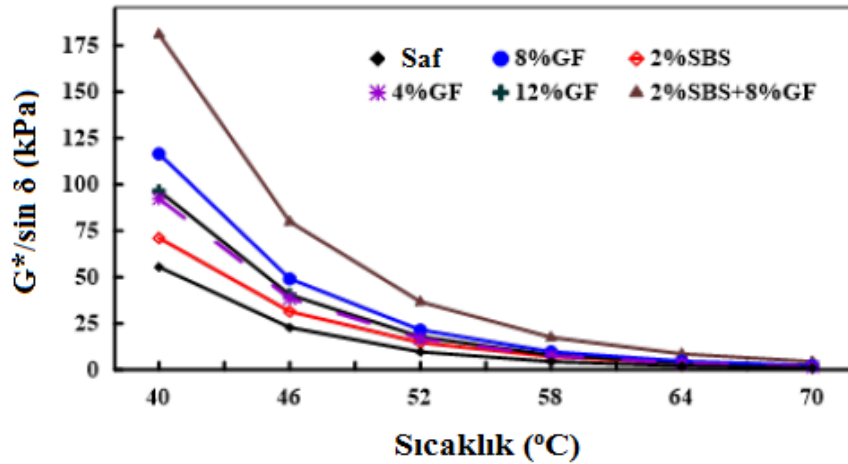
Şekil 3.29 : Geopolimer hazırlık süreci.

Geopolimer katkılı bağlayıcılar hazırlamak için, saf bağlayıcı 130°C sıcaklıkta ısıtılmış ve ağırlıkça %2, %6 ve %10 oranlarında geopolimer tozu eklenerek 140°C sıcaklıkta 30 dk boyunca 2000 dev/dk hızında karıştırma işlemi yapılmıştır. Bağlayıcıların geleneksel özellikleri yumuşama noktası, penetrasyon, duktilite ve viskozimetre testleri ile, karakterizasyonu ise XRD, SEM, FT-IR ve termogravimetri (TG) analizleri ile belirlenmeye çalışılmıştır. Testler sonucunda, geopolimer katkısıyla bağlayıcıların yumuşama noktasının arttığı, penetrasyon ve duktilite değerlerinin azaldığı görülmüştür. Bununla birlikte, geopolimerin bağlayıcının viskozitesini azalttığı (Şekil 3.30) ve böylece karıştırma sıcaklığını da azalttığı belirtilmiştir. Karakterizasyon sonuçlarına göre, geopolimerizasyon sırasında bağlayıcılarda büyük miktarda gözenekler oluştuğu görülmüştür [204].

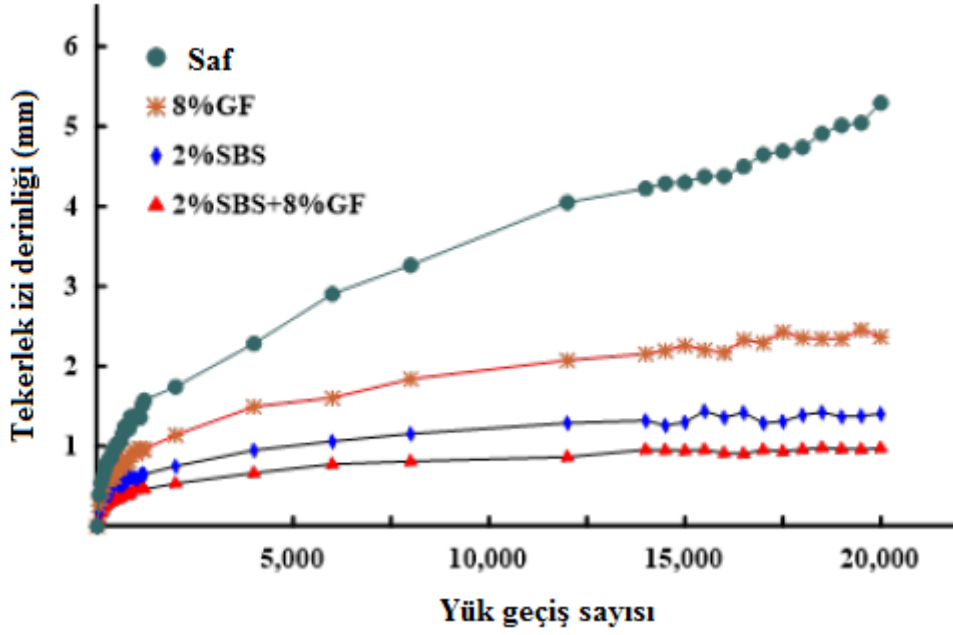


Şekil 3.30 : Bağlayıcılara ait viskozite sonuçları.

Hamid ve arkadaşları (2022), çalışmalarında uçucu kül bazlı geopolimer (GF) (%4, %8 ve %12), SBS (%2) ve bir SBS kombinasyonu (hibrit) (%2SBS+ %8GF) ile modifiye edilmiş asfalt bağlayıcının tekerlek izi davranışı üzerinde sıcaklığın, gerilmelerin, polimer tipinin ve modifikasyon oranının etkilerini değerlendirmeyi amaçlamışlardır. Ayrıca, geopolimer katkılı bağlayıcıların reolojik özellikleri RV, DSR ve MSCR testleri belirlenmiştir. Bununla birlikte, asfalt karışımların tekerlek izi direnci, Hamburg tekerlek izi testi kullanılarak değerlendirilmeye çalışılmıştır. Test sonuçlarına göre, tüm katkılı numunelerin saf bağlayıcıya kıyasla viskozite değerinin yüksek olduğu, hibrit (%2SBS+%8GF) bağlayıcısının viskozite değerinin en yüksek olduğu görülmüştür. DSR ve MSCR sonuçlarına göre, %8GF içeren asfalt bağlayıcının kayma modülü ( $G^*$ ), tekerlek izi faktörü ( $G^*/\sin \delta$ ) (Şekil 3.31), R ve Jnr açısından en iyi sonucu verdiği ifade edilmiştir. Bununla birlikte, hibrit bağlayıcısının %2SBS katkılı bağlayıcıya kıyasla  $G^*$  değerinde önemli bir artış, faz açısı değerinde ise azalma meydana geldiği, bu sonucunda geopolimer katkısıyla olduğu değerlendirilmektedir. Tekerlek izi sonuçlarına göre ise, %8 GF katkısının karışımın %55 oranında tekerlek izi direncini azalttığı, hibrit karışımının ise tekerlek izi derinliğini %82'ye kadar düşürdüğü (Şekil 3.32) görülmüştür [206].



Şekil 3.31 :  $G^*/\sin \delta$ - sıcaklık sonucu.



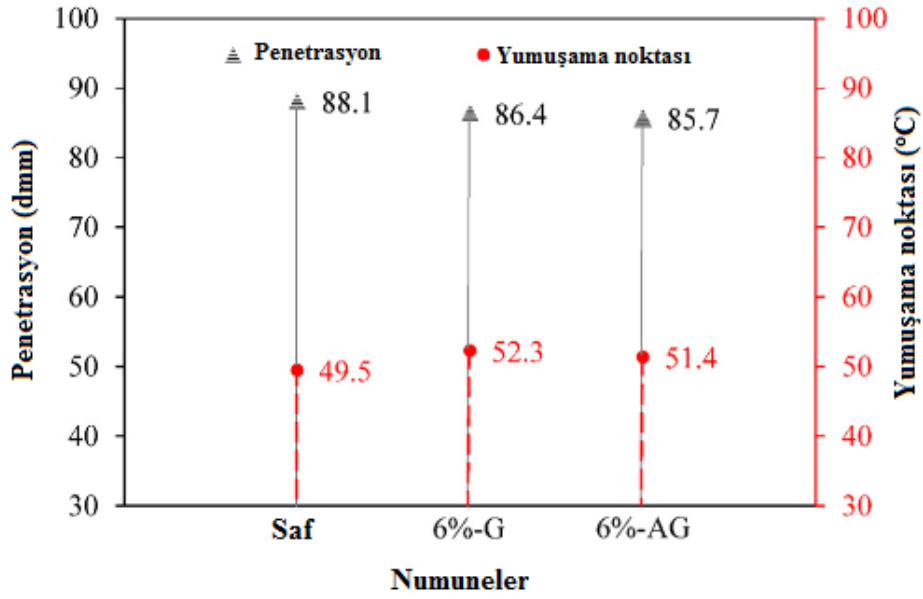
Şekil 3.32 : Tekerlek izi derinliği- yük geçiş sayısı sonuçları.

Tang ve arkadaşları (2020), çalışmalarında ılık karışım asfaltlara (WMA) ekledikleri geopolimer katkısıyla bağlayıcıda meydana gelen uçucu madde kaybı (VOC) ve partikül madde emisyonunu tayin etmeye çalışmışlardır. Çalışmada, geopolimer katkısı hazırlanırken metakaolin (MK), silis dumanı (SF) ve granül öğütülmüş yüksek fırın cürufu (GGBS) malzemeleri ve sodyum silikat, sodyum hidroksit alkali aktivatörleri kullanılmıştır. Si:Al oranı 3:1 olacak şekilde hazırlanan MK, GGBS ve SF karışımı ile sıvı/katı oranı 0.35 olan alkalın aktivatör toplamda 8 dk karıştırmaya tabi tutulmuştur. Elde edilen bulamaç kübik kalıplara dökülerek ortam sıcaklığında 24 saat boyunca bekletilmiştir. Daha sonra numuneler kalıptan çıkarılmış ve kontrollü koşullar altında (40°C ve %65 bağıl nem) bir kür odasında 72 saat küremeye tabi tutulmuştur. Son olarak, tüm numuneler, öğütülmüş ve maksimum parçacık boyutu 0.15 mm elekten elenmiştir. Geopolimer tozlarının bir kısmı kenarda bekletilirken, diğer kısmı fırınında 550°C'de 4 saat kalsine edildikten sonra desikatörde oda sıcaklığına kadar soğutulmuştur. Kalsine edilmemiş orijinal geopolimer tozu "G" olarak, kalsine edilmiş geopolimer tozu ise susuz geopolimer olarak adlandırılmış ve çalışmada "AG" olarak belirtilmiştir. Geopolimer hazırlık süreci Şekil 3.33'de şematize olarak gösterilmiştir.

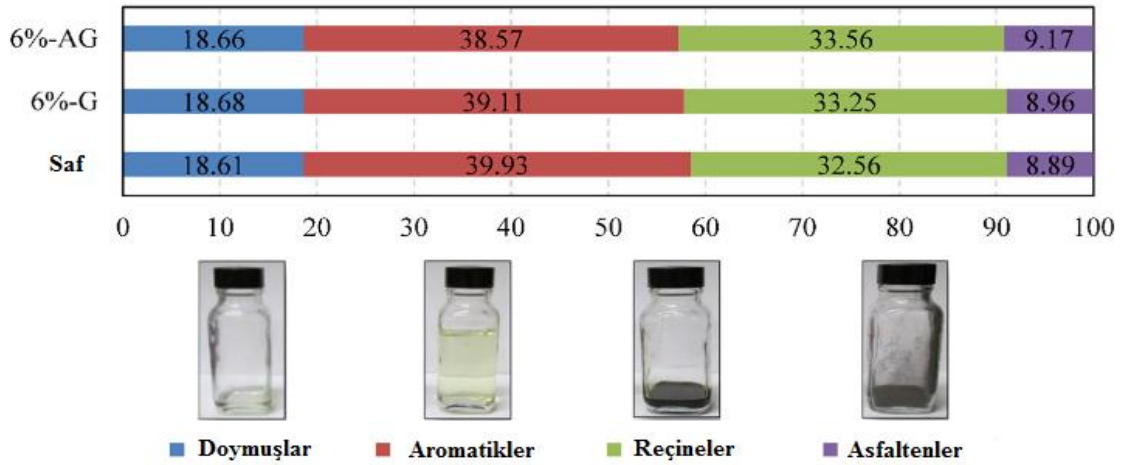


Şekil 3.33 : Prosedürün şematize gösterimi.

Elde edilen iki tür geopolimer katkısı da %6 oranında (hem susuz (AG) hemde orijinal (G)) tartılarak 130°C sıcaklıktaki saf bağlayıcıya 2000 dev/dk hızında eklenmiş ve 1 dakika karıştırma işlemi yapılmıştır. Elde edilen iki tür bağlayıcı üzerinde yumuşama noktası, penetrasyon, SARA bileşen analizi ve FT-IR spektroskopisi analizleri yapılmıştır. Ayrıca, kütle spektrometresi (TG-MS) ve partikül madde (PM) testleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, iki farklı şekilde elde edilen geopolimer katkısının bağlayıcıların geleneksel özellikleri (Şekil 3.34), SARA analizi (Şekil 3.35) ve FTIR analizi üzerinde önemli bir etkisi olmadığı belirtilmiştir. Ancak, TG-MS sonuçlarına göre orijinal ve susuz geopolimer ilavesinin VOC ve PM emisyonlarını azaltmada önemli etkisi olduğu hatta sadece WMA için değil aynı zamanda HMA içinde kullanılabileceği, PM emisyon sonuçlarına göre ise, asfalt üretimi sırasında geopolimer ilavesinin PM emisyonlarını önemli ölçüde azaltabildiği ve atıkların çevreye verdiği kirliliğinin bu şekilde engellenebileceği belirtilmiştir [207].



Şekil 3.34 : Geleneksel sonuçlar.



Şekil 3.35 : SARA analizi sonuçları.

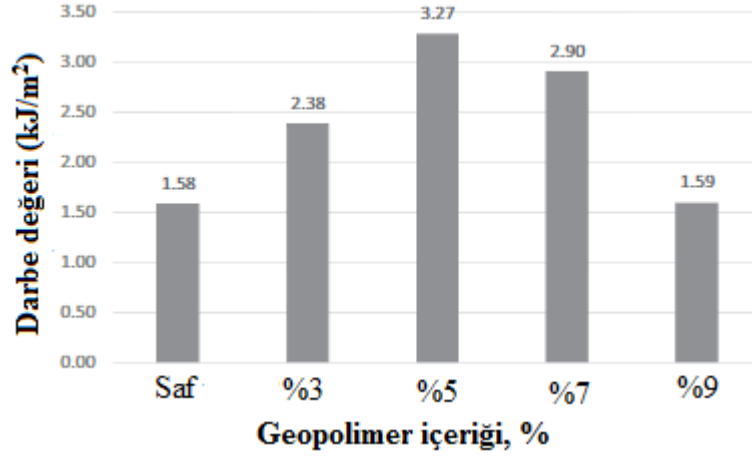
Ali ve arkadaşları (2017) çalışmalarında geopolimer modifiyeli bağlayıcıların yüksek sıcaklıklardaki performansını incelemişlerdir. Çalışmada, üretmiş oldukları geopolimerleri asfalta ağırlıkça %3, %5 ve %7 oranlarında ilave etmiş ve elde ettikleri bağlayıcıları yumuşama noktası, viskozite ve DSR testlerine tabi tutmuşlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre, en iyi geopolimer oranının %5 olduğu, bu oranda yumuşama noktası ve viskozite değerlerinin artış gösterdiği görülmüştür. Bununla birlikte, geopolimer katkısıyla modifiye bağlayıcıların kalıcı deformasyonu, saf bağlayıcıya kıyasla 3 kat azalma göstermiştir [208].

Rosyidi ve ekibi (2020), çalışmalarında uçucu kül esaslı geopolimer ile modifiye edilmiş bağlayıcıların (GMB) kimyasal, dayanım, adezyon ve morfolojik özelliklerini araştırmışlardır. Bağlayıcılar, penetrasyon, duktilite, yumuşama noktası, viskozite ve depolama stabilitesi testlerine tabi tutulmuştur. Ayrıca, FT-IR spektroskopisi, darbe testi, serbest yüzey enerjisi (SFE) ve atomik kuvvet mikroskobu (AFM) testleri de bağlayıcılar üzerinde uygulanmıştır. Geopolimer jeli hazırlanırken, uçucu külün alkali aktivatöre oranı 0.45, sodyum silikatın sodyum hidroksite oranı ise 2.5 olarak alınmıştır. Sodyum silikat ve sodyum hidroksit 1000 ± 10 rpm karıştırma hızında ve 150 ± 5 °C sıcaklıkta 90 dk mekanik karıştırma ile karıştırıldıktan sonra hava geçirmez bidonda 24 saat bekletilmiştir. Ardından elde edilen geopolimer bağlayıcıya ağırlıkça %3, %5, %7 ve %9 oranlarında eklenmiştir. Elde edilen fiziksel test sonuçlarına göre, %5 geopolimer oranının kritik bir oran olduğu, bu oranda bağlayıcının elastik özelliğinin arttığı, daha sert olduğu ve viskozitesinin arttığı görülmüştür (Çizelge 3.5).

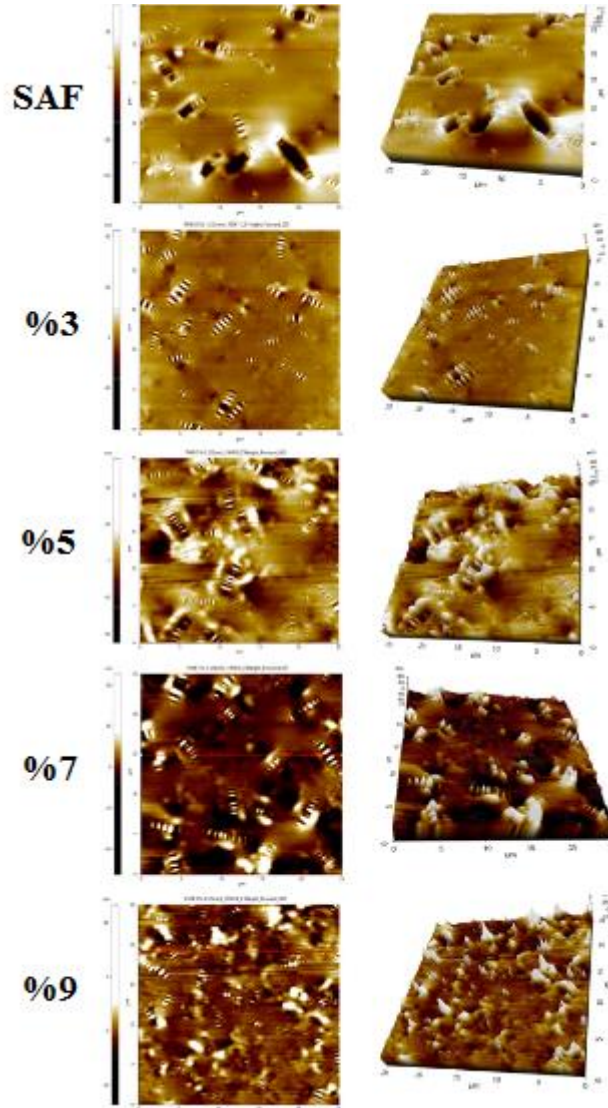
**Çizelge 3.5 : Çalışmaya ait fiziksel bulgular.**

Özellik	Dozaj (%)				
	Saf	%3	%5	%7	%9
Penetrasyon	84	76	61	68	71
Yumuşama noktası (°C)	47.0	49.0	56.5	53.0	49.5
Duktilite (cm)	150	126	100	91	118
Viskozite 135 °C (Pa.s)	0.36	0.42	0.46	0.43	0.43
Viskozite 165 °C (Pa.s)	0.12	0.13	0.17	0.14	0.14
Depolama stb., sıcaklık farkı (°C)	0	1.0	0	1.0	0

FT-IR sonuçlarına göre, geopolimer ilavesinin bağlayıcıların spektrumunda önemli bir değişiklik üretmediği, bunun sebebinin de bağlayıcının fonksiyonel grubunda herhangi bir değişiklik olmadığından kaynaklandığı ifade edilmiştir. Darbe testi sonuçlarına göre, geopolimer oranı artışıyla darbe değerinin arttığı, en yüksek değer %5 geopolimer oranından elde edildiği görülmüştür (Şekil 3.36). Bağlayıcıların adezyonu ile ilgili yapılan analizler sonucunda, %3 oranının bağlayıcının yapışma yeteneği üzerinde daha etkili bir oran olduğu ifade edilmiştir. AFM karakterizasyonuna göre ise bağlayıcıya daha yüksek oranda geopolimer eklenmesinin daha yüksek asfaltın içeriği ve bağlayıcının gelişmiş arı yapısı (Şekil 3.37) ile sonuçlandığını ifade etmişlerdir. Sonuç olarak, %5 geopolimer içeriğinin bağlayıcı modifikasyonunda en iyi sonuçları verdiği belirtilmiştir [19].



Şekil 3.36 : Darbe testi sonuçları.



Şekil 3.37: AFM görüntüleri.

Dayal ve Soundarapandian (2018) çalışmalarında uçucu kül tabanlı geopolimer ile kaplanan agregaların asfalt karışımının performansı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çalışmada iki farklı özellikte uçucu kül kullanılmış ve geopolimer hazırlanmadan önce ilk olarak uçucu küller 45µm'lik elekten elenmiştir. Ardından sodyum silikat, NaOH solüsyonunda 4 saat çözdürülerek topraklanması engellenmiş ardından 3 dk boyunca karıştırılmıştır. Sodyum silikatın sodyum hidroksite oranı 0.4-0.5 arasında tutulmuştur. İlk uçucu kül (FA1) (Ca içeriği yüksek) karışımda 8 dk, ikinci uçucu kül ise (FA2) yaklaşık 15 dk boyunca karıştırılmıştır. Ardından elde edilen iki farklı geopolimer bağlayıcı agrega ile karıştırılmış (Şekil 3.38) ve böylece agregaların geopolimerle çevrenmesi sağlanmıştır. Son olarak, Marshall numuneleri hazırlanarak dolaylı gerilim testi (IDT), tekrarlı yük testi ve DSR testleri uygulanmıştır.



**Şekil 3.38** : Katkısız agrega ve geopolimerle çevrenmiş agrega.

Testler sonucunda, geopolimer ilavesi ile agregaların fiziksel ve mekanik özelliklerinin geliştiği, CaO içeriği yüksek uçucu kül (FA1) ile hazırlanan geopolimer katkılı karışımın dayanım özelliklerinin daha yüksek olduğu belirtilmiştir. Bununla birlikte, geopolimer katkılı agregalarla hazırlanan karışımların saf karışıma kıyasla kalıcı deformasyonlara karşı daha dirençli olduğu, ekstraksiyon edilerek DSR testine tabi tutulan bağlayıcıların üzerinde ise geopolimerin  $G^*$  üzerinde önemli bir etkisi olduğu ifade edilmiştir [209].

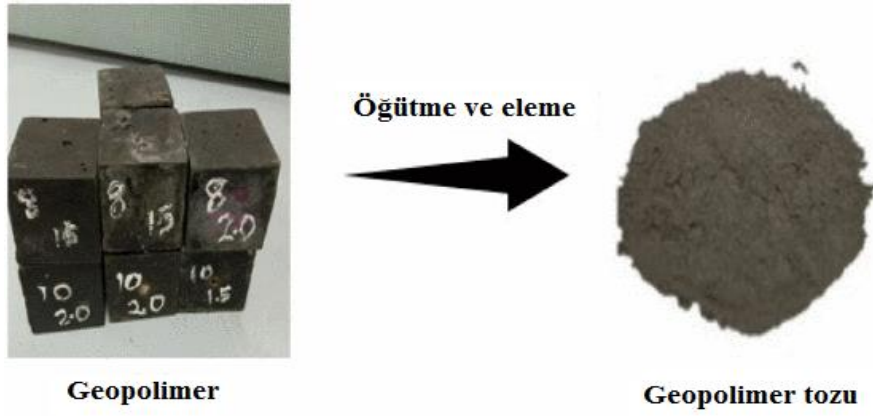
Tang ve arkadaşları (2022), daha önce yapmış oldukları çalışmalarda üretmiş oldukları geopolimerin asfalt bağlayıcılar için önemli etkisi olduğunu ve gelecek vaat eden bir malzeme olduğunu ifade etmişlerdir [204,207]. Bu çalışmalarında ise, önceki çalışmalarının devamı olarak, WMA'larda kullanılan geopolimerin Marshall dizayn metoduna göre bu bağlayıcılar kullanılarak hazırlanan karışım numunelerinin yüksek sıcaklık performansı üzerindeki etkisi dinamik stabilite testi ile belirlenmeye çalışılmıştır. Sonuçlar Marshall dizaynı ile hazırlanan numunelerin boşluk oranının aynı yüzdede

geopolimer modifiyeli bağlayıcı kullanımı ile %0.32 azaldığını göstermiştir. Ayrıca geopolimer modifikasyonunun tekerlek izi oluşumuna karşı direnci arttırdığı, ağırlıkça %3 oranında geopolimer modifikasyonunun partikül madde emisyonlarında önemli oranda azalma sağladığı da çalışma sonuçlarında yer almaktadır [210].

Hoy ve arkadaşları (2016) yol temel malzemesi olarak, Geri Dönüştürülmüş Asfalt Kaplama (RAP) ve uçucu kül (FA) geopolimerleri kullanarak düşük karbonlu bir stabilizasyon yönteminin kullanımını araştırmışlardır. Çalışmada, Toksikite Karakteristik Süzme Prosedürünün (TCLP) sonucunda yol kaplamalarının yapımında RAP-FA karışımlarının ve RAP-FA geopolimerlerinin kullanımının çevre için herhangi bir tehlike oluşturmadığını ifade etmişlerdir [211]. Başka bir çalışmada Hoy ve arkadaşları (2016), çalışmanın devamında FA-geopolimerinin, RAP-FA karışımının Sınırsız Sıkıştırma Mukavemetini (UCS) ve dayanıklılığını önemli ölçüde arttırdığını ifade etmişlerdir [212].

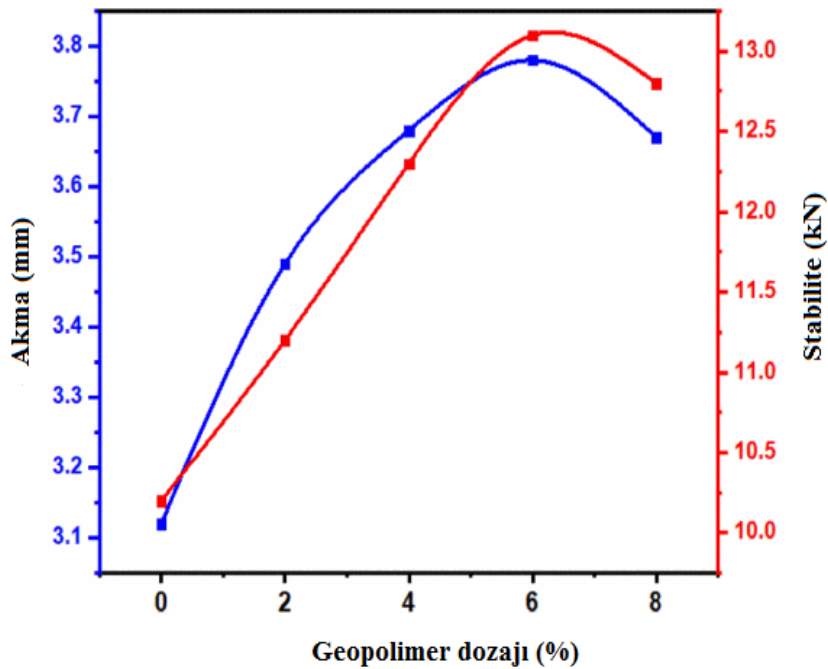
İbrahim ve arkadaşları (2017) yaptıkları çalışmada geopolimer modifiye bağlayıcının mekanik özelliklerini ve su emilimini araştırmıştır. Bu amaçla, 80/100 penetrasyon sınıfı bağlayıcıya ağırlıkça %3, %5, %7 ve %9 oranlarında eriyik bir karıştırma tekniği ile hazırlanmış olan geopolimer katkısı ilave edilmiştir. Geopolimer modifiye bağlayıcının mekanik özelliklerinin incelenmesinde, darbe ve sertlik testleri kullanılmıştır. Sonuçlar, geopolimer katkılı bağlayıcının, saf bağlayıcıya kıyasla mukavemetini ve sertliğini sırasıyla %108 ve %82'ye kadar artırdığını göstermiştir. Çalışmada ayrıca, geopolimer için optimum oranın %5 olduğu belirtilmiştir [213].

Yaro ve arkadaşları (2021) çalışmalarında, hurma yağı klinkeri tozu esaslı geopolimer modifiye edicinin (POCP-GM) asfaltın geleneksel özellikleri ve sıcak karışımın Marshall stabilitesine etkisini belirlemeyi amaçlamıştır. Çalışmada, geopolimer malzemeyi üretmek için POCP, alkali etkinleştiriciler, sodyum hidroksit (NaOH) paletleri ve sodyum silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_2$ ) ile birlikte karıştırılmıştır. Elde edilen geopolimere ait görüntü Şekil 3.39'da verilmiştir.



Şekil 3.39 : Üretilen geopolimer ve geopolimer tozu.

POCP-GM bağlayıcısı (POCP-GM), asfalta ağırlıkça %2, %4, %6 ve %8 oranlarında karıştırılmıştır. Test sonuçlarına göre, POCP-GM'nin bağlayıcıya eklenmesiyle bağlayıcıların iyi bir depolama stabilitesi ve uyumluluğu ile bağlayıcıların penetrasyon değerlerinde azalma ve yumuşama noktası değerlerinde önemli artışlar meydana gelmiştir. Bu sonuç, POCP-GM bağlayıcısının daha sert bir karışım olduğunu göstermiştir. Marshall sonuçlarına göre ise, POCP-GM bağlayıcılı karışımların kontrol karışımına göre daha yüksek bir stabiliteye sahip olduğu (Şekil 3.40) ve belirlenen boşluk değerlerinin öngörülen standartlar içinde kaldığı görülmüştür. Sonuç olarak, asfalt bağlayıcıların POCP-GM ile modifikasyonunun hem bağlayıcı hem de asfalt karışımlarının özelliklerini iyileştirdiği, optimum oranın %6 POCP-GM olduğu belirtilmiştir [214].



Şekil 3.40 : Stabilite ve akma sonuçları.

Saride ve arkadaşları (2016), çalışmalarında RAP, işlenmemiş agrega (VA) ve uçucu kül (FA) karışımında aktivatör kullanarak asfalt kaplama malzemelerinin mikro-mekanik etkileşimini belirlemeye çalışmışlardır. Bunu belirleyebilmek için RAP ve uçucu külün kimyasal olarak ve mikro düzeyde birbirleriyle nasıl etkileşime girdiğini analiz etmiş ve bunun mukavemet üzerindeki etkileri belirlenmeye çalışılmıştır. Çalışma sonucunda, FA'nın NaOH ile aktive edilmesiyle, mukavemetin önemli ölçüde arttığını, elde ettikleri malzemenin temel tabakasında kullanılabileceğini ayrıca daha yüksek NaOH dozlarında daha yüksek mukavemet elde edilebileceğini belirtmişlerdir [215].

Sonuç olarak, geopolimerin asfalt bağlayıcılarda ve sıcak karışımlarda kullanımının ulusal literatürde hiç yer almadığı, uluslararası literatürde ise oldukça yeni ve sınırlı olduğu görülmektedir. Yapılan bu çalışmalarda genellikle geopolimer malzemeler tıpkı beton ve zemin iyileştirme çalışmalarında olduğu gibi prosedürlere (alkali çözeltisi hazırlama, kütleme vs.) tabi tutulmuş ve uygulanan testlerin oldukça kısıtlı olduğu görülmektedir. Bu tez çalışmasında ise, gerçekleştirilen kısıtlı çalışmalardan farklı olarak, geopolimer sentezi asfalt bağlayıcı içerisinde gerçekleştirilmeye çalışılmış ve elde edilen geopolimer katkılı bağlayıcılar bir dizi fiziksel (yumuşama noktası, penetrasyon, düktilite, özgül ağırlık, parlama noktası, TFOT ve depolama stabilitesi), reolojik (RTFOT, PAV, RV, DSR, BBR, LAS ve MSCR) ve kimyasal (SEM, XRD, FT-IR ve Elementel analiz) testlere tabi tutulmuştur. Bununla birlikte, Marshall karışım tasarım yöntemine esas alınarak, geopolimer katkılı bağlayıcılar ile belirli bir gradasyona sahip agregalar kullanılarak sıcak karışım numuneleri hazırlanmış ve bu numuneler üzerinde de çeşitli performans testleri (Marshall stabilite, RMS, ITS, Modifiye Lottman, ITSM, dinamik ve statik sünme, dolaylı çekme yorulma testi) gerçekleştirilmiştir.

## 4. MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada, çöp atıklarının yakılması sonucu elde edilen küllerin, bir alkali aktivatör (AA) ile birlikte asfalt içerisinde doğrudan ilave edilmesiyle elde edilen geopolimer katkılı bağlayıcı ve sıcak karışım asfaltların (HMA) geleneksel, reolojik, kimyasal ve mekanik özellikleri araştırılarak yol mühendisliğinde kullanılabilirliği değerlendirilmiştir. Bu amaçla, öncelikle saf bağlayıcı ve çöp atığı küllerinin karakteristik, Marshall karışımında kullanılacak agreganın ise fiziksel özellikleri tespit edilmiştir. Daha sonra, karışıma eklenecek kül (bağlayıcı ağırlığının % 1.25, %2.5, %5 ve %7.5'i) ve AA (kül ağırlığının %45'i) oranı tespit edilerek geopolimer modifiyeli bağlayıcılar hazırlanmıştır. Saf ve geopolimer modifiyeli bağlayıcıların geleneksel özellikleri yumuşama noktası, penetrasyon, duktilite, parlama noktası, özgül ağırlık, ince film etüvü (TFO) ve depolama stabilitesi gibi fiziksel testlerle, reolojik özellikleri dönel ince film etüvü (RTFO), basınçlı yaşlandırma kabı (PAV), dönel viskozimetre (RV), dinamik kayma reometresi (DSR), lineer yükleme genlikleri (LAS), çoklu gerilmeli sünme geri dönme (MSCR) ve kiriş eğme reometresi (BBR) deneyleri ile belirlenmiştir. Ayrıca, çöp atığı külleri ve AA'nın asfaltın kimyasal özellikleri üzerindeki etkisini belirleyebilmek amacıyla tüm malzemeler ve hazırlanan modifiye bağlayıcılar taramalı elektron mikroskobu (SEM), X-ışını difraksiyonu (XRD), Floresan dönüşümlü kızılötesi spektrumu (FT-IR) ve element analizi (C,H,N,S) testlerine tabi tutulmuştur. Geopolimer katkılı bağlayıcıların HMA'ların performans özellikleri üzerindeki etkilerini belirlemek için ise katkısız (saf) ve geopolimer modifiye bağlayıcılar kullanılarak, Marshall tasarım yöntemine göre sıcak karışım asfalt (HMA) numuneleri hazırlanmıştır. Bu karışım numuneleri üzerinde Marshall stabilite ve akma, kalıcı Marshall stabilitesi (RMS), dolaylı çekme mukavemeti (ITS), Modifiye Lottman, dolaylı çekme rijitlik modülü (ITSM), statik ve dinamik sünme ve dolaylı çekme yorulma deneyleri uygulanmıştır.

### 4.1 Materyal

#### 4.1.1 Asfalt bağlayıcı

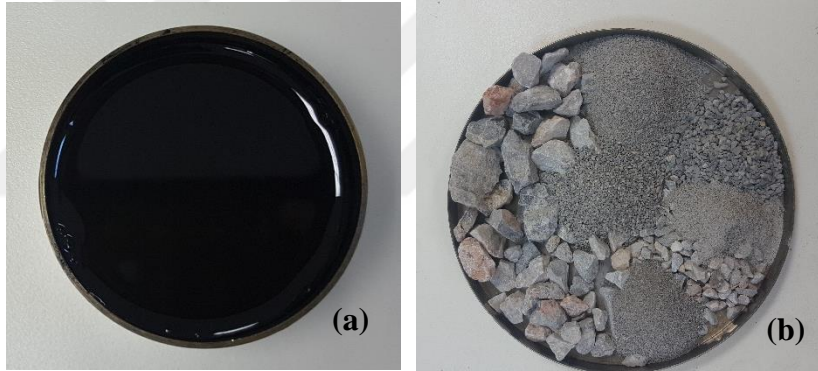
Bu çalışmada, penetrasyon sınıfı B 160/220 olan asfalt bağlayıcısı kullanılmıştır. Saf bağlayıcı (Şekil 4.1a), Malatya Karayolları Şube Müdürlüğü asfalt şantiyesinden temin edilmiştir. Asfaltın fiziksel özellikleri Çizelge 4.1'de verilmiştir.

**Çizelge 4.1 : Asfaltın özellikleri.**

Deney	Standart	Limit	Sonuç
Penetrasyon (0.1mm)	EN 1426	160-220	175.4
Yumuşama noktası (°C)	EN 1427	35-43	41.60
Düktilite (cm)	TS 119	Min. 100	135
Parlama noktası (°C)	EN 22719	Min. 230	245
Yanma noktası (°C)	-	-	258
Özgül ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> )	TS 1087	1.0 – 1.1	1.035

#### 4.1.2 Agregası

Marshall karışımında kullanılmak üzere Malatya Karayolları Şube Müdürlüğüne ait malzeme ocağından temin edilen kırmataş kalker agregası kullanılmıştır (Şekil 4.1b). Bu agreganın fiziksel özellikleri Çizelge 4.2’de, gradasyonu Çizelge 4.3’de, gradasyon eğrisi ise Şekil 4.2’de verilmiştir.



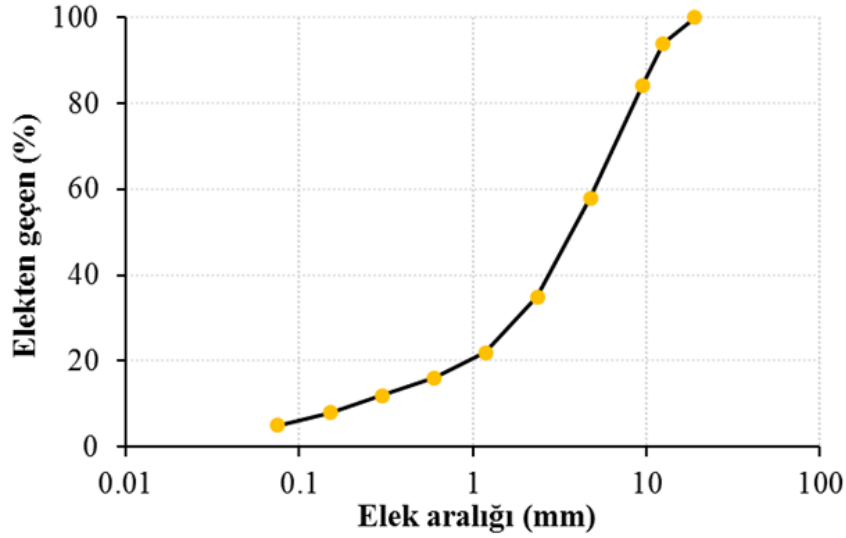
**Şekil 4.1 : (a) Saf asfalt (b) agregası.**

**Çizelge 4.2 : Agreganın fiziksel özellikleri.**

Deney	Standart	Limit	Değer
Kaba agregası zahiri özgül ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> )		-	2.76
Kaba agregası hacim özgül ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> )	ASTM C 127	-	2.68
Kaba agregası su emme yüzdesi		Maks.2	0.98
İnce agregası zahiri özgül ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> )		-	2.83
İnce agregası hacim özgül ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> )	ASTM C 128	-	2.64
İnce agregası su emme yüzdesi		Maks.2	1.49
Filler zahiri özgül ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> )	ASTM D 854	-	2.68
Aşınma Kaybı (Los Angeles) (%)	ASTM C131	Maks.30	26
Donma Kaybı (MgSO <sub>4</sub> ) (%)	ASTM C88	Maks.10	6
Yassı ve uzun parçalar (%)	ASTM D 4791	Maks.10	6

**Çizelge 4.3 : Agrega gradasyonu.**

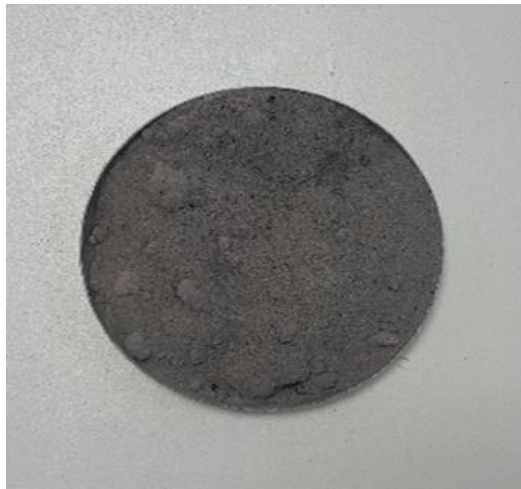
Elek Boyutu (mm)	19	12.5	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
	3/4	1/2	3/8	#4	#8	#16	#30	#50	#100	#200
Geçen (%)	100	94	84	58	35	22	16	12	8	5



**Şekil 4.2 : Agrega gradasyon eğrisi.**

#### 4.1.3 Çöp atığı külü (ÇAK)

Çalışmada, geopolimer modifiyeli asfalt üretiminde katkı malzemesi olarak kullanılan çöp atığı külü (Şekil 4.3) Malatya Büyükşehir Belediyesi Katı Atık Entegre Tesisi'nden temin edilmiştir. Elde edilen külün genel özellikleri Çizelge 4.4'de, element analizi sonuçları Çizelge 4.5'de, XRF sonuçları ise Çizelge 4.6'da verilmiştir.



**Şekil 4.3 : Çöp atıklarından elde edilen küller.**

**Çizelge 4.4 : Çöp atığı küllerinin özellikleri.**

Özellik	ÇAK
Özgül ağırlık (gr/mol)	1.34
Parlama noktası	Parlamaz
Renk	Gri
pH	12
Boyut	Pudra

**Çizelge 4.5 : Element analizi sonuçları.**

İçerik	%
C	3.414
H	0.504
N	-
S	2.140

**Çizelge 4.6 : XRF analizi sonuçları.**

İçerik	%
CaO	31.55
SiO <sub>2</sub>	18.40
Cl	6.57
K <sub>2</sub> O	5.52
SO <sub>3</sub>	3.69
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.89
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.46
TiO <sub>2</sub>	1.19
MgO	1.19
CO <sub>2</sub>	23.37
Diğer bileşikler	3.17

#### **4.1.4 Alkali aktivatör (AA)**

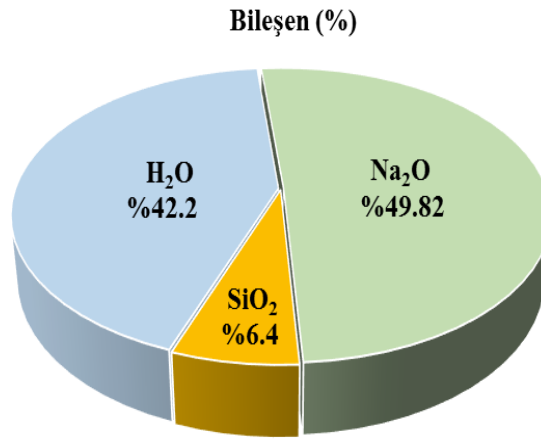
Çalışmada, geopolimer modifiyeli asfatlar hazırlanırken, ÇAK katkılı bağlayıcılara alkali aktivatör olarak sodyum silikat (cam suyu) eklenerek bağlayıcılar hazırlanmıştır. Kullanılan sodyum silikat'ın (Şekil 4.4) fiziksel özellikleri Çizelge 4.7'de, bileşenleri ise Şekil 4.5'de verilmiştir.



Şekil 4.4 : Sodyum silikat.

Çizelge 4.7 : Sodyum silikatın özellikleri.

Özellik	Sodyum silikat
Molekül formülü	$\text{Na}_2\text{SiO}_3$
Molekül ağırlığı (g/mol)	182.18
Renk	Beyaz
pH	11.00– 12.65
Yoğunluk ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	1.36 – 1.44



Şekil 4.5 : Sodyum silikatın bileşenleri.

## 4.2 Metot

### 4.2.1 Geopolimer modifiyeli bağlayıcıların hazırlanması

Çalışmada, geopolimer modifiyeli asfaltlar elde etmek amacıyla ilk olarak saf bağlayıcı 150 °C sıcaklığa kadar ısıtılmıştır. Akıcı hale gelen bağlayıcıya, ağırlıkça %1.25,

%2.5, %5 ve %7.5 oranlarında ÇAK ilave edilerek 1100 rpm hızında 60 dakika boyunca karıştırma işlemi yapılmış ve ilk olarak kül katkılı karışım numuneleri elde edilmiştir. Daha sonra bu karışımın içerisine kül ağırlığının %45'i oranında sodyum silikat (AA) eklenerek yine 1100 rpm hızında 30 dakika boyunca aynı sıcaklıkta karıştırma işlemi devam ettirilmiş ve böylece geopolimer modifiyeli asfaltlar elde edilmiştir. Belirlenen kül ve AA oranları ile karıştırma hızı ve süresi, laboratuvarında yapılan ön çalışmalar neticesinde belirlenmiştir. Çalışmada, tüm geopolimer modifiyeli asfaltlar için aynı işlem sırası takip edilmiştir.

Bu çalışmada, modifiye asfaltların hazırlanmasında kullanılan karıştırma cihazı ve hazırlanmış olan modifiye asfaltlar Şekil 4.6'da verilmiştir.



Şekil 4.6 : (a) Karıştırma cihazı (b) modifiye bitümlerin bir kısmı.

Bu çalışmada saf, kül ve geopolimer katkılı modifiye bağlayıcılar Çizelge 4.8'de gösterildiği gibi kodlanmıştır.

Çizelge 4.8 : Bağlayıcıların adlandırılması.

Bağlayıcı türü	Kodlama
B 160/220	S
B 160/220 + %1.25 ÇAK	K 1.25
B 160/220 + %2.5 ÇAK	K 2.5
B 160/220 + %5 ÇAK	K 5
B 160/220 + %7.5 ÇAK	K 7.5
B 160/220 + %1.25 ÇAK + %45 AA	G 1.25
B 160/220 + %2.5 ÇAK + %45 AA	G 2.5
B 160/220 + %5 ÇAK + %45 AA	G 5
B 160/220 + %7.5 ÇAK + %45 AA	G 7.5

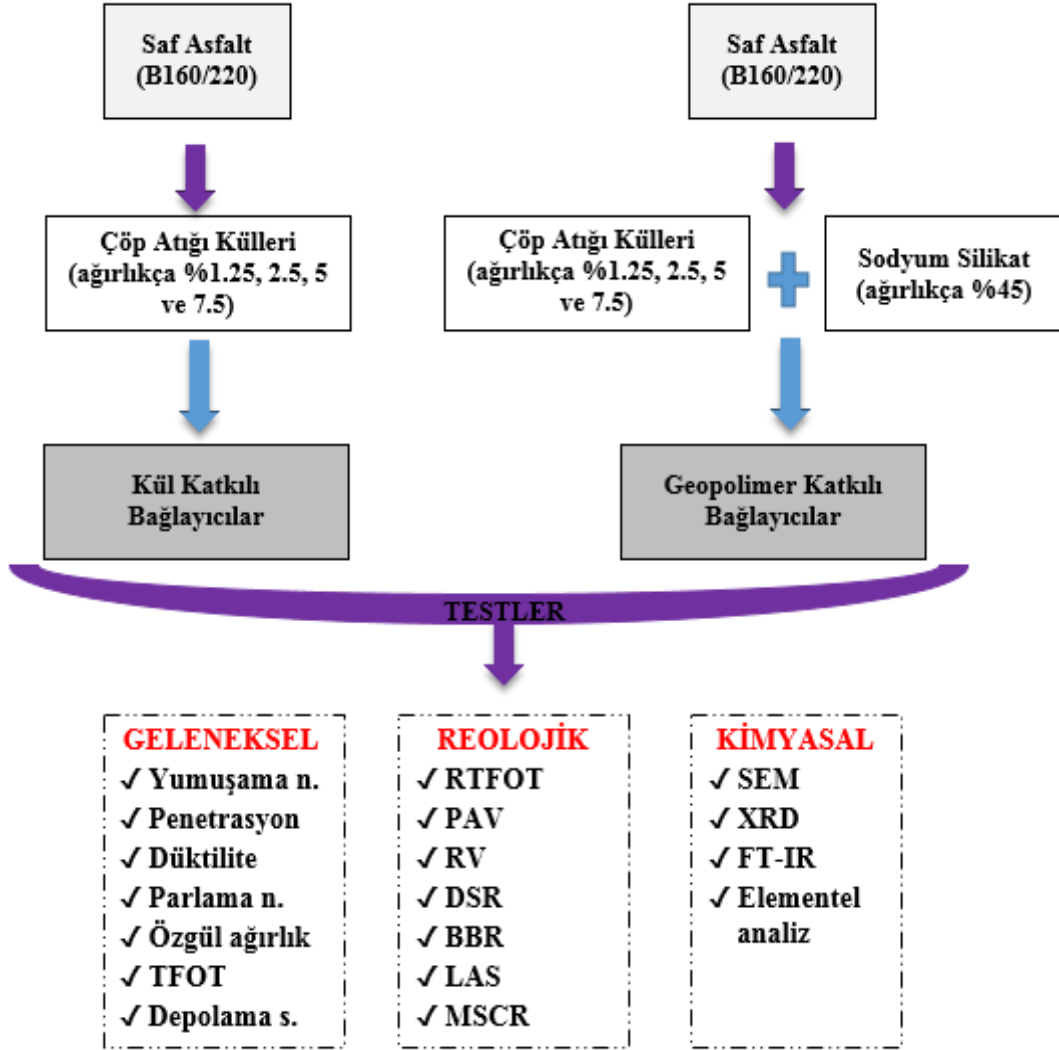
#### 4.2.2 Geopolimer katkılı sıcak karışım asfaltların hazırlanması

Çalışmada hazırlanan saf, kül ve geopolimer katkılı bağlayıcılar ile Marshall tasarım yöntemi esas alınarak sıcak karışım asfalt (HMA) numuneleri hazırlanmıştır. HMA numuneleri hazırlanırken, ASTM D 1559 standardı esas alınmıştır. Bu standarda göre, ilk olarak, saf bağlayıcı kullanılarak hazırlanan sıcak karışımlarda optimum asfalt içeriği (oai) belirlenmiştir. Daha sonra, oai esas alınarak saf, kül ve geopolimer katkılı bağlayıcılar ile HMA numuneleri hazırlanmıştır. Saf, kül ve geopolimer katkılı HMA numuneleri hazırlanırken agrega 1200 gr alınmış ve her bağlayıcıya ait karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları esas alınarak briket numuneleri elde edilmiştir. HMA numuneleri, 457 mm yükseklikten serbest bırakılan bir tokmak yardımı ile numunenin alt yüzeyine 75, toplamda ise 150 vuruş yapılarak hazırlanmıştır.

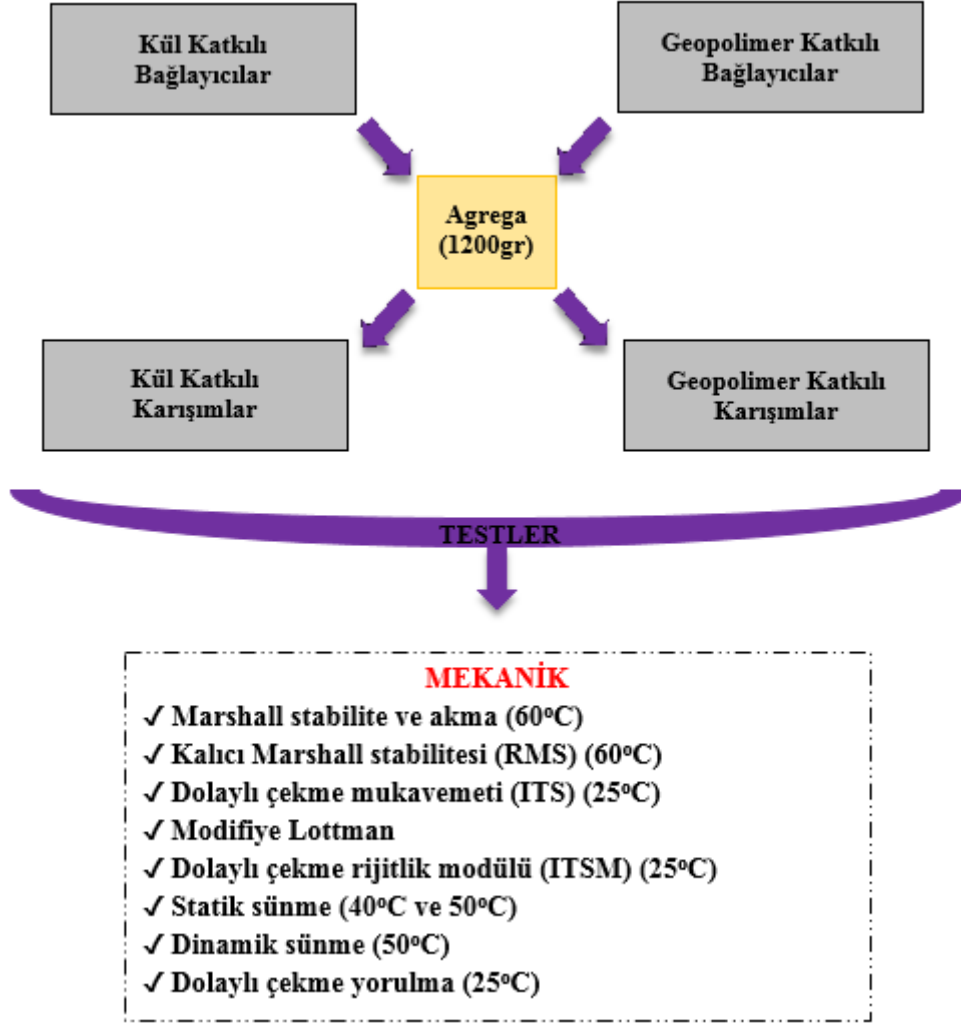
Bu çalışmada saf, kül ve geopolimer katkılı HMA numuneleri de Çizelge 4.9'daki gibi kodlanmıştır. Bununla birlikte, çalışmada bağlayıcılara uygulanan deneysel prosedür Şekil 4.7'de, karışımlara uygulanan prosedür ise Şekil 4.8'de gösterilen akış şeması takip edilerek tamamlanmıştır.

**Çizelge 4.9 : Karışım numunelerinin adlandırılması.**

Karışım türü	Kodlama
B 160/220 + Agrega	S
B 160/220 + %1.25 ÇAK + Agrega	K 1.25
B 160/220 + %2.5 ÇAK + Agrega	K 2.5
B 160/220 + %5 ÇAK + Agrega	K 5
B 160/220 + %7.5 ÇAK + Agrega	K 7.5
B 160/220 + %1.25 ÇAK + %45 AA + Agrega	G 1.25
B 160/220 + %2.5 ÇAK + %45 AA + Agrega	G 2.5
B 160/220 + %5 ÇAK + %45 AA + Agrega	G 5
B 160/220 + %7.5 ÇAK + %45 AA + Agrega	G 7.5



Şekil 4.7 : Bağlayıcılar için akış şeması.



Şekil 4.8 : Karışımlar için akış şeması.

## 5. DENEYSEL BULGULAR

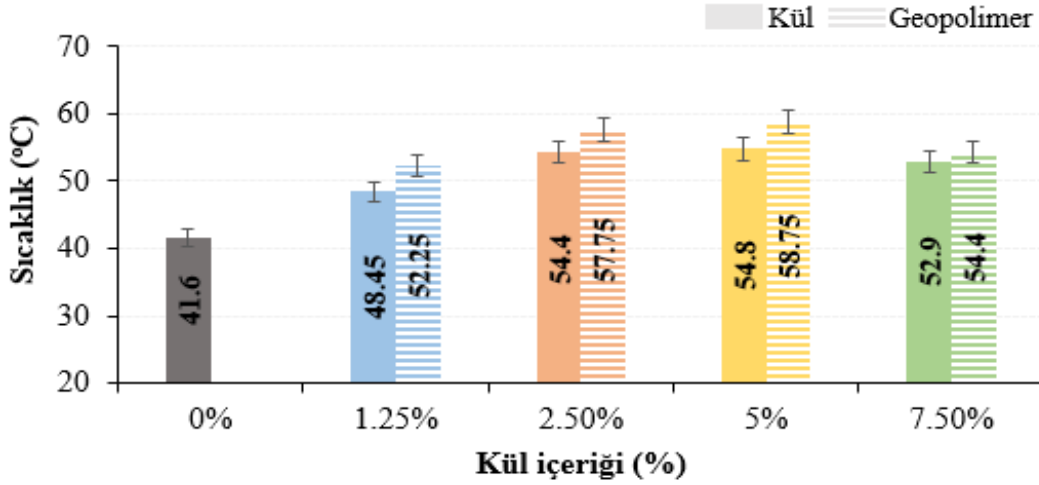
Bu çalışmada, saf, kül ve geopolimer katkılı bağlayıcı numunelerinin geleneksel özellikleri yumuşama noktası, penetrasyon, duktilite, parlama noktası ve özgül ağırlık testleri ile, bağlayıcıların faz yapısı depolama stabilitesi testi ile, kısa ve uzun dönem yaşlanma özellikleri TFO, RTFO ve PAV testleri ile, reolojik özellikleri RV, DSR, BBR, LAS ve MSCR testleri ile, bağlayıcıların mikroyapısal özellikleri ise SEM, XRD, FT-IR ve elementel analiz testleri ile belirlenmiştir. Bununla birlikte, saf, kül ve geopolimer modifiyeli sıcak karışım numunelerinin mekanik özellikleri ise Marshall stabilite ve akma, RMS, ITS ve Modifiye Lottman, ITSM, statik ve dinamik sünme ve yorulma testleri ile belirlenmeye çalışılmıştır.

### 5.1 Bağlayıcıların Geleneksel Test Sonuçları

Saf, kül ve geopolimer modifiyeli asfaltların geleneksel özellikleri yumuşama noktası (ASTM D36), penetrasyon (ASTM D5), duktilite (ASTM D113), parlama noktası (ASTM D92) ve özgül ağırlık (ASTM D70) gibi fiziksel testlerle belirlenmiştir. Tüm bağlayıcıların test sonuçları Çizelge 5.1’de, katkı oranına bağlı olarak bağlayıcılarda meydana gelen fiziksel değişimler ise sırasıyla Şekil 5.1- Şekil 5.5’de verilmiştir.

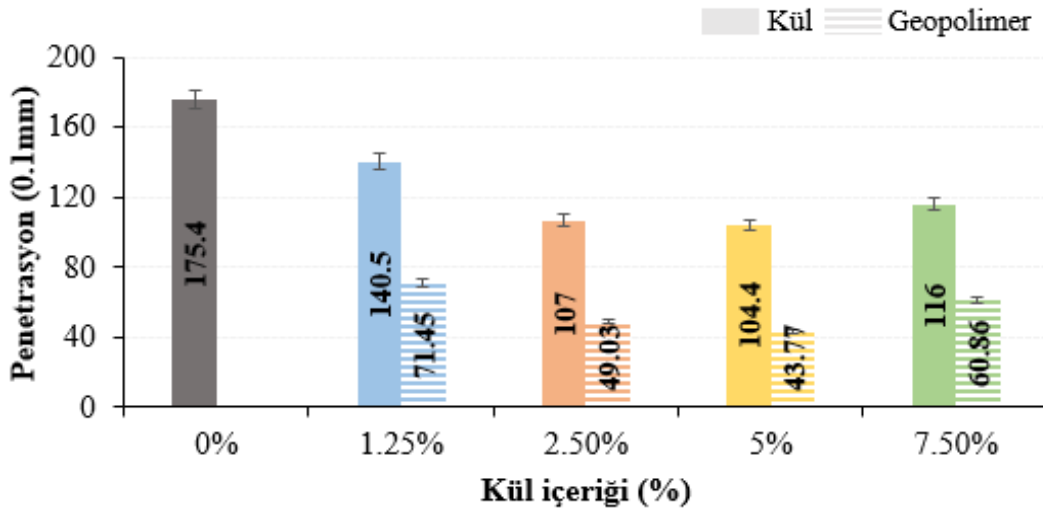
**Çizelge 5.1 : Geleneksel test sonuçları.**

Bağlayıcı türü	Yumuşama noktası (°C)	Penetrasyon (0.1 mm)	Duktilite (cm)	Parlama noktası (°C)	Özgül ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> )
S	41.60	175.4	135	245	1.035
K 1.25	48.45	140.5	128	246	1.036
K 2.5	54.40	107.0	122	248	1.037
K 5	54.80	104.4	119	249	1.037
K 7.5	52.90	116.0	126	252	1.038
G 1.25	52.25	71.45	116	254	1.037
G 2.5	57.75	49.03	104	258	1.039
G 5	58.75	43.77	103	261	1.041
G 7.5	54.40	60.86	112	256	1.040



**Şekil 5.1 :** Bağlayıcıların yumuşama noktası değerleri.

Şekil 5.1’de görüldüğü gibi, saf asfalta (S) ilk olarak kül eklenmesiyle (K %1.25, %2.5, %5 ve %7.5) elde edilen modifiye bağlayıcıların yumuşama noktası değerleri saf asfalta kıyasla sırasıyla %16.5, %30.8, %31.7 ve %27.2 artış göstermiştir. Bununla birlikte, yine saf asfalta kül+AA (geopolimer) eklenmesiyle elde edilen bağlayıcıların (G %1.25, %2.5, %5 ve %7.5) yumuşama değerleri ise yine sırasıyla %25.6, %38.8, %41.2 ve %30.8 artış göstermiştir. Bu durum, geopolimer ilaveli bağlayıcıların hem saf hem de kül katkılı bağlayıcılara göre çok daha sert kıvamda olduğunu, bu sebeple de yumuşama noktası değerlerinin arttığını göstermektedir.

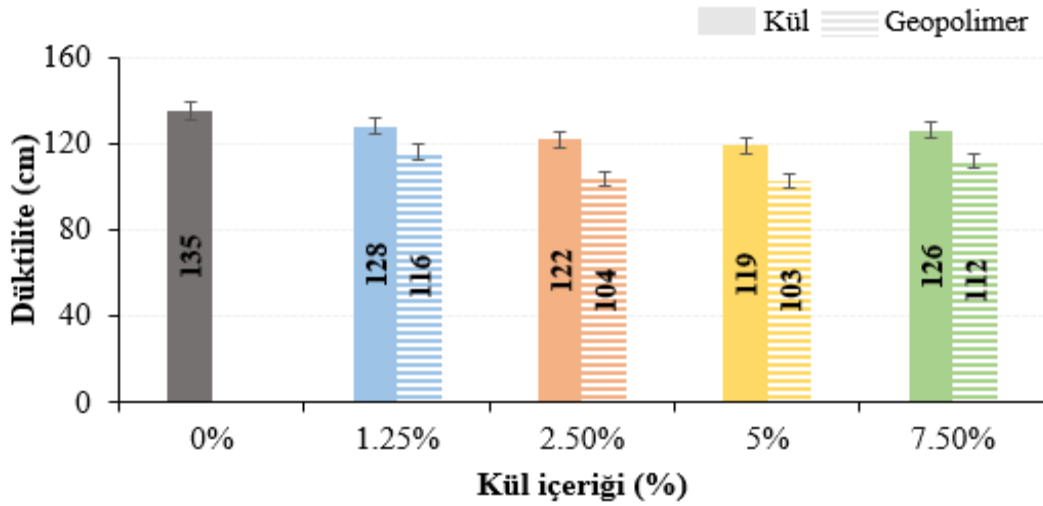


**Şekil 5.2:** Bağlayıcıların penetrasyon değerleri.

Şekil 5.2’de görüldüğü gibi, saf asfalta sadece kül eklenmesiyle penetrasyon değerlerinde sırasıyla %19.9, %39, %41 ve %34 oranlarında, kül+AA (geopolimer)

eklenmesiyle ise yine sırasıyla %59, %72, %75 ve %65.3 oranlarında azalma meydana gelmiş ve en kritik değişim %2.5-%5 aralığında oluşmuştur. Bu sonuçlara göre, penetrasyon sınıfı B 160/220 olan saf asfalta kül ilave edilmesiyle penetrasyon sınıfının tüm oranlarda B 100/150 olarak değiştiği görülmüştür. Bununla birlikte, geopolimer katkıli bağlayıcıların ise sırasıyla B 70/100, B 40/60, B 40/60 ve B 50/70 sınıflarına dönüşerek daha da sert bir kıvama geldikleri görülmektedir. Bu durumda, geopolimer ilavesiyle bağlayıcının daha sert kıvamlı bir bağlayıcıya dönüştüğünü ve geopolimer katkıli bağlayıcıların çok daha sıcak iklimli bölgelerde kullanılabilceğini söylemek mümkündür.

Yumuşama noktası ve penetrasyon sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, geopolimerle modifiye edilmiş bağlayıcıların daha sert olmaları sebebiyle kalıcı deformasyonlara karşı daha dirençli olacağı ifade edilebilir. Çünkü, bağlayıcıdaki geopolimerizasyon yani kül+AA+asfalt kimyasal reaksiyonu sonucunda oluşan yeni yapının ya da bağlayıcının daha katı bir kıvama geldiği değerlendirilmektedir. Benzer bir çalışmada [205], geopolimer katkıli bağlayıcıların üç boyutlu (3D) ağ yapısına sahip olması sebebiyle modifiye bağlayıcıların sertleşerek yüksek sıcaklıklara karşı direncinin arttığı ve yüksek dayanıma sahip oldukları belirtilmiştir.

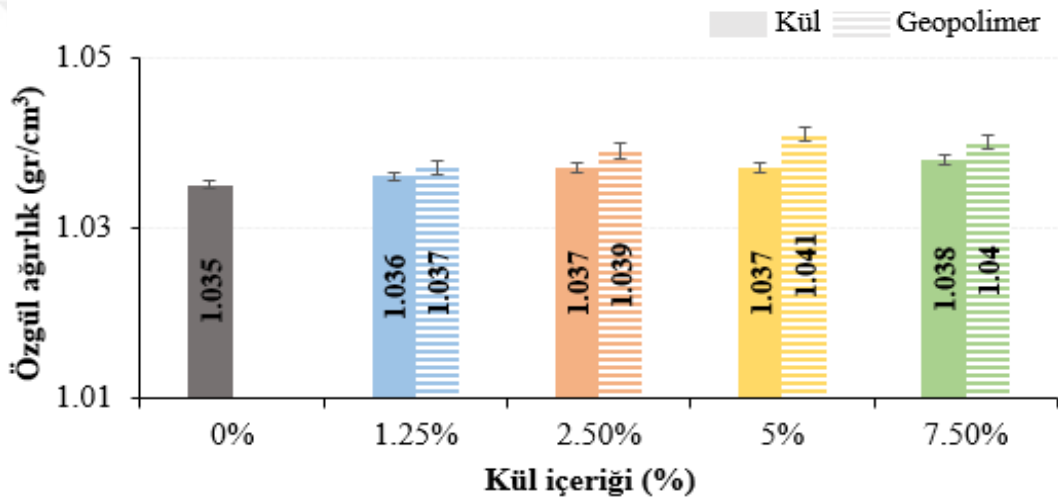


Şekil 5.3 : Bağlayıcıların düktilite değerleri.

Şekil 5.3 incelendiğinde, sadece kül katkısıyla bağlayıcıların düktilite değerleri saf asfalta göre sırasıyla %5.2, %9.6, %11.9 ve %7 oranlarında, geopolimer katkıli bağlayıcıların ise yine saf asfalta göre sırasıyla %14.1, %23, %23.7 ve %17 oranlarında azalmıştır. Bu sonuçlara göre saf asfalta kıyasla hem kül hem de geopolimer katkıli bağlayıcıların düktilite değerlerinde azalma meydana geldiği, dolayısıyla her iki katkıyla

hazırlanan bağlayıcıların uzama yeteneğinin veya kohezyonunun azaldığı görülmektedir. Ancak, geopolimer katkıli bağlayıcıların düktilite değerindeki azalma diğer bağlayıcılara kıyasla daha fazla olmuş ve bu durum geopolimer katkısıyla bağlayıcının daha da sertleştiğini göstermektedir. Geopolimerle yapılan çalışmada [205] bunun nedeninin, geopolimerin daha kırılğan ve bozulmaya neden olan yüksek ara yüzey bağlanma kuvvetiyle meydana geldiği şeklinde değerlendirilmektedir.

Bununla birlikte, KTŞ'ye göre B 160/220 bağlayıcısının düktilite değerinin 100 cm'den büyük olması istenmektedir. Elde edilen sonuçlar KTŞ'ye göre değerlendirildiğinde, saf ve her iki katkı ile hazırlanan bağlayıcıların KTŞ limitleri içerisinde kaldığı görülmektedir. Bu sebeple, elde edilen sonuçlar olumsuz olarak değerlendirilmemektedir.

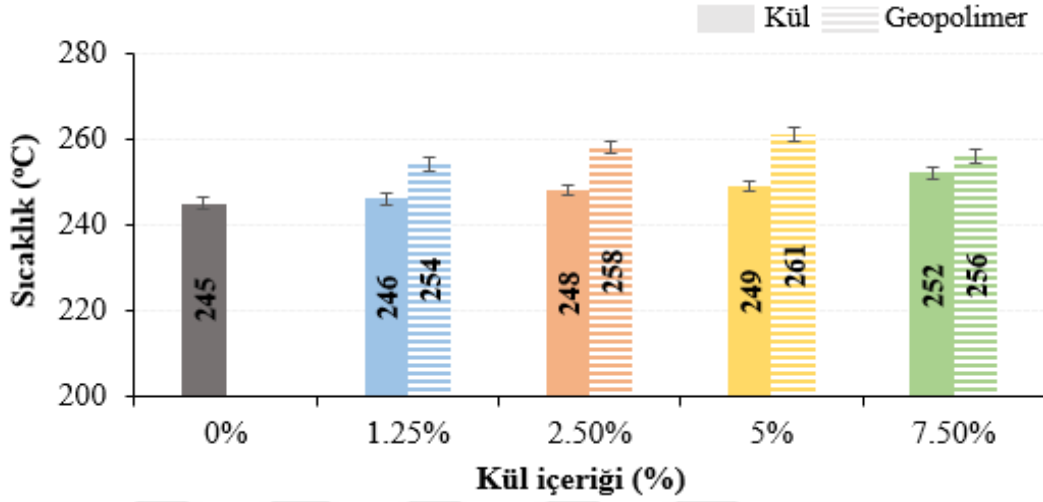


Şekil 5.4 : Bağlayıcıların özgül ağırlık değerlerindeki değişimler.

Şekil 5.4 incelendiğinde, hem kül hem de geopolimer katkı oranı artışıyla bağlayıcıların özgül ağırlıklarının saf bağlayıcıya kıyasla genel olarak artış gösterdiği görülmektedir. Ayrıca, geopolimer katkıli bağlayıcıların kül katkıli bağlayıcılara kıyasla özgül ağırlıklarının daha yüksek olduğu da görülmektedir. Bu beklenen bir sonuç olup, bu durumun karışımdaki kül ile AA'nın asfalta kıyasla özgül ağırlıklarının daha yüksek olmasından kaynaklandığı şeklinde değerlendirilmektedir.

Şekil 5.5 incelendiğinde, kül içeriği artışıyla hem kül hem de geopolimer katkıli bağlayıcıların parlama noktası değerlerinin giderek artış gösterdiği görülmektedir. Saf bağlayıcıya göre meydana gelen artışlar kül katkıli bağlayıcılar için sırasıyla %0.4, %1.2, %1.6 ve %2.9 oranlarında, geopolimer katkıli bağlayıcılar için ise %3.7, %5.3, %6.5 ve %4.5 oranlarındadır. Bununla birlikte, geopolimer katkıli bağlayıcıların kül katkıli bağlayıcılar

kıyasla daha yüksek parlama noktası değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Bunun sebebinin, geopolimer katkısıyla karışım içerisinde meydana gelen kül+AA+asfalt reaksiyonu sebebiyle oluşan yeni bağlayıcının sertliğinin artmasından dolayı yumuşama noktasının yükselmesinden kaynaklandığı değerlendirilmektedir.



**Şekil 5.5 :** Bağlayıcıların parlama noktası değerlerindeki değişimler.

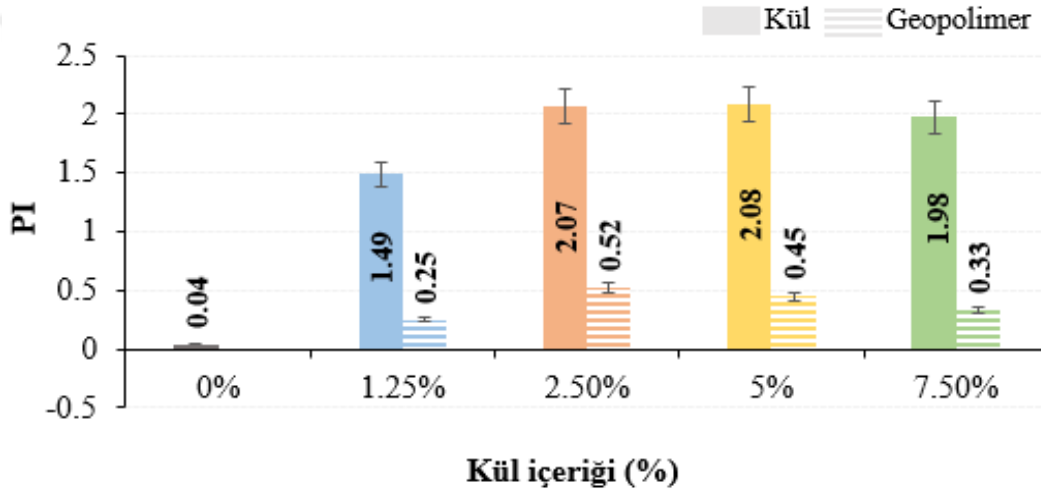
Çalışmada ayrıca, kül ve geopolimer ile modifiyeli bağlayıcıların sıcaklığa karşı hassasiyetleri de penetrasyon ve yumuşama noktası değerleri kullanılarak belirlenmiştir. Bağlayıcıların sıcaklık hassasiyetinin bir ölçüsü olarak bilinen penetrasyon indeksi (PI) değerleri Denklem (5.1) yardımıyla hesaplanmıştır [216].

$$PI = \frac{1952 - 500 \times \log(Pen_{25}) - 20 \times SP}{50 \times \log(Pen_{25}) - SP - 120} \quad (5.1)$$

Burada  $P_{25}$ , asfaltın 25°C'deki penetrasyonunu,  $SP$  ise yumuşama noktası değerini sembolize etmektedir. Hesaplama sonucu elde edilen PI değerinin -2'den küçük olması asfaltın ısıya karşı duyarlılığının fazla olduğunu, +2'den büyük olması ise ısıya duyarlılığının az olduğunu göstermektedir [216]. Denklem kullanılarak saf, kül ve geopolimer katkılı bağlayıcıların belirlenen PI değerleri Çizelge 5.2'de, katkı içeriğine göre PI'nın değişimi ise Şekil 5.6'da verilmiştir.

**Çizelge 5.2 : Bağlayıcıların PI değerleri.**

Bağlayıcı türü	Penetrasyon indeksi (PI)
S	0.04
K 1.25	1.49
K 2.5	2.07
K 5	2.08
K 7.5	1.98
G 1.25	0.25
G 2.5	0.52
G 5	0.45
G 7.5	0.33



**Şekil 5.6 : Bağlayıcıların PI değerleri**

Şekil 5.6 incelendiğinde, saf asfalta (S) sadece kül ilave edilmesiyle bağlayıcıların PI değerlerinin büyük oranda artış gösterdiği, kül+AA (geopolimer) ilavesiyle ise yine artışların meydana geldiği ancak kül katkılı bağlayıcılara kıyasla bu artışların daha az olduğu görülmektedir. PI'nın saf asfalta göre daha yüksek çıkması ve elde edilen bu değerlerin +2 değerine yaklaşmaya başlaması, külün bağlayıcının sıcaklık hassasiyeti üzerinde daha büyük bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, geopolimer katkılı asfaltın PI değerlerinin de saf asfalta kıyasla sırasıyla 6.25, 13.0, 11.25 ve 8.25 kat artış göstermiş olması geopolimerin bağlayıcıların sıcaklık hassasiyetlerini geliştirmede etkili olduğu görülmektedir.

## 5.2 Depolama Stabilitesi Test Sonuçları

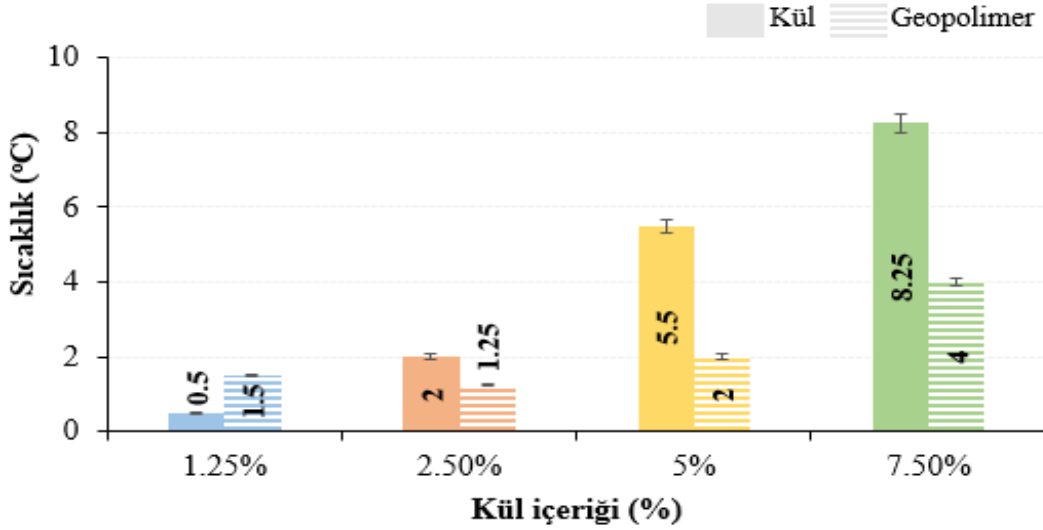
Çalışmada, kül ve geopolimer katkılı bağlayıcıların plentte depolanmasıyla bünyesinde meydana gelebilecek olan çökme, ayrışma vb. durumları tayin edebilmek amacıyla tüm bağlayıcılar TS EN 13399 standardına göre depolama stabilitesi deneyine tabi tutulmuştur. Bağlayıcılara ait yumuşama noktası ve penetrasyon farkları Çizelge 5.3 ve Çizelge 5.4’de, farkların kül içeriğine göre değişimi ise Şekil 5.7 ve Şekil 5.8’de verilmiştir.

**Çizelge 5.3 :** Depolama stabilitesi sonrası yumuşama noktası değerleri (°C).

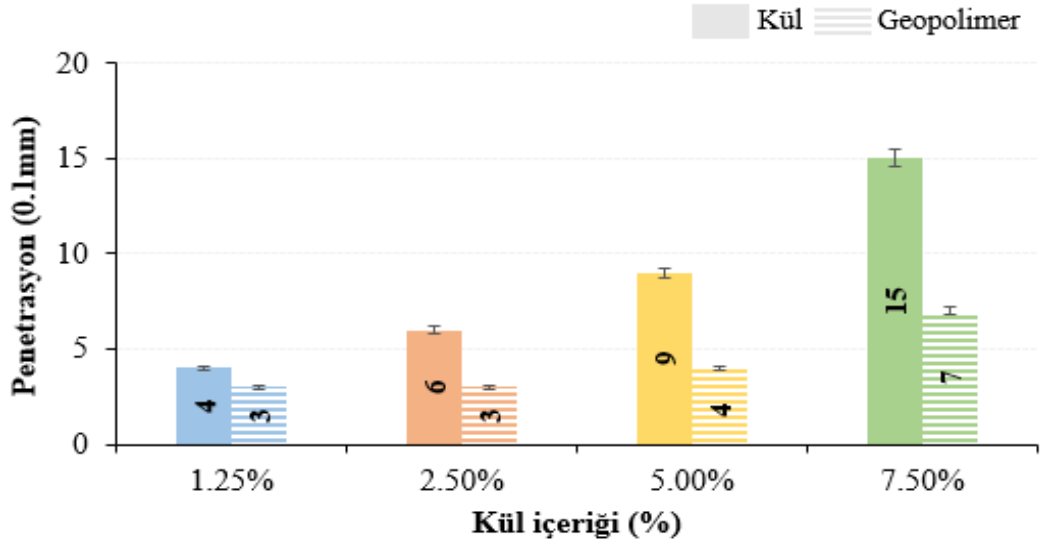
Bağlayıcı türü	Alt	Üst	Fark	Orijinal
K 1.25	48.85	49.35	0.50	48.45
K 2.5	56.25	58.25	2.00	54.40
K 5	57.25	62.75	5.50	54.80
K 7.5	60.50	68.75	8.25	52.90
G 1.25	52.75	54.25	1.50	52.25
G 2.5	58.50	59.75	1.25	57.75
G 5	60.80	62.80	2.00	58.75
G 7.5	59.75	63.75	4.00	54.40

**Çizelge 5.4 :** Depolama stabilitesi sonrası penetrasyon değerleri (0.1mm).

Bağlayıcı türü	Alt	Üst	Fark	Orijinal
K 1.25	130.3	126.3	4.0	140.5
K 2.5	96.20	90.20	6.0	107.0
K 5	96.10	87.10	9.0	104.4
K 7.5	101.8	86.80	15.0	116.0
G 1.25	66.50	63.50	3.0	71.45
G 2.5	43.25	40.25	3.0	49.03
G 5	38.10	34.10	4.0	43.77
G 7.5	54.67	47.67	7.0	60.86



Şekil 5.7 : Depolama stabilitesi sonrası yumuşama noktası farkındaki değişimler.



Şekil 5.8 : Depolama stabilitesi sonrası penetrasyon farkındaki değişimler.

Sonuçlar değerlendirildiğinde, kül katkıli bağlayıcıların katkı oranı artışı ile deney sonrası ayrışmadan dolayı oluşan yumuşama noktası farklarının geopolimer katkıli bağlayıcılara göre fazla olduğu görülmektedir. Bu sonuç, bazik yapıdaki kül katkısının asidik yapıdaki saf bağlayıcı kısmen kimyasal bir etkileşime girmesi ve belirli bir orandan sonra asfalt içerisinde karışmayıp yüksek sıcaklıklarda ayrışması sebebiyle meydana geldiği şeklinde değerlendirilmektedir. Bununla birlikte, yine kül katkıli bağlayıcıların penetrasyon farklarının da geopolimer katkıli bağlayıcılardan çok daha fazla olduğu görülmektedir. Bağlayıcı bünyesinde meydana gelen penetrasyon farkının fazla olması, bağlayıcının depolama stabilitesi açısından kararsız olduğunu göstermektedir [220]. Bu durumda, kül

katkılı bağlayıcıların yüksek oranlarda kullanımının (özellikle %5 ve %7.5 oranlarında) depolama stabilitesi bakımından kararsız olduğunu söylemek mümkündür.

Geopolimer katkıli bağlayıcıların yumuşama noktası farklılıkları değerlendirildiğinde, katkı oranı artışı ile fark değerinin arttığı, ancak şartname sınırı olan 5°C geçmediği görülmüştür. Ayrıca, penetrasyon farkının da yine katkı oranı artışı ile kısmen artış gösterdiği görülmüştür. Bu sonuç, geopolimer bağlayıcı üretimi esnasında asfalt+kül+AA'nın iyi bir şekilde kimyasal reaksiyona girmesi sebebiyle elde edilmiş ve bu sebeple geopolimer katkıli bağlayıcıların, kül katkıli bağlayıcılara göre depolama stabilitesi açısından kararlı olduğu şeklinde yorumlanmaktadır.

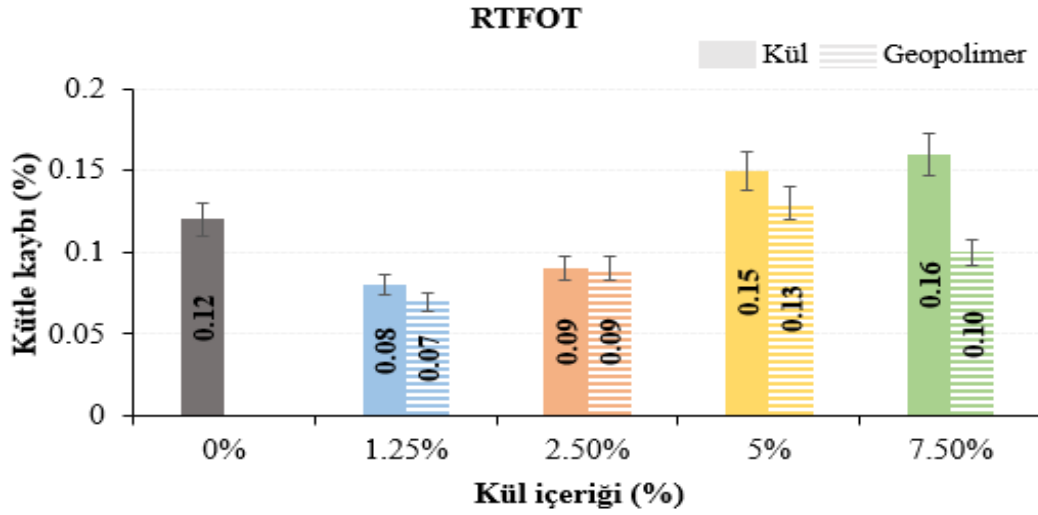
### 5.3 Bağlayıcıların Kısa ve Uzun Dönem Yaşlandırma Test Sonuçları

Saf, kül ve geopolimer modifiyeli bağlayıcıların kısa ve uzun süreli yaşlanmaya karşı direncini belirleyebilmek amacıyla tüm bağlayıcılar, önce dönel ince film etüvü (RTFO) ve ince film etüvü (TFO) deneylerine, daha sonra sadece RTFO kalıntısı bağlayıcılar basınçlı yaşlandırma kabı (PAV) deneyine tabi tutulmuştur. Kısa süreli yaşlandırma işlemine (TFO ve RTFO) tabi tutulan numunelerde meydana gelen kütle kayıpları belirlenmiştir. Bununla birlikte, kısa ve uzun süreli yaşlandırılmış tüm numuneler geleneksel testlere tabi tutularak fiziksel özellikleri belirlenmiştir. Ayrıca, yaşlandırılmış numunelerin bir kısmı da reolojik ve kimyasal deneylere tabi tutulmak amacıyla yedeklenmiştir.

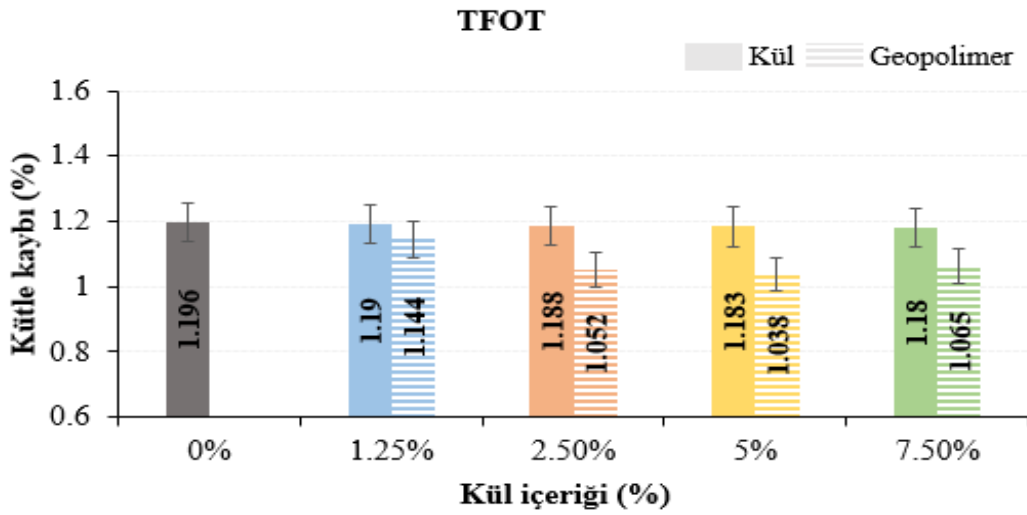
RTFO ve TFO deneyi sonrasında, bağlayıcıların bünyesinde gelen kütle kayıpları Çizelge 5.5'de, kütle kaybı değişimlerinin katkı oranına göre değişimleri ise Şekil 5.9 ve Şekil 5.10'da verilmiştir.

**Çizelge 5.5 :** Bağlayıcıların bünyesinde meydana gelen ortalama kütle kayıpları.

Bağlayıcı	RTFOT sonrası	TFOT sonrası
S	0.12	1.196
K 1.25	0.08	1.190
K 2.5	0.09	1.188
K 5	0.15	1.183
K 7.5	0.16	1.180
G 1.25	0.07	1.144
G 2.5	0.09	1.052
G 5	0.13	1.038
G 7.5	0.10	1.065



Şekil 5.9 : RTFOT sonrası bağlayıcıların bünyelerindeki kütle kayıpları.



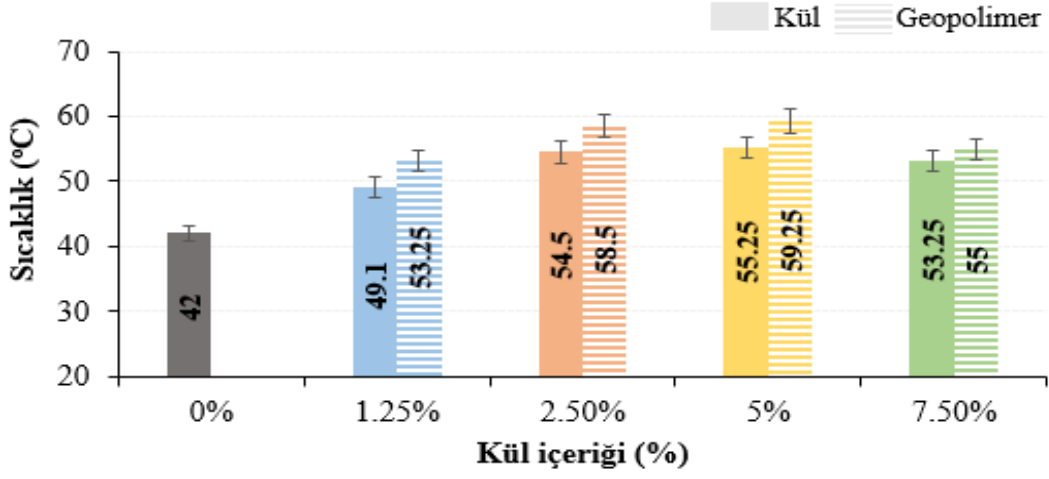
Şekil 5.10 : TFOT sonrası bağlayıcıların kütle kayıplarındaki değişim.

Çizelge 5.5 ve Şekil 5.9 incelendiğinde, saf asfalta (S) kül ve geopolimer eklenmesiyle bağlayıcıların RTFOT kütle kayıplarında kısmi azalma ve artışlar meydana gelmesine rağmen bu değerlerin KTS limitlerine göre kütle kayıpları %1.0 değerinin altında kaldığı görülmüştür. Dolayısıyla kül ve geopolimer katkılarının bağlayıcıların oksidasyon ve yaşlanma direnci üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olmadığı ifade edilebilir. Şekil 5.10 incelendiğinde, kül içeriği artışıyla hem kül hem de geopolimer katkılı bağlayıcıların TFOT sonrası kütle kaybının kısmen azaldığı, ancak geopolimer katkılı bağlayıcıların kütle kaybındaki azalmaların kısmen daha fazla olduğu görülmektedir. Bu durumun, geopolimer katkılı bağlayıcılardaki asfalt+kül+AA bileşiminde ısınma sebebiyle açığa çıkan uçucu madde kaybının daha fazla olması sebebiyle meydana geldiği değerlendirilmektedir.

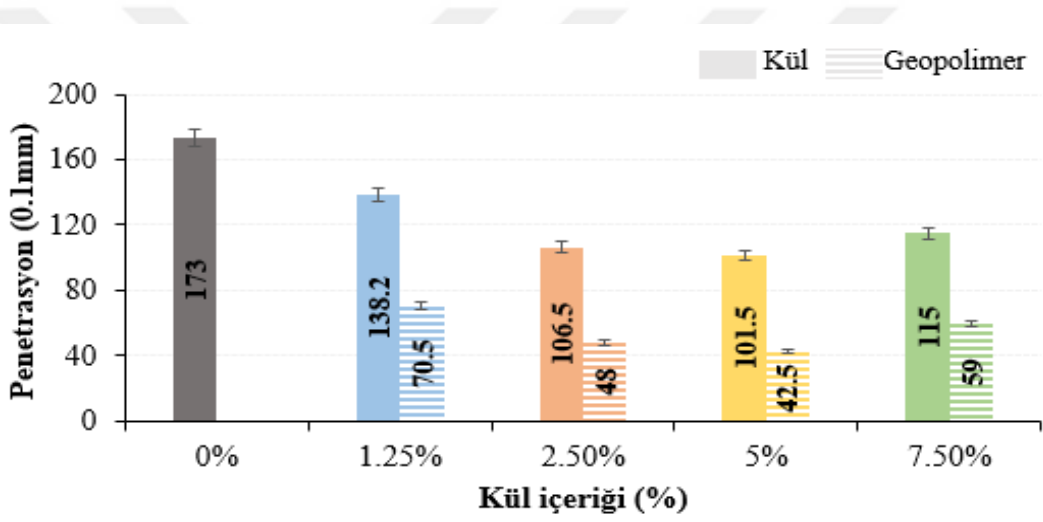
Ayrıca çalışmada, kısa ve uzun dönem yaşlandırılmış tüm bağlayıcıların (saf, kül ve geopolimer) kalıntıları üzerinde yaşlanma etkisinin bağlayıcıların fiziksel özellikleri üzerindeki etkisi, yumuşama noktası ve penetrasyon testleri ile, sıcaklık hassasiyetleri ise bu testlerden elde edilen sonuçlar ve Denklem (5.1) yardımı ile belirlenmiştir. Elde edilen tüm sonuçlar Çizelge 5.6’da, yaşlanma sonrası bağlayıcıların penetrasyon ve yumuşama noktası değerlerindeki değişim ise Şekil 5.11-Şekil 5.19’da verilmiştir.

**Çizelge 5.6 :** Kısa ve uzun dönem yaşlanan bağlayıcıların fiziksel test sonuçları.

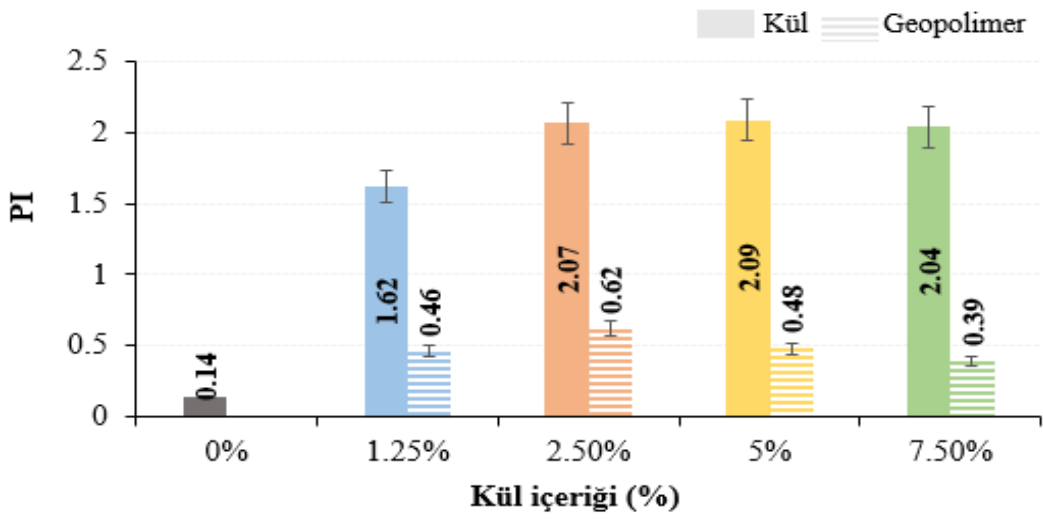
Bağlayıcı türü	Yaşlanma tipi	Yumuşama noktası (°C)	Penetrasyon (0.1mm)	PI
S	RTFOT	42.00	173.00	0.14
	TFOT	42.50	170.00	0.26
	PAV	44.55	161.22	0.79
K 1.25	RTFOT	49.10	138.20	1.62
	TFOT	49.25	137.30	1.63
	PAV	51.25	125.48	1.84
K 2.5	RTFOT	54.50	106.50	2.07
	TFOT	55.25	102.00	2.10
	PAV	56.40	95.57	2.15
K 5	RTFOT	55.25	101.50	2.09
	TFOT	55.75	99.60	2.14
	PAV	57.80	89.50	2.24
K 7.5	RTFOT	53.25	115.0	2.04
	TFOT	53.75	112.54	2.09
	PAV	55.75	102.26	2.23
G 1.25	RTFOT	53.25	70.50	0.46
	TFOT	54.00	67.50	0.52
	PAV	54.50	65.15	0.54
G 2.5	RTFOT	58.50	48.00	0.62
	TFOT	60.05	44.26	0.74
	PAV	59.75	42.27	0.57
G 5	RTFOT	59.25	42.50	0.48
	TFOT	61.50	40.68	0.82
	PAV	60.45	38.50	0.49
G 7.5	RTFOT	55.00	59.0	0.39
	TFOT	56.25	55.12	0.49
	PAV	57.10	50.24	0.44



Şekil 5.11 : RTFOT sonrası bağlayıcıların yumuşama noktası değişimleri.

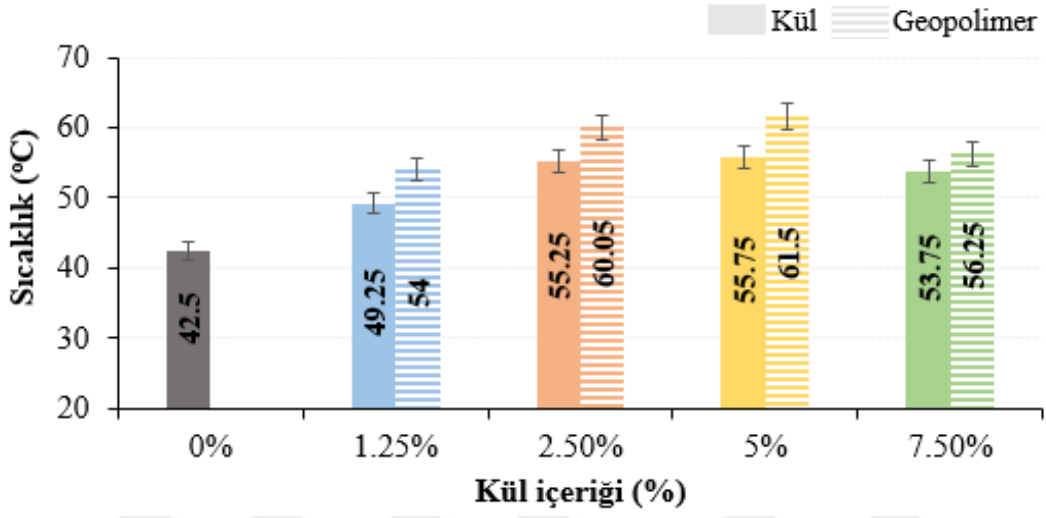


Şekil 5.12 : RTFOT sonrası bağlayıcıların penetrasyon değişimleri.

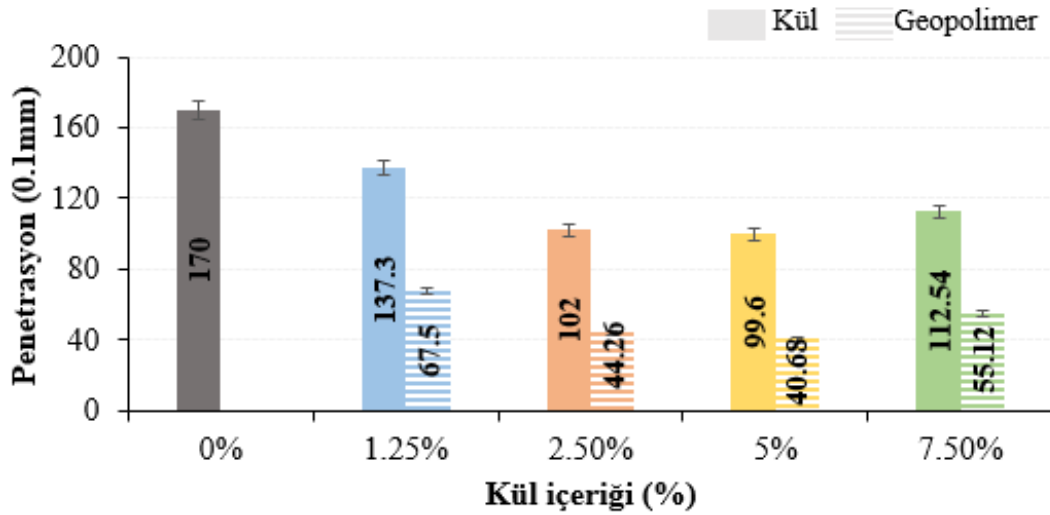


Şekil 5.13 : RTFOT sonrası bağlayıcıların PI değişimleri.

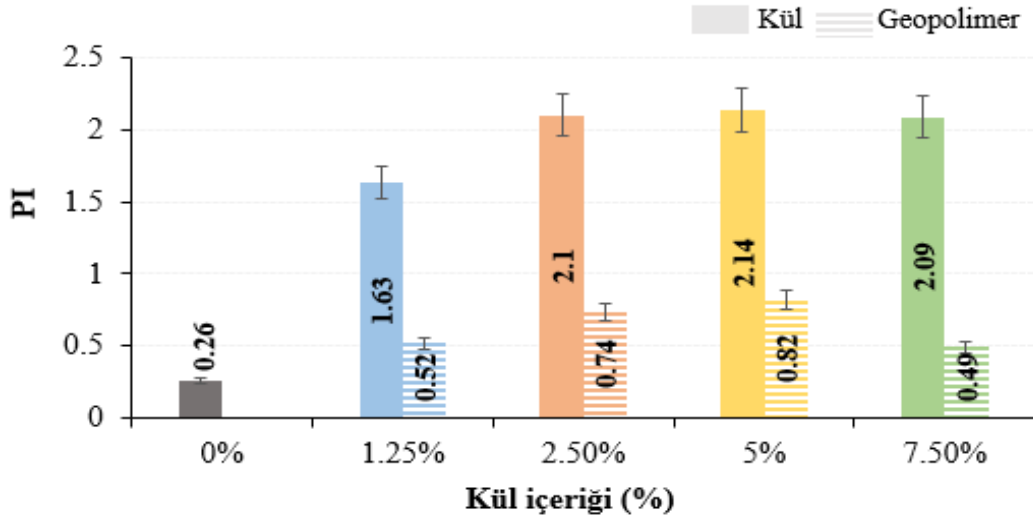
Şekil 5.11-5.13 incelendiğinde, RTFOT etkisiyle kül ve geopolimer katkı bağlayıcıların penetrasyon değerlerinde bir azalma, yumuşama noktası ve PI değerlerinde ise artışlar meydana geldiği görülmektedir. Bu sonuca göre, bağlayıcıların akıcılığının azaldığını, sertliğinin arttığını ve sıcaklığa karşı hassasiyetinin düştüğünü söylemek mümkündür. Bu durum, kısa dönem yaşlanmanın etkisi ile bağlayıcıların sertleşmesi ve bünyelerinde bulunan uçucu maddelerinin kısmen de olsa kaybolması sebebiyle meydana geldiği şeklinde değerlendirilmektedir.



Şekil 5.14 : TFOT sonrası bağlayıcıların yumuşama noktası değişimleri.

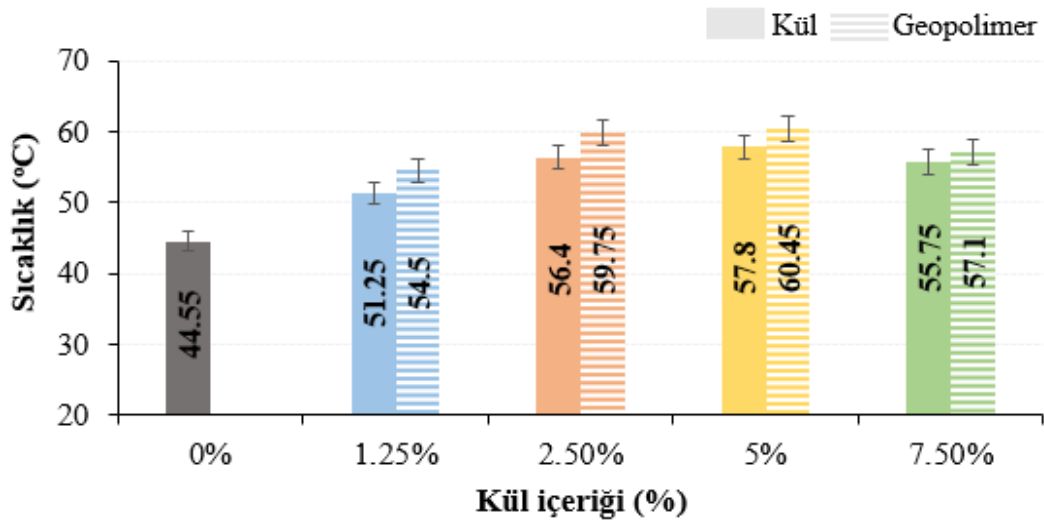


Şekil 5.15 : TFOT sonrası bağlayıcıların penetrasyon değişimleri.

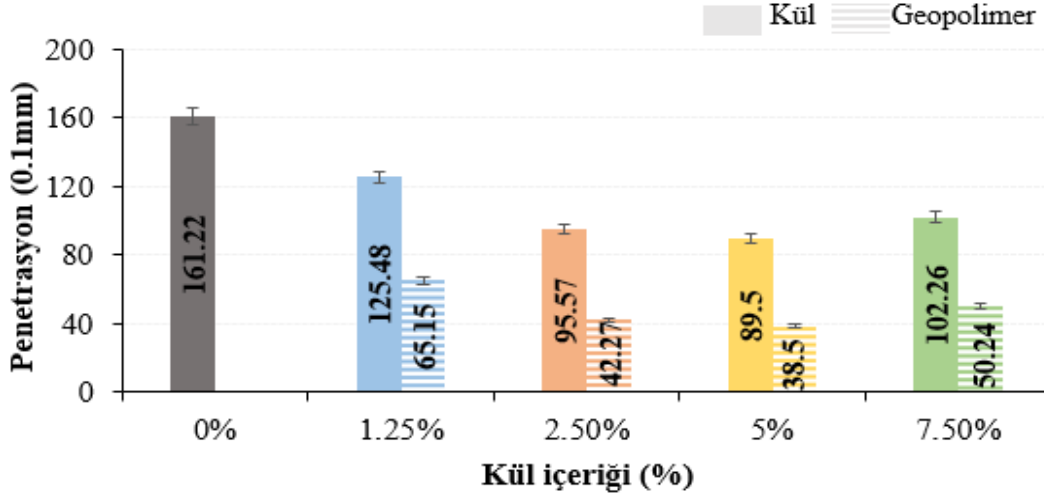


**Şekil 5.16 :** TFOT sonrası bağlayıcıların PI değişimleri.

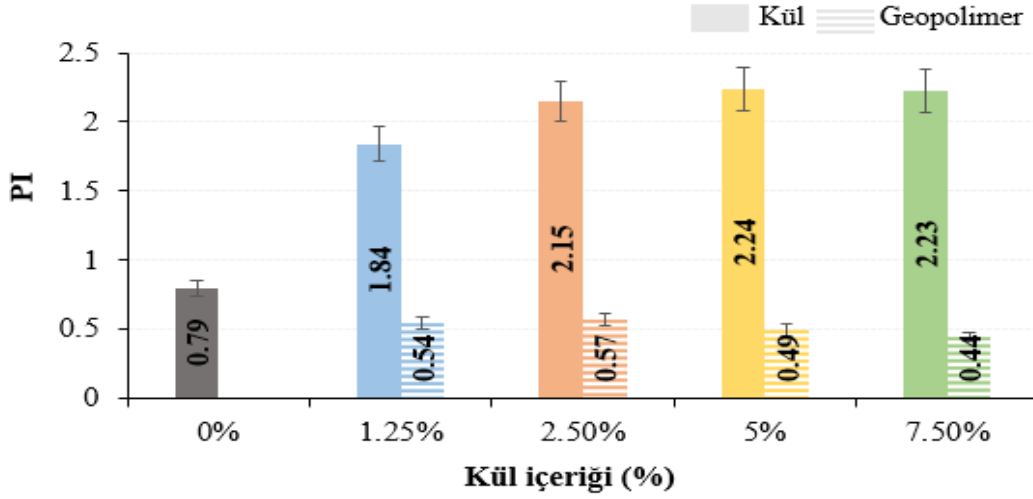
Şekil 5.14-5.16 incelendiğinde, TFOT etkisiyle bağlayıcıların yumuşama noktası ve PI değerlerinde artışlar olduğu, penetrasyon değerlerinde ise azalmalar meydana geldiği görülmektedir. Elde edilen bu sonuçlara göre, hem kül hem de geopolimer katkıli bağlayıcıların sertliğinin arttığını ve sıcaklığa karşı hassasiyetlerinin azaldığını söylemek mümkündür. TFOT kalıntısı katkıli tüm bağlayıcıların, RTFOT kalıntısı bağlayıcılara göre sertliklerinin daha fazla olması, TFOT'un RTFOT'a göre yaşlandırma prosesinin daha uzun (yaklaşık 5 saat) sürmesinden kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Bu sebeple, elde edilen değerler beklenen bir sonuçtur.



**Şekil 5.17 :** PAV sonrası bağlayıcıların yumuşama noktası değişimleri.



Şekil 5.18 : PAV sonrası bağlayıcıların penetrasyon değişimleri.



Şekil 5.19 : PAV sonrası bağlayıcıların PI değişimleri.

Çizelge 5.6 ve Şekil 5.17-5.19 incelendiğinde, PAV kalıntısı kül ve geopolimer katkıli bağlayıcıların kısa süreli yaşlandırılmış bağlayıcılara kıyasla sertliklerinin arttığı ve ısıya karşı duyarlılıklarının genel olarak azaldığı görülmektedir. PAV işleminde, bağlayıcılar 20 saat boyunca yaklaşık 100 °C sıcaklık altında 2.1 MPa basınç altında uzun süreli bir yaşlandırmaya tabi tutulmaları sebebiyle bağlayıcıların bünyesinde meydana gelen sertleşme artışı beklenen bir sonuç olarak değerlendirilmektedir.

Çalışmada, kısa dönem yaşlandırılmış olan kül ve geopolimer katkıli bağlayıcıların üzerinde uygulanan geleneksel test sonuçlarına göre meydana gelen kalıcı penetrasyon ve yumuşama noktası farkı Çizelge 5.7’de verilmiştir.

**Çizelge 5.7 :** Bağlayıcıların kalıcı penetrasyon ve yumuşama noktası farkı değerleri.

Bağlayıcı türü	Kalıcı penetrasyon (%)		Yumuşama noktası farkı	
	RTFOT	TFOT	RTFOT	TFOT
S	98.6	98.9	0.40	0.90
K 1.25	98.4	97.7	0.65	0.80
K 2.5	99.5	95.3	0.10	0.85
K 5	97.2	95.4	0.45	0.95
K 7.5	99.1	97.0	0.35	0.85
G 1.25	98.7	94.5	1.00	1.75
G 2.5	97.9	90.3	0.75	2.30
G 5	97.1	92.9	0.50	2.75
G 7.5	96.9	90.6	0.60	1.85

Çizelge 5.7 değerlendirildiğinde, kül ve geopolimer katkıli bağlayıcıların yaşlanma sonrası yumuşama noktası ve kalıcı penetrasyon değişimlerinin oldukça düşük çıktığı görülmektedir. Kül ve geopolimer katkıli bağlayıcıların Superpave Şartnamesinde yer alan polimer katkıli bağlayıcılar için belirlenen yaşlanma şartname limitlerinin kalıcı penetrasyon değeri için en az %50, yumuşama noktası farkı için  $-5^{\circ}\text{C}/ +12^{\circ}\text{C}$  olduğu göz önüne alındığında, kül ve geopolimer katkılarının kısa süreli yaşlanma üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olmadığı daha iyi anlaşılmaktadır [22].

#### 5.4 Bağlayıcıların Reolojik Test Sonuçları

Bu çalışmada, saf, kül ve geopolimer katkıli tüm bağlayıcıların yüksek-orta ve düşük sıcaklıklarda gösterdiği reolojik karakteristiklerini belirleyebilmek için, yaşlandırılmamış, kısa (RTFOT) ve uzun (PAV) süre yaşlandırılmış bu bağlayıcılar Superpave bağlayıcı şartnamesi esas alınarak RV, DSR, BBR, MSCR ve LAS deneylerine tabi tutulmuştur.

##### 5.4.1 RV test sonuçları

ASTM D 4402 standardına göre gerçekleştirilen RV deneyi ile saf, kül ve geopolimer katkıli tüm bağlayıcıların plentte karıştırma ve yolda sıkıştırma esnasında gereken sıcaklıkları tespit edilmeye çalışılmıştır. Bu deney, Brookfield Viskozimetre Cihazı (DV-2T) kullanılarak gerçekleştirilmiş ve deneyde 27 numaralı spindle kullanılarak 20 rpm hızında yapılmıştır.

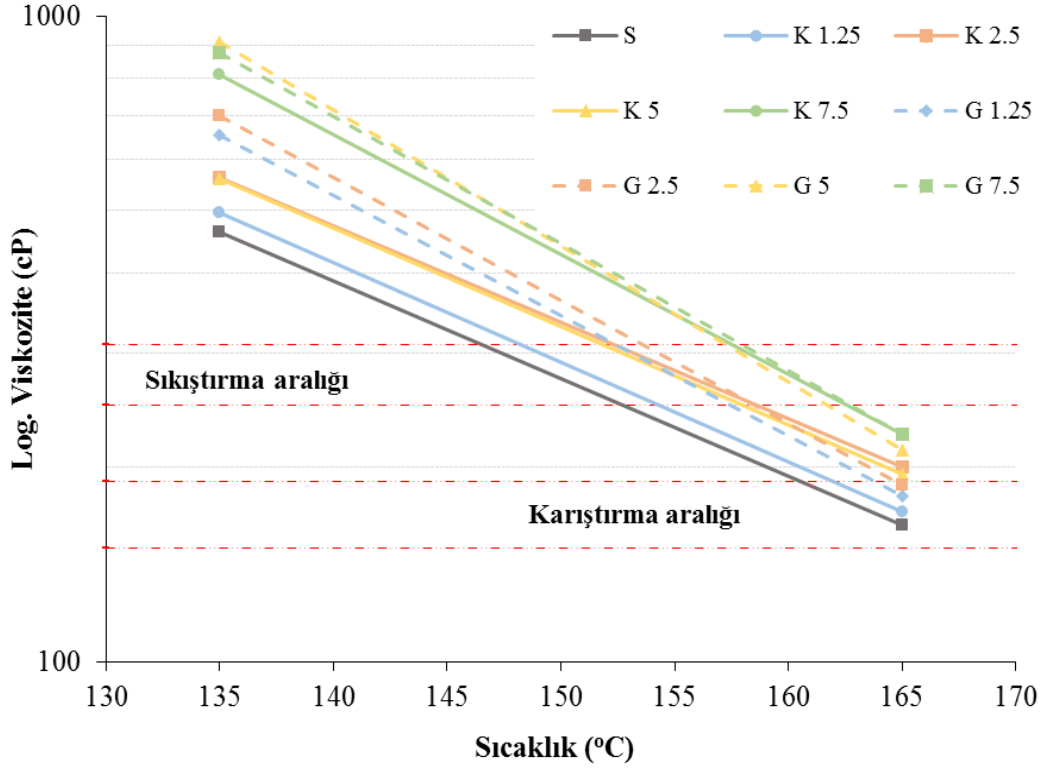
Saf, kül ve geopolimer ilaveli bağlayıcılar üzerinde 9 farklı sıcaklıkta (105, 115, 125, 135, 145, 155, 165, 175 ve 185°C) gerçekleştirilen viskozite deney sonuçları Çizelge 5.8’de, viskozite değerleri kullanılarak elde edilen bağlayıcıların modifikasyon indeksi ( $\Gamma$ ) değerleri ise Çizelge 5.9’da verilmiştir. Deney standardı ve Asfalt Enstitüsüne göre, 135°C ve 165°C sıcaklık değerlerine karşılık gelen viskozite değerleri kullanılarak bağlayıcıların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıkları tespit edilmektedir. Bu iki sıcaklık değeri kullanılarak çizilen viskozite-sıcaklık grafiği Şekil 5.20’de, bağlayıcıların karıştırma- sıkıştırma sıcaklık aralıkları Çizelge 5.10’da, elde edilen ortalama karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları ise Şekil 5.21 ve Şekil 5.22’de verilmiştir.

**Çizelge 5.8 :** Bağlayıcıların viskozite değerleri.

Bağlayıcı türü	Viskozite (cP)								
	105°C	115°C	125°C	135°C	145°C	155°C	165°C	175°C	185°C
S	1538	1063	662.5	462.5	312.5	220.0	162.5	137.5	112.5
K 1.25	1895	1356	788.3	495.0	340.0	246.0	170.4	142.3	120.6
K 2.5	2063	1490	950.0	562.5	387.5	275.0	200.0	150.0	125.0
K 5	2138	1538	950.0	560.5	387.5	275.0	195.6	150.0	125.0
K 7.5	2425	2250	1325	812.5	537.5	344.5	225.0	175.0	137.5
G 1.25	2350	1574	986.7	655.0	394.7	256.5	180.4	130.8	100.0
G 2.5	2550	1875	1063	700.0	412.5	287.5	187.5	137.5	100.0
G 5	3738	2600	1550	912.5	526.0	325.0	212.5	137.5	100.0
G 7.5	4238	2975	1525	875.0	537.5	325.0	225.0	162.5	112.5

**Çizelge 5.9 :** Bağlayıcıların modifikasyon indeksi değerleri.

Bağlayıcı türü	Modifikasyon indeksi ( $\Gamma$ )								
	105°C	115°C	125°C	135°C	145°C	155°C	165°C	175°C	185°C
S	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
K 1.25	1.23	1.28	1.19	1.07	1.09	1.12	1.05	1.03	1.07
K 2.5	1.34	1.40	1.43	1.22	1.24	1.25	1.23	1.09	1.11
K 5	1.39	1.45	1.43	1.21	1.24	1.25	1.20	1.09	1.11
K 7.5	1.58	2.12	2.00	1.76	1.72	1.57	1.38	1.27	1.22
G 1.25	1.53	1.48	1.49	1.42	1.26	1.17	1.11	0.95	0.89
G 2.5	1.66	1.76	1.60	1.51	1.32	1.31	1.15	1.00	0.89
G 5	2.43	2.45	2.34	1.97	1.68	1.48	1.31	1.00	0.89
G 7.5	2.76	2.80	2.30	1.89	1.72	1.48	1.38	1.18	1.00



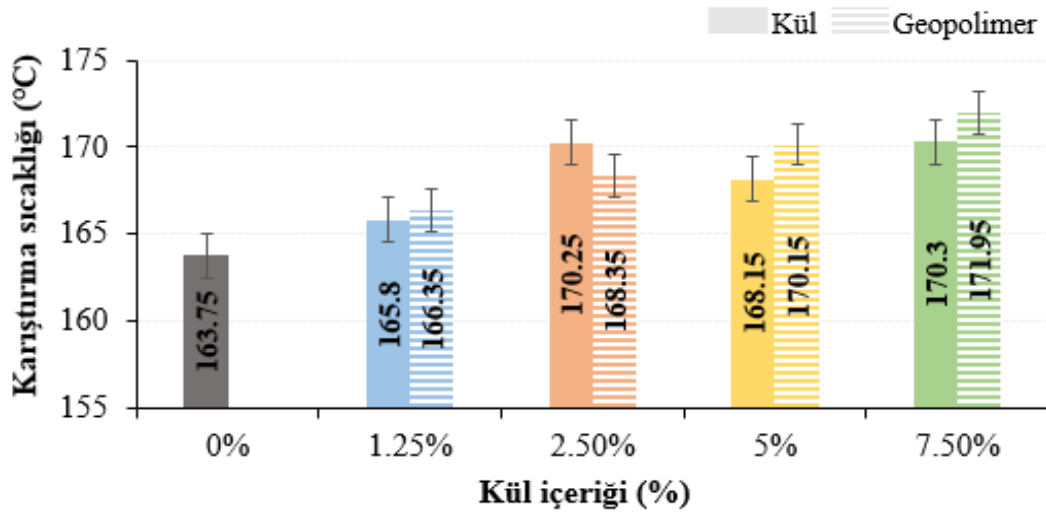
Şekil 5.20 : Viskozite-sıcaklık grafiği.

Şekil 5.20 incelendiğinde, kül ve geopolimer katkı oranı artışıyla bağlayıcıların 135°C ve 165°C sıcaklıklardaki viskozite değerleri saf asfalta göre artış göstermiştir. Meydana gelen bu artışlar 135°C sıcaklıkta kül katkılı bağlayıcılar için sırasıyla %7.1, %21.6, %21.2 ve %75.7 oranlarında, geopolimer katkılı bağlayıcılar için ise %41.6, %51.4, %97.3 ve %89.2 oranlarındadır. 165°C sıcaklık için ise yine kül katkılı bağlayıcılar için sırasıyla %4.9, %23.1, %20.4 ve %38.5 oranlarında, geopolimer katkılı bağlayıcılar için ise %11.0, %15.4, %30.8 ve %38.5 oranlarında gerçekleşmiştir. Elde edilen bu sonuçlara göre kül ve geopolimer katkılı bağlayıcıların işlenebilirlik özelliğinin saf bağlayıcıya göre azaldığı ancak geopolimer katkılı bağlayıcılarda bu değişimin daha yüksek olduğu görülmektedir.

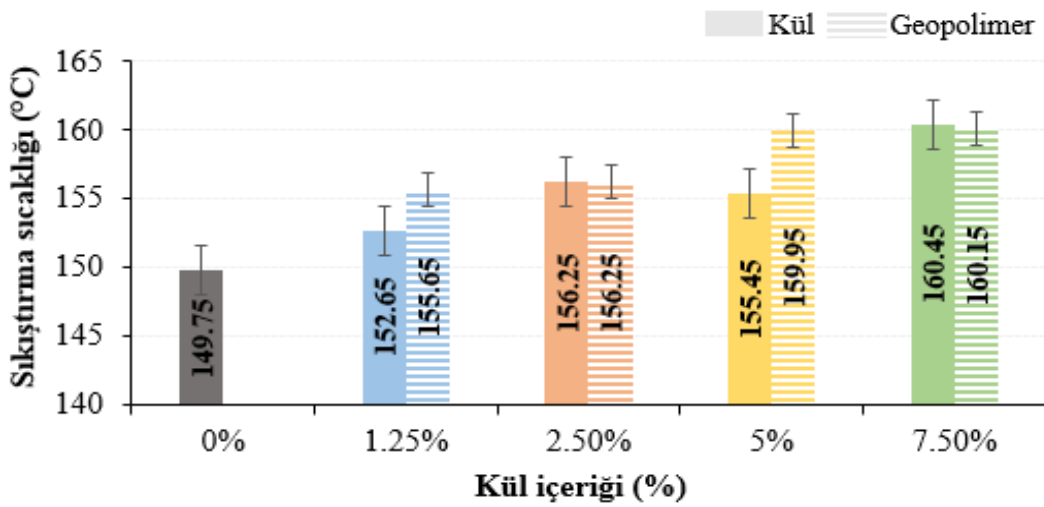
HMA'ların hazırlanmasında bağlayıcıların agregaya ile karıştırılırken ve yolda sıkıştırılırken belirli bir sıcaklık aralığında olması gerekmektedir. Sıcak karışımların karıştırılmasında 170±20 cP, sıkıştırılmasında ise 280±30 cP viskozite değerine sahip olması beklenmektedir [45]. Buradan elde edilen viskozite değerlerine karşılık gelen karıştırma ve sıkıştırma aralıklarını belirleyebilmek için 135°C ve 165°C sıcaklıkta yapılan viskozite deneyinden elde edilen viskozite değeri ile çizilen viskozite-sıcaklık grafiğinden yararlanılmaktadır.

**Çizelge 5.10** : Bağlayıcılara ait karıştırma- sıkıştırma sıcaklık aralıkları.

Bağlayıcı türü	Karıştırma aralığı (°C)	Sıkıştırma aralığı (°C)
S	161.3 – 166.2	146.2 – 153.3
K 1.25	162.5 – 169.1	150.1 – 155.2
K 2.5	166.2 – 174.3	153.2 – 159.3
K 5	165.1 – 171.2	152.3 – 158.6
K 7.5	168.2 – 172.4	157.4 – 163.5
G 1.25	164.1 – 168.6	153.8 – 157.5
G 2.5	165.3 – 171.4	154.3 – 158.2
G 5	167.4 – 172.9	157.1 – 162.8
G 7.5	169.8 – 174.1	157.1 – 163.2



**Şekil 5.21** : Bağlayıcıların ortalama karıştırma sıcaklıkları.



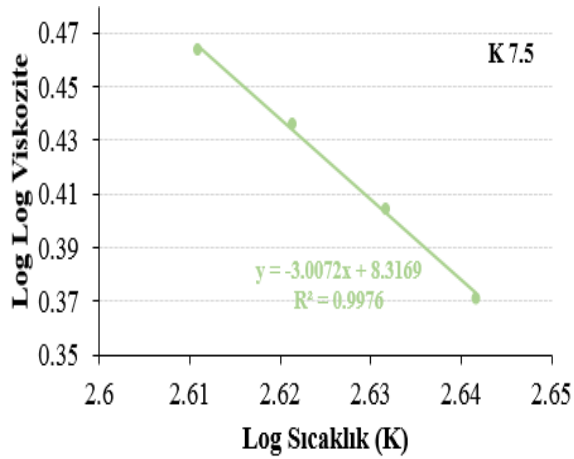
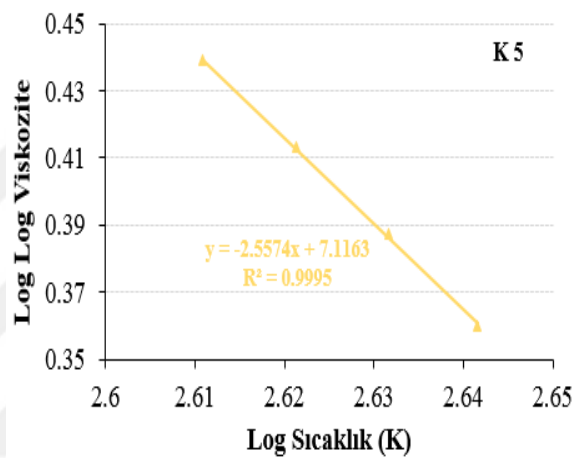
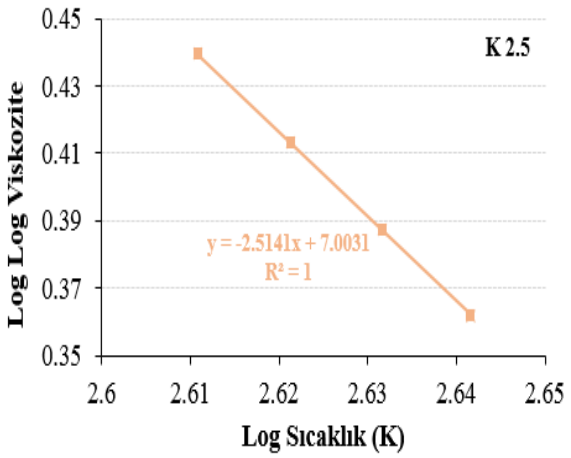
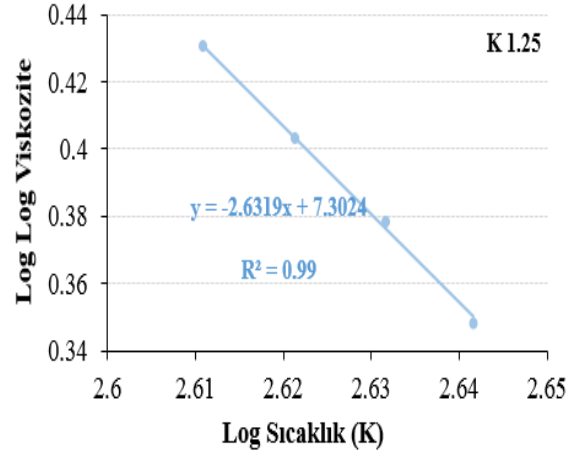
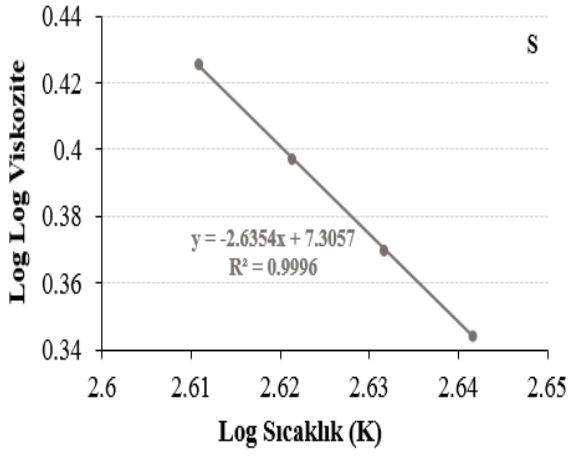
**Şekil 5.22** : Bağlayıcıların ortalama sıkıştırma sıcaklıkları.

Şekil 5.21 ve Şekil 5.22 incelendiğinde, kül ve geopolimer katkı oranı artışıyla bağlayıcıların ortalama karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklar saf asfalta göre önemli ölçüde değişiklik göstermiştir. Karıştırma sıcaklıkları, kül katkılı bağlayıcılar için saf asfalta kıyasla %1.3, %4.0, %2.8 ve %4.0 artış, geopolimer katkılı bağlayıcılar için sırasıyla %1.6, %2.8, %3.9 ve %5.0 artış şeklindedir. Sıkıştırma sıcaklıkları ise kül katkılılar için sırasıyla %1.9, %4.3, %3.8 ve %7.1 artış, geopolimer katkılı bağlayıcılar için ise sırasıyla %3.9, %4.3, %6.8 ve %6.9 artış şeklindedir. Elde edilen bu sonuçlara göre kül ve geopolimer katkılı bağlayıcıların işlenebilirlik özelliğinin saf bağlayıcıya göre azaldığını, ortalama karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının ise artış gösterdiği görülmektedir. Bu artışların penetrasyon ve yumuşama noktası değerleri de göz önüne alındığında kül ve geopolimer katkılarının asfaltın yapısında sertleşme meydana getirmeleri sebebiyle olduğu değerlendirilmektedir. Ancak, ülkemizde Karayolları tarafından genellikle kullanılan, SBS gibi malzemeler çok daha yüksek (yaklaşık 180°C) karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığına sahiptir [130]. Bu durum göz önüne alındığında, geopolimer katkılı bağlayıcıların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının saf karışıma göre kısmen yüksek olması göz ardı edilebilecek bir durum olarak değerlendirilmektedir.

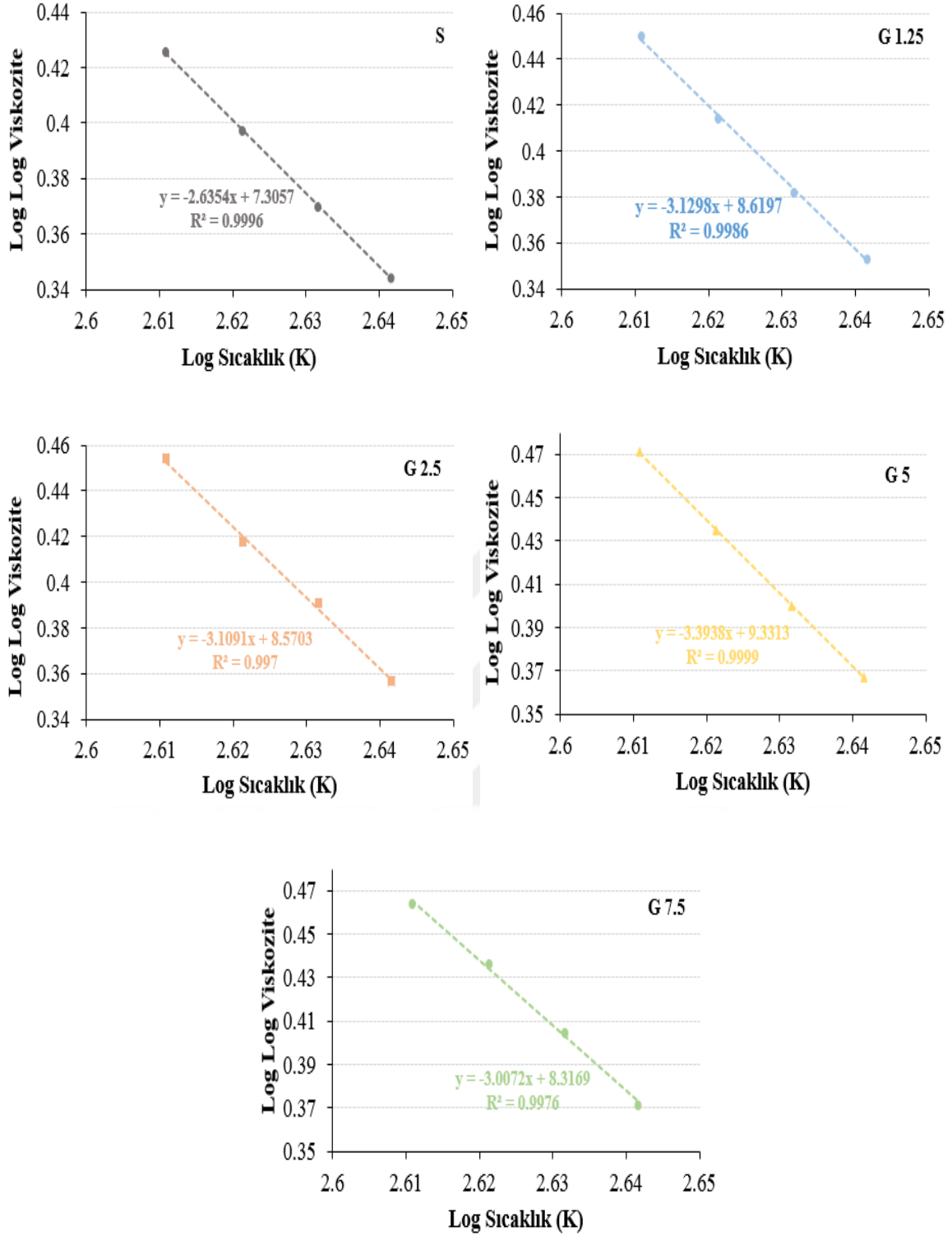
Bu çalışmada ayrıca, viskozite test sonuçlarına dayalı olarak saf ve modifiye asfalt bağlayıcıların sıcaklık duyarlılığı, viskozite-sıcaklık duyarlılığı (VTS) yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Son yıllarda yapılan çeşitli çalışmalarda bu yöntem ile de bağlayıcıların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları tespit edilmektedir. Denklem (5.2)'deki temel formülasyon, viskozite-sıcaklık ilişkisindeki A ve VTS parametreleri için kullanılmaktadır. Buradan elde edilen sonuca göre daha yüksek bir VTS değeri, bağlayıcının sıcaklığa daha duyarlı olduğunu göstermektedir [95,217,218].

$$\text{Log log } n = A + \text{VTS log } (T) \quad (5.2)$$

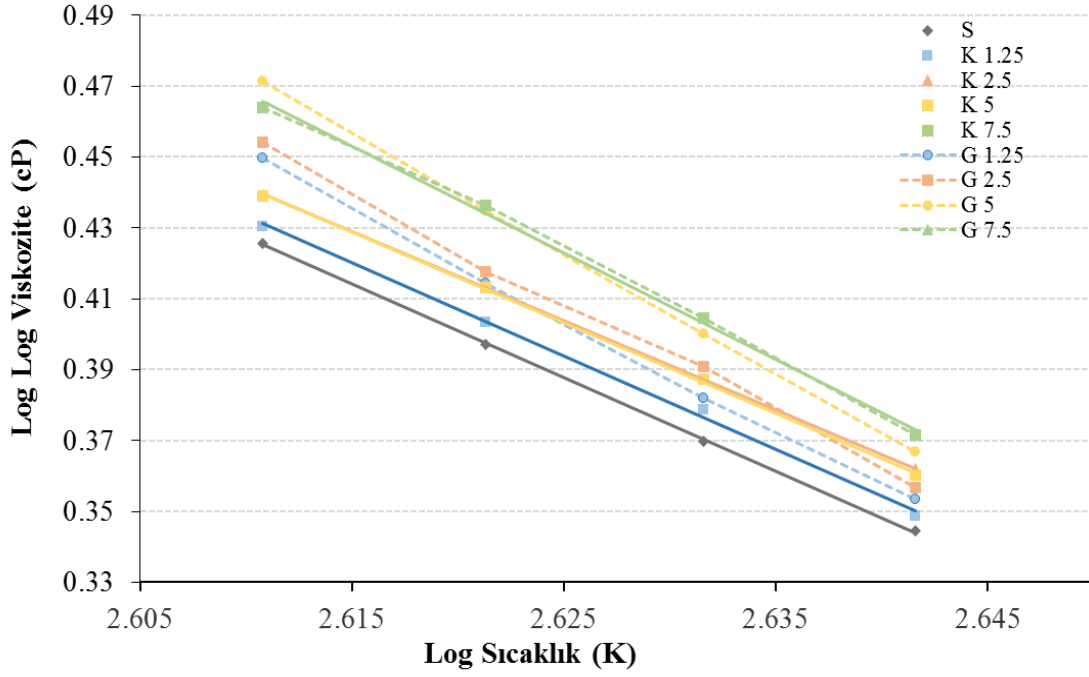
Burada, n= viskozite (cP), T= sıcaklık (Kelvin), A= Sabit, ve VTS= Viskozite sıcaklık duyarlılık indeksi'dir. Tüm bağlayıcıların viskozite-sıcaklık ilişkisine bağlı olarak A-VTS eğrileri Şekil 5.23 ve Şekil 5.24'de, karıştırma-sıkıştırma sıcaklık aralıkları Şekil 5.25'de verilmiştir.



Şekil 5.23 : Kül katkılı bağlayıcıların A-VTS eğrileri.



Şekil 5.24 : Geopolimer katkılı bağlayıcıların A-VTS eğrileri.



Şekil 5.25 : Bağlayıcıların viskozite-sıcaklık grafiği (Kelvin).

Bağlayıcıların Denklem (5.2)'ye göre hesaplanan A-VTS değerleri ve elde edilen ortalama uygulama sıcaklıkları Çizelge 5.11'de verilmiştir.

Çizelge 5.11 : Bağlayıcıların A-VTS değerleri ve ortalama uygulama sıcaklıkları.

Bağlayıcı	A	VTS	R <sup>2</sup>	Karıştırma	Sıkıştırma
S	7.3057	-2.6354	0.9996	163.35	148.55
K 1.25	7.3024	-2.6319	0.9980	165.89	150.45
K 2.5	7.0031	-2.5141	1.0000	167.58	153.05
K 5	7.1163	-2.5574	0.9995	169.85	154.45
K 7.5	8.3169	-3.0072	0.9976	173.35	160.05
G 1.25	8.6197	-3.1298	0.9986	166.65	152.95
G 2.5	8.5703	-3.1091	0.9970	167.45	155.55
G 5	9.3313	-3.3938	0.9999	170.55	158.95
G 7.5	8.3169	-3.0072	0.9976	171.45	159.95

Elde edilen sonuçlara göre, karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının bu yöntem ile büyük ölçüde değişiklik göstermediği görülmektedir. Ancak, Asfalt Enstitüsü tarafından yalnızca 135°C ve 165°C sıcaklıklardaki viskozite değerleri kullanılarak elde edilen karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları esas alınmaktadır. Bunun için, çalışmanın geri kalanında da sadece bu iki değer kullanılarak elde edilen değerler esas alınmış ve değerlendirmeler yapılmıştır.

#### 5.4.2 DSR test sonuçları

Çalışmada saf, kül ve geopolimer katkıli bağlayıcıların yüksek sıcaklıklar altında göstermiş oldukları tekerlek izi ve orta sıcaklıklar altındaki yorulma dirençleri ASTM D7175 standardına göre DSR deneyi ile belirlenmiştir. Çalışmada, yaşlandırılmamış, RTFOT kalıntısı ve PAV kalıntısı bağlayıcılar deneye tabi tutulmuştur. Deneyde, yaşlandırılmamış ve RTFOT kalıntısı bağlayıcılar 46, 52, 58, 64, 70 ve 76°C sıcaklıklarda, PAV kalıntısı bağlayıcılar ise 4, 7, 10, 13 ve 16°C sıcaklıklarda deneye maruz bırakılmıştır.

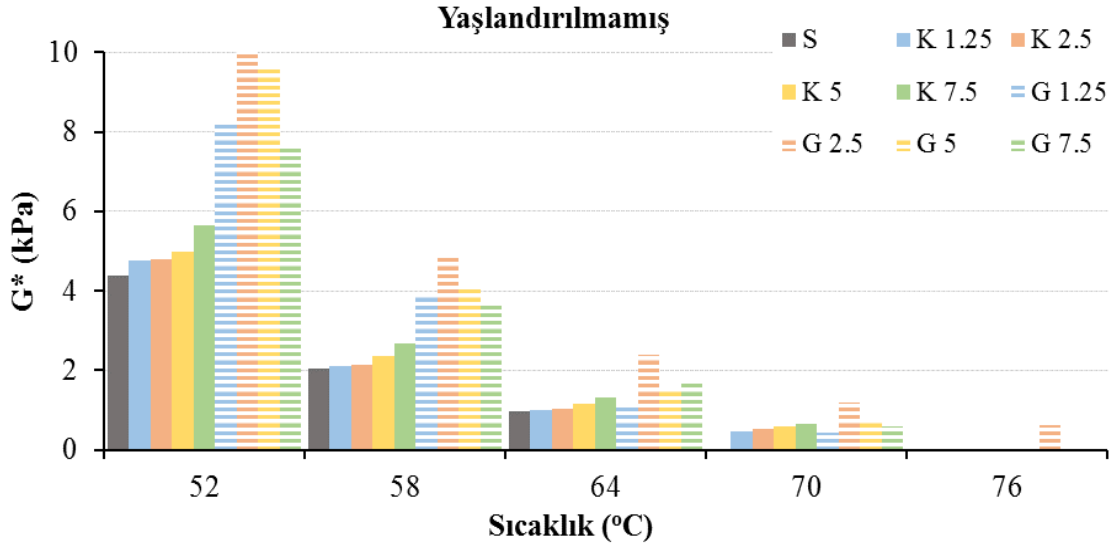
Yaşlandırılmamış (orijinal) saf, kül ve geopolimer katkıli bağlayıcıların yüksek sıcaklıklardaki sonuçları Çizelge 5.12 ve Çizelge 5.13’de, bu bağlayıcılara ait kayma modülü ( $G^*$ ), faz açısı ( $\delta$ ) ve  $G^*/\sin \delta$  değerlerinin sıcaklıkla değişimi sırasıyla Şekil 5.26-Şekil 5.28’de verilmiştir.

**Çizelge 5.12 :** Yaşlandırılmamış kül katkıli bağlayıcıların DSR sonuçları.

Bağlayıcı türü	Sıcaklık (°C)	$G^*$ (KPa)	$\delta$ (°)	$G^*/\sin \delta$ (KPa)	Limit (kPa)	PG sınıfı
S	46	9.76	73.55	10.18	≥1.00	58-Y
	52	4.37	76.95	4.49		
	58	2.04	80.1	2.07		
	64	0.97	82.78	0.98		
K 1.25	46	10.12	72.84	10.59	≥1.00	64-Y
	52	4.76	76.12	4.9		
	58	2.1	79.57	2.14		
	64	1.01	82.26	1.02		
	70	0.46	84.34	0.46		
K 2.5	46	10.29	74.01	10.7	≥1.00	64-Y
	52	4.81	77.34	4.93		
	58	2.14	80.42	2.17		
	64	1.03	83	1.04		
	70	0.52	85.13	0.53		
K 5	46	10.92	72.26	11.47	≥1.00	64-Y
	52	4.99	75.75	5.14		
	58	2.36	79	2.4		
	64	1.15	81.78	1.16		
	70	0.58	84.12	0.58		
K 7.5	46	12.32	71.94	12.96	≥1.00	64-Y
	52	5.64	75.39	5.83		
	58	2.67	78.64	2.72		
	64	1.31	81.45	1.32		
	70	0.66	83.8	0.66		

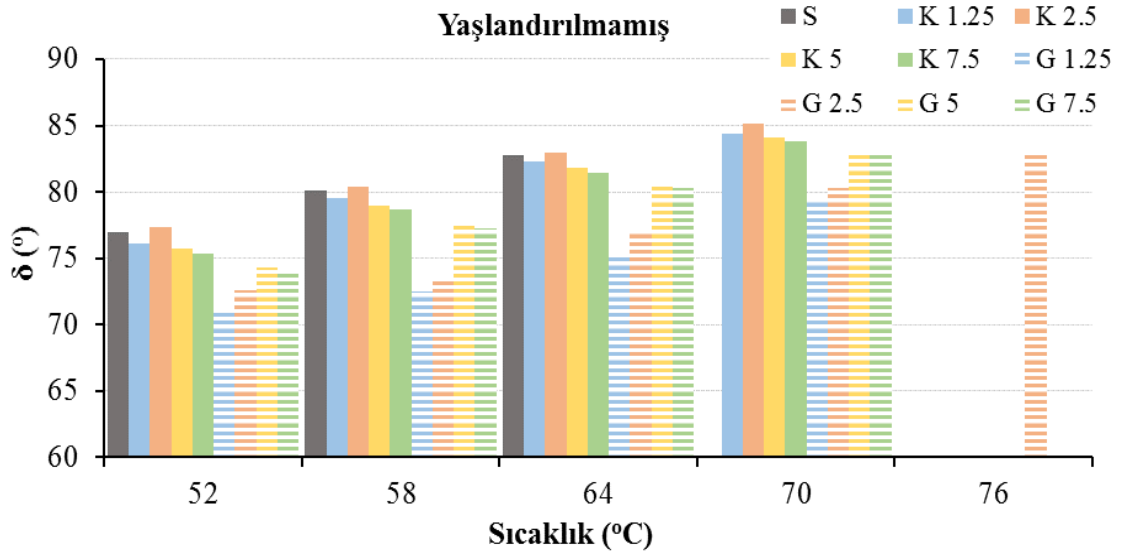
**Çizelge 5.13 : Yaşlandırılmamış geopolimer katkıli bağlayıcıların DSR sonuçları.**

Bağlayıcı türü	Sıcaklık (°C)	G* (KPa)	$\delta$ (°)	G*/Sin $\delta$ (KPa)	Limit (kPa)	PG sınıfı
S	46	9.76	73.55	10.18		58-Y
	52	4.37	76.95	4.49		
	58	2.04	80.1	2.07		
	64	0.97	82.78	0.98		
G 1.25	46	16.24	69.36	17.35		64-Y
	52	8.17	70.85	8.65		
	58	3.85	72.49	4.04		
	64	1.12	75.15	1.16		
	70	0.44	79.53	0.45		
G 2.5	46	18.57	69.99	19.76		70-Y
	52	10.1	72.57	10.59		
	58	4.92	73.44	5.14	$\geq 1.00$	
	64	2.4	77.09	2.46		
	70	1.2	80.27	1.21		
	76	0.62	82.88	0.62		
G 5	46	17.39	70.84	18.41		64-Y
	52	9.61	74.26	9.98		
	58	4.13	77.67	4.23		
	64	1.53	80.6	1.55		
	70	0.77	83.09	0.78		
G 7.5	46	16.59	70.44	17.61		64-Y
	52	7.61	73.92	7.92		
	58	3.61	77.27	3.71		
	64	1.77	80.26	1.8		
	70	0.6	82.81	0.61		



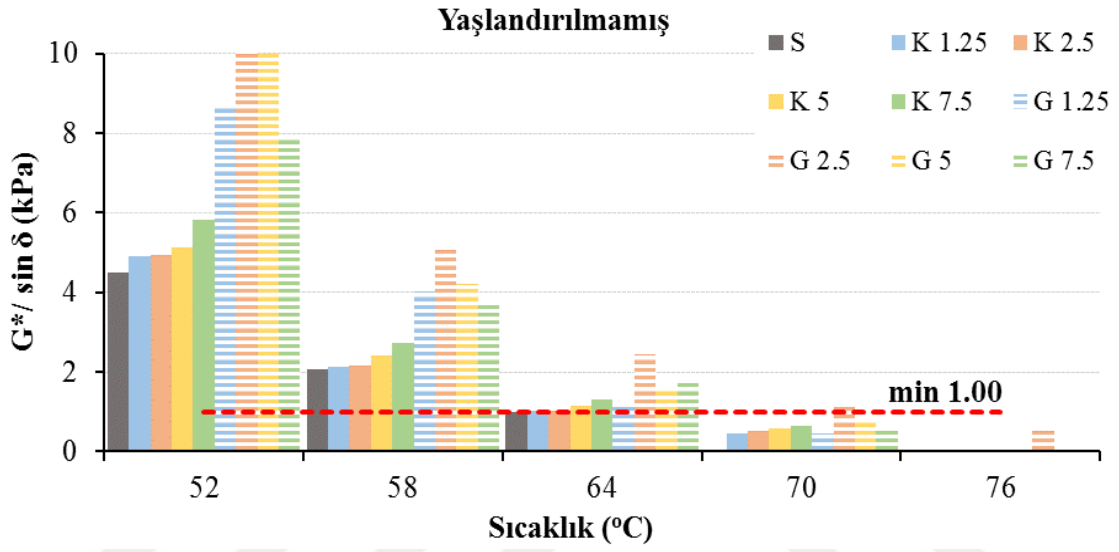
**Şekil 5.26:** Bağlayıcıların  $G^*$  değerlerinin sıcaklıkla değişimi.

Şekil 5.26 değerlendirildiğinde, sıcaklık artışı ile saf bağlayıcıya (S) kıyasla kül ve geopolimer katkılı bağlayıcıların  $G^*$  değerlerinin önemli oranda artış gösterdiği, hatta geopolimer katkılı bağlayıcıların kül katkılı bağlayıcılara göre çok daha yüksek  $G^*$  değerlerine sahip olduğu görülmektedir.  $G^*$  değeri, bağlayıcıların kayma gerilmelerine karşı toplam deformasyon direncini göstermektedir. Bu durumda, geopolimer katkılı bağlayıcıların deformasyonlara karşı direncinin hem saf hem de kül katkılı bağlayıcılara kıyasla daha yüksek olduğu ifade edilebilir.



**Şekil 5.27 :** Bağlayıcıların  $\delta^0$  değerlerinin sıcaklıkla değişimi.

Şekil 5.27 değerlendirildiğinde, sıcaklık artışı ile kül katkıli bağlayıcıların  $\delta^\circ$  değerlerinin saf bağlayıcı ile hemen hemen aynı seviyelerde olduğu, ancak geopolimer katkıli bağlayıcıların  $\delta^\circ$  değerlerinin azaldığı görülmektedir.  $\delta^\circ$  değerindeki azalma, elastik bölgeye yakın olması sebebiyle bağlayıcıların kalıcı deformasyonlara karşı daha dayanıklı olduğunu göstermektedir. Bu durumda, yüksek  $G^*$  ve düşük  $\delta^\circ$  değerlerine sahip olan geopolimer katkıli bağlayıcıların kalıcı deformasyonlara karşı direncinin daha yüksek [10] olabileceğini söylemek mümkündür.



Şekil 5.28 : Bağlayıcıların  $G^*/\sin \delta$  değerlerinin sıcaklıkla değişimi.

Şekil 5.28 incelendiğinde, bütün bağlayıcıların sıcaklık artışı ile doğal olarak tekerlek izi parametrelerinin azaldığı görülmektedir. Performans sınıfı olarak saf, kül ve geopolimer katkıli bağlayıcıların 58 °C sıcaklıkta Superpave şartname limitini sağladığı (min 1.00 kPa) görülmektedir. PG sınıfı bakımından bağlayıcılara ait sonuçlar değerlendirildiğinde saf bağlayıcının yüksek sıcaklık performans sınıfı PG 58-Y, kül katkıli bağlayıcıların hepsinin de performans sınıfının (K 1.25, K 2.5, K5 ve K 7.5) PG 64-Y olduğu, geopolimer katkıli bağlayıcıların ise sırasıyla G 1.25 için PG 64-Y, G 2.5 için PG 70-Y, G 5 ve G 7.5 bağlayıcılarının ise performans sınıfı PG 64-Y olarak belirlenmiştir.

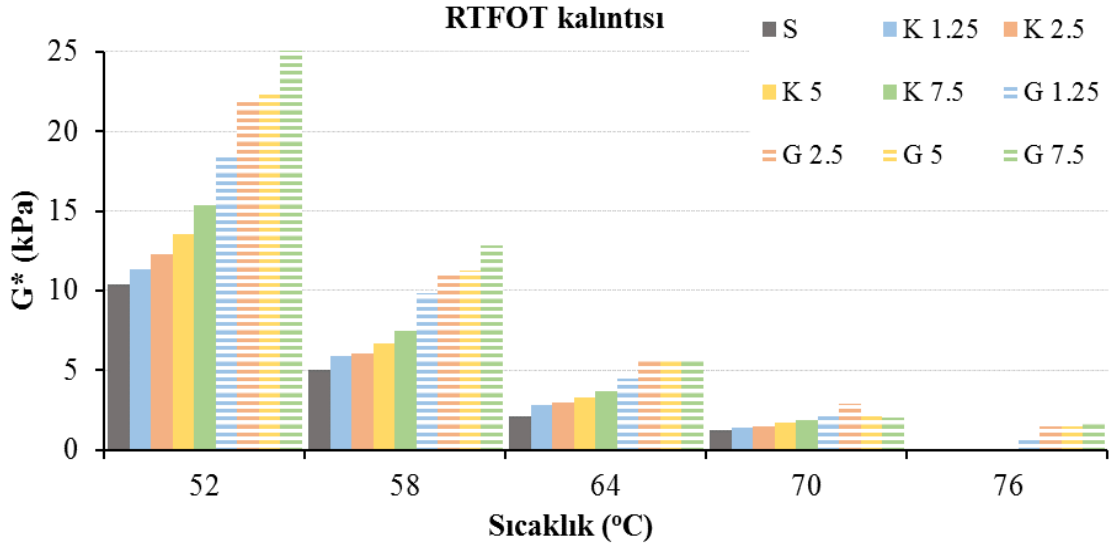
RTFOT kalıntısı saf, kül ve geopolimer katkıli bağlayıcıların yüksek sıcaklık test sonuçları Çizelge 5.14 ve Çizelge 5.15’de, bu bağlayıcıların  $G^*$ ,  $\delta$  ve  $G^*/\sin \delta$  değerlerinin sıcaklıkla değişimi ise sırasıyla Şekil 5.29-Şekil 5.31’de verilmiştir.

**Çizelge 5.14** : RTFOT kalıntısı kül katkılı bağlayıcıların DSR sonuçları.

Bağlayıcı türü	Sıcaklık (°C)	G* (KPa)	$\delta$ (°)	G*/Sin $\delta$ (KPa)	Limit	PG sınıfı
S	46	21.76	65.68	23.88		58-Y
	52	10.38	69.26	11.09		
	58	5.02	73.03	5.25		
	64	2.08	76.96	2.14		
	70	1.25	79.69	1.27		
K 1.25	46	22.15	65.16	24.41		64-Y
	52	11.34	68.24	12.21		
	58	5.86	72.55	6.14		
	64	2.81	75.94	2.9		
	70	1.36	79.03	1.39		
K 2.5	46	24.52	64.14	27.24	$\geq 2.20$	64-Y
	52	12.28	67.51	13.29		
	58	6.05	71.34	6.38		
	64	2.99	75.17	3.1		
	70	1.5	78.64	1.53		
K 5	46	27.77	63.67	30.99		64-Y
	52	13.52	66.99	14.69		
	58	6.64	70.7	7.03		
	64	3.3	74.35	3.43		
	70	1.67	77.74	1.71		
K 7.5	46	29.52	62.76	33.2		64-Y
	52	15.33	66.17	16.76		
	58	7.48	70.14	7.96		
	64	3.67	74.04	3.82		
	70	1.83	77.56	1.88		

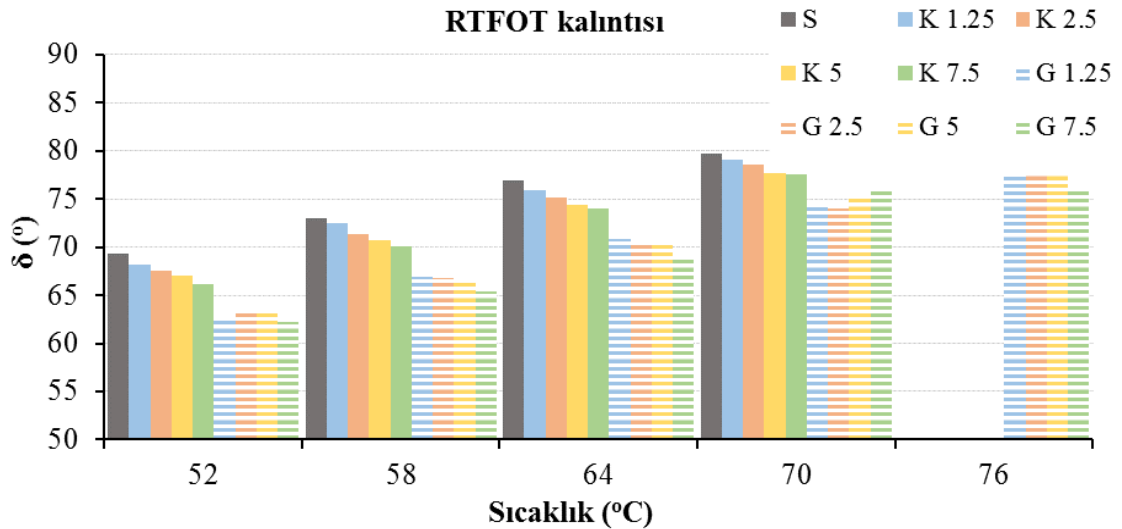
**Çizelge 5.15 :** RTFOT kalıntısı geopolimer katkıli bağlayıcıların DSR sonuçları.

Bağlayıcı türü	Sıcaklık (°C)	G* (KPa)	$\delta$ (°)	G*/Sin $\delta$ (KPa)	Limit	PG sınıfı
S	46	21.76	65.68	23.88		58-Y
	52	10.38	69.26	11.09		
	58	5.02	73.03	5.25		
	64	2.08	76.96	2.14		
	70	1.25	79.69	1.27		
G 1.25	46	40.24	61.23	45.91		64-Y
	52	18.56	62.54	20.92		
	58	9.84	66.89	10.7		
	64	4.5	70.78	4.77		
	70	2.06	74.16	2.14		
	76	0.84	77.36	0.86		
G 2.5	46	43.72	60.58	50.19	$\geq 2.20$	70-Y
	52	22.09	63.36	24.71		
	58	11.17	66.75	12.16		
	64	5.67	70.45	6.02		
	70	2.89	74.07	3.00		
	76	1.49	77.4	1.53		
G 5	46	44.87	60.17	51.72		64-Y
	52	22.53	63.1	25.26		
	58	11.27	66.57	12.27		
	64	5.69	70.31	6.04		
	70	2.1	75.43	2.17		
	76	1.47	77.41	1.51		
G 7.5	46	48.91	59.55	56.74		64-Y
	52	25.08	62.17	28.36		
	58	12.87	65.41	14.15		
	64	5.61	69.03	6.01		
	70	2.02	75.82	2.08		
	76	1.75	76.2	1.8		



**Şekil 5.29** : RTFOT kalıntısı bağlayıcıların G\* değerlerinin sıcaklıkla değişimi.

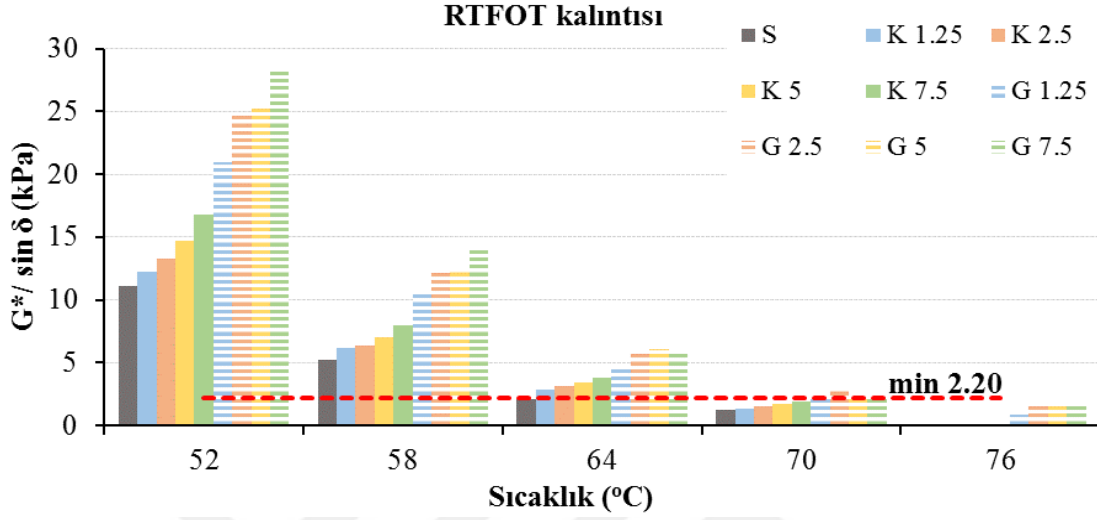
Şekil 5.29'da yaşlandırılmış bağlayıcıların G\* sonuçları değerlendirildiğinde, sıcaklık artışı ile saf bağlayıcıya (S) kıyasla kül ve geopolimer katkıli bağlayıcıların G\* değerlerinin büyük oranda artış gösterdiği, ayrıca geopolimer katkıli bağlayıcıların kül katkıli bağlayıcılara göre çok daha yüksek G\* değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Yaşlandırılmamış bağlayıcılarda olduğu gibi RTFOT kalıntısı bağlayıcılarda da, geopolimer katkıli olanların kalıcı deformasyonlara karşı direncinin diğer bağlayıcılara kıyasla daha yüksek olduğu söylenebilir.



**Şekil 5.30** : RTFOT kalıntısı bağlayıcıların δ° değerlerinin sıcaklıkla değişimi.

Şekil 5.30 değerlendirildiğinde, sıcaklık artışı ile kül ve geopolimer katkıli bağlayıcıların δ° değerlerinin saf bağlayıcıya kıyasla azaldığı, ancak geopolimer katkıli

bağlayıcıların  $\delta^\circ$  değerlerinin kül ve saf bağlayıcıya kıyasla daha da düşük olduğu görülmektedir. Yaşlandırılmamış bağlayıcılarda olduğu gibi yine geopolimer katkılı bağlayıcıların diğer bağlayıcılara kıyasla kalıcı deformasyonlara karşı direncinin daha yüksek olduğu ifade edilebilir.



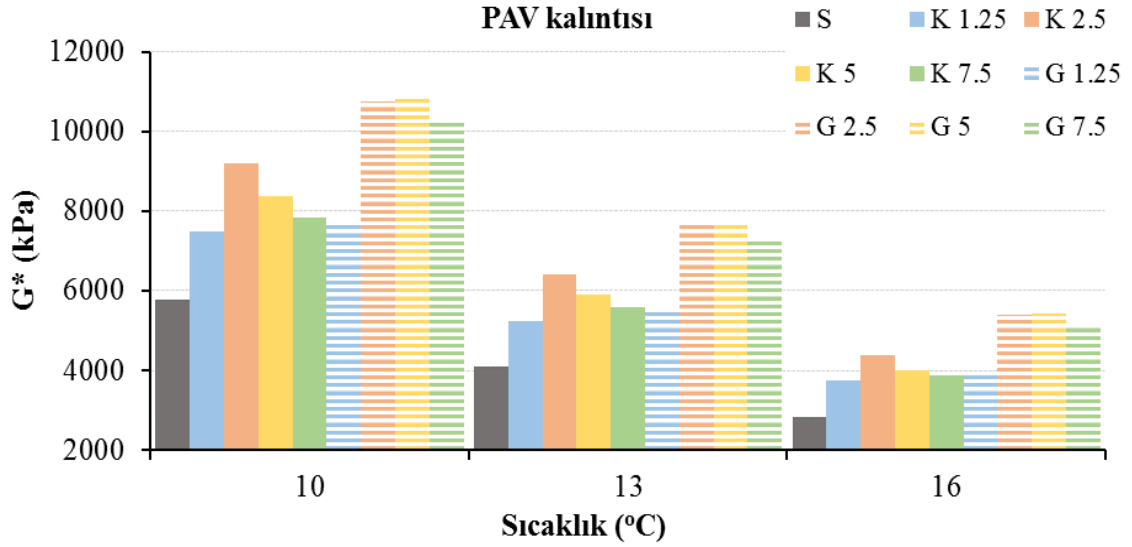
Şekil 5.31 : RTFOT kalıntısı bağlayıcıların  $G^*/\sin \delta$  değerlerinin sıcaklıkla değişimi.

Şekil 5.31 incelendiğinde, sıcaklık artışıyla tüm bağlayıcıların tekerlek izi parametrelerinin doğal olarak azaldığı görülmektedir. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, saf bağlayıcının yüksek sıcaklık performans sınıfı PG 58-Y, kül katkılı bağlayıcıların hepsinin de performans sınıfının PG 64-Y olduğu, geopolimer katkılı bağlayıcıların ise sırasıyla G 1.25 için PG 64-Y, G 2.5 için PG 70-Y, G 5 ve G 7.5 bağlayıcılarının ise performans sınıfı PG 64-Y olarak belirlenmiştir.

PAV kalıntısı saf, kül ve geopolimer katkılı bağlayıcıların orta sıcaklıklardaki yorulma dirençlerini tespit etmek amacıyla 4, 7, 10, 13 ve 16°C sıcaklıklarda yapılan DSR deney sonuçları Çizelge 5.16'da, bu bağlayıcılara ait  $G^*$ ,  $\delta$  ve  $G^*.\sin\delta$  değerlerinin sıcaklıkla değişimi ise Şekil 5.32-Şekil 5.34'de verilmiştir.

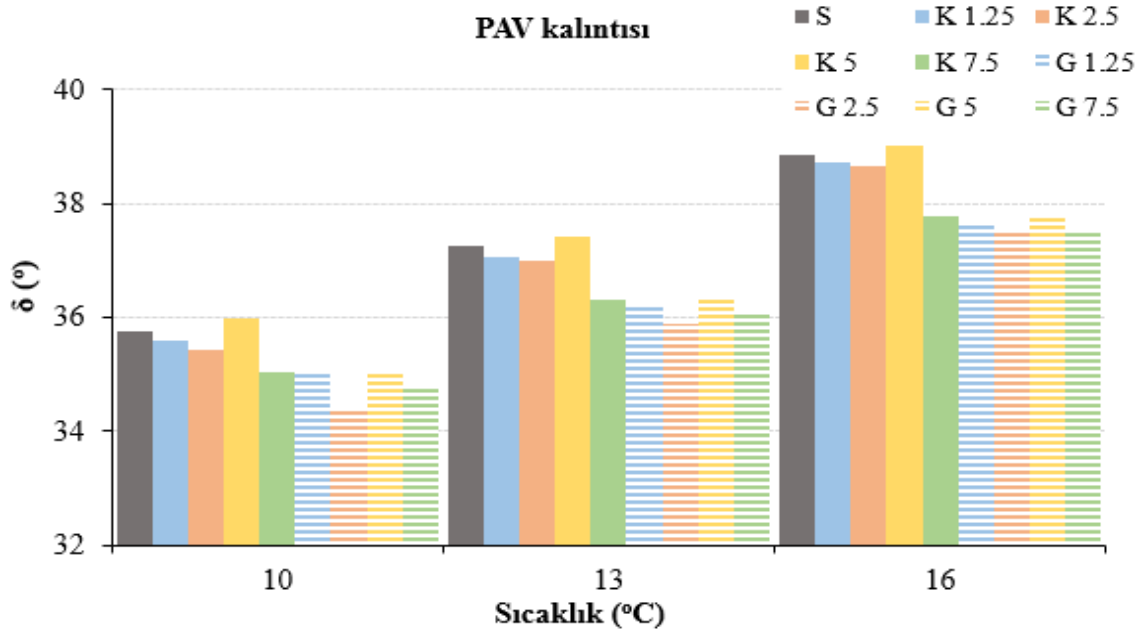
**Çizelge 5.16 : PAV kalıntısı bağlayıcıların DSR sonuçları.**

Bağlayıcı türü	Sıcaklık (°C)	G* (KPa)	$\delta$ (°)	G*.sin $\delta$ (KPa)	Limit (kPa)
S	4	11409	32.78	6178	
	7	8151	34.26	4589	
	10	5791	35.74	3383	
	13	4098	37.24	2480	
	16	2836	38.84	1779	
K 1.25	10	7491	35.58	4359	
	13	5236	37.05	3155	
	16	3745	38.72	2343	
K 2.5	10	9186	35.43	5325	
	13	6415	36.99	3860	
	16	4396	38.66	2746	
K 5	7	11821	34.61	6714	
	10	8374	35.99	4921	
	13	5891	37.41	3579	
	16	4009	39.02	2525	
K 7.5	7	10864	33.83	6048	$\leq 5000$
	10	7851	35.04	4508	
	13	5598	36.3	3331	
	16	3871	37.77	2371	
G 1.25	10	7658	35.06	4399	
	13	5521	36.18	3259	
	16	3984	37.64	2433	
G 2.5	10	10768	34.37	6078	
	13	7670	35.9	4498	
	16	5383	37.5	3277	
G 5	10	10804	35.03	6202	
	13	7728	36.34	4579	
	16	5424	37.75	3320	
G 7.5	10	10269	34.75	5853	
	13	7319	36.09	4311	
	16	5114	37.55	3117	



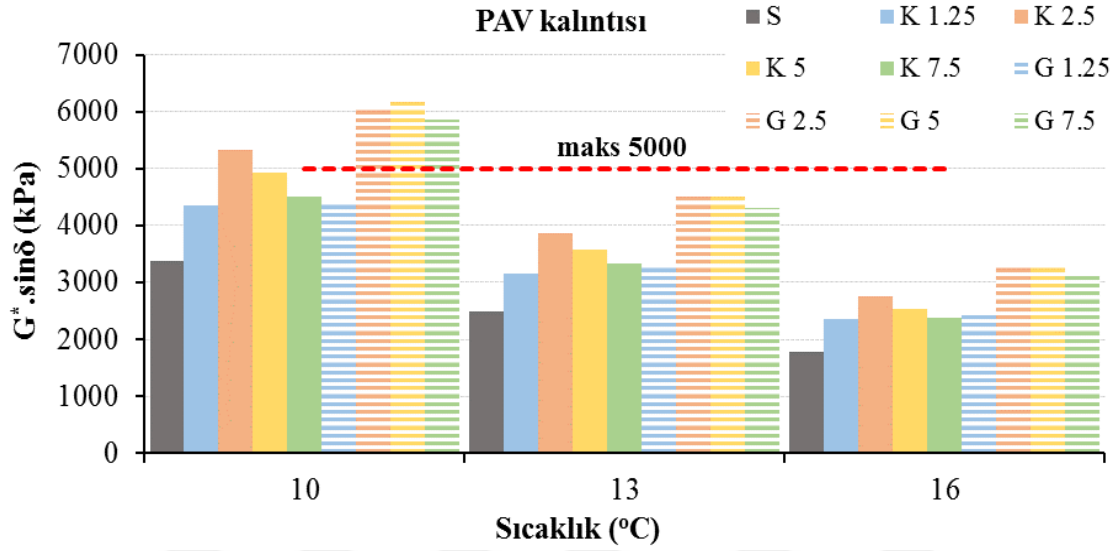
Şekil 5.32 : PAV kalıntısı bağlayıcıların  $G^*$  değerlerinin sıcaklıkla değişimi.

Şekil 5.32 incelendiğinde, sıcaklık artışı ile tüm bağlayıcıların  $G^*$  değerlerinin azaldığı görülmektedir. Ancak tek bir sıcaklıkta (örneğin 10 °C) tüm bağlayıcıların durumu değerlendirildiğinde, genel olarak geopolimer katkılı bağlayıcıların saf ve kül katkılı bağlayıcılara kıyasla  $G^*$  değerlerinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durumda, uzun süreli yaşlanma etkilerine rağmen, daha yüksek yaşlanma direnci sebebiyle geopolimer katkılı bağlayıcıların yapısında fazla sertleşme meydana geldiği ve bu bağlayıcıların deformasyonlara karşı direncinin daha yüksek olabileceği ifade edilebilir.



Şekil 5.33 : PAV kalıntısı bağlayıcıların  $\delta^\circ$  değerlerinin sıcaklıkla değişimi.

Şekil 5.33 incelendiğinde, sıcaklık artışı ile tüm bağlayıcıların  $\delta^\circ$  değerlerinin artış gösterdiği görülmektedir. Fakat, tek bir sıcaklık esas alındığında (örneğin 10°C sıcaklıkta) tüm bağlayıcıların durumu değerlendirildiğinde, özellikle geopolimer katkıli bağlayıcıların saf ve kül katkıli bağlayıcılara kıyasla  $\delta^\circ$  değerlerinin daha düşük olduğu görülmektedir.  $G^*$  değerleri yükselmesine rağmen  $\delta^\circ$  değerlerinin azalması, geopolimer katkıli bağlayıcıların diğer bağlayıcılara kıyasla daha elastik davranış sergilediğini göstermektedir.



Şekil 5.34 : PAV kalıntısı bağlayıcıların  $G^* \cdot \sin \delta$  değerlerinin sıcaklıkla değişimi.

Çizelge 5.16 ve Şekil 5.34 birlikte incelendiğinde saf, kül ve geopolimer katkıli bağlayıcıların yorulma parametresi değerlerinin sadece 13°C ve 16°C sıcaklıklarda şartname limiti olan 5000 kPa üst sınırını aşmadığı görülmektedir. Kül ve geopolimer katkıli bağlayıcıların katkı oranı artışı ile yorulma parametresi değerleri saf bağlayıcıya göre genel olarak artış göstermiş olsa da, şartname limitleri içerisinde kaldığı için, bu durumda hem kül hem de geopolimer katkıli bağlayıcıların elastikiyetinde artış meydana geldiği söylenebilir.

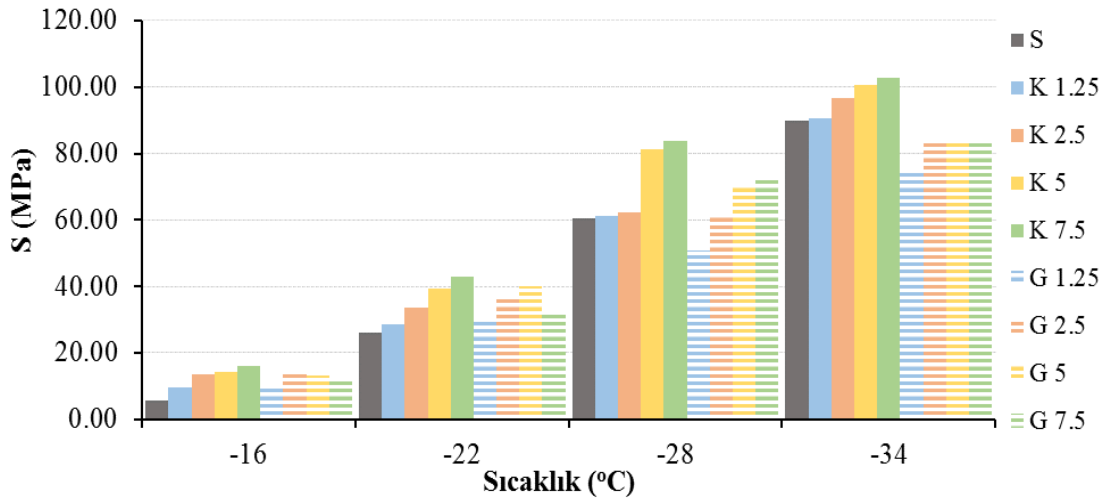
#### 5.4.3 BBR test sonuçları

Düşük sıcaklıklarda asfalt bağlayıcıların düşük sıcaklık çatlaklarına (termal) karşı göstermiş olduğu direnç BBR deneyi ile belirlenmektedir. ASTM D 6648 standardına göre gerçekleştirilen BBR deneyinde, ilk olarak saf, kül ve geopolimer katkıli bağlayıcılar ortalama 150 °C sıcaklığa kadar ısıtıldı ve BBR deneyi için yapılmış olan özel kırıç şeklindeki alüminyum kalıplar bitüm ile dolduruldu. Daha sonra soğuyan bu numuneler kalıplardan çıkarıldı ve deney prosedüründe belirtildiği üzere özel bir sıvı içerisine bırakıldı.

Burada numuneler -6, -12, -18 ve -24°C sıcaklıklarda koşullandırıldı ve son olarak numuneler cihaza yerleştirilerek deneye maruz bırakıldı. Deneyde bağlayıcılar üzerine 240 saniye boyunca 980±5 mN (100±5 gr) yük uygulandı. Deney bitiminde, bağlayıcıya ait S ve m-değeri tespit edildi. Saf, kül ve geopolimer ilaveli bağlayıcıların S ve m-değer sonuçları Çizelge 5.17’de, bu değerlerin katkı oranına ve sıcaklığa bağlı olarak değişimleri ise Şekil 5.35 ve Şekil 5.36’da verilmiştir.

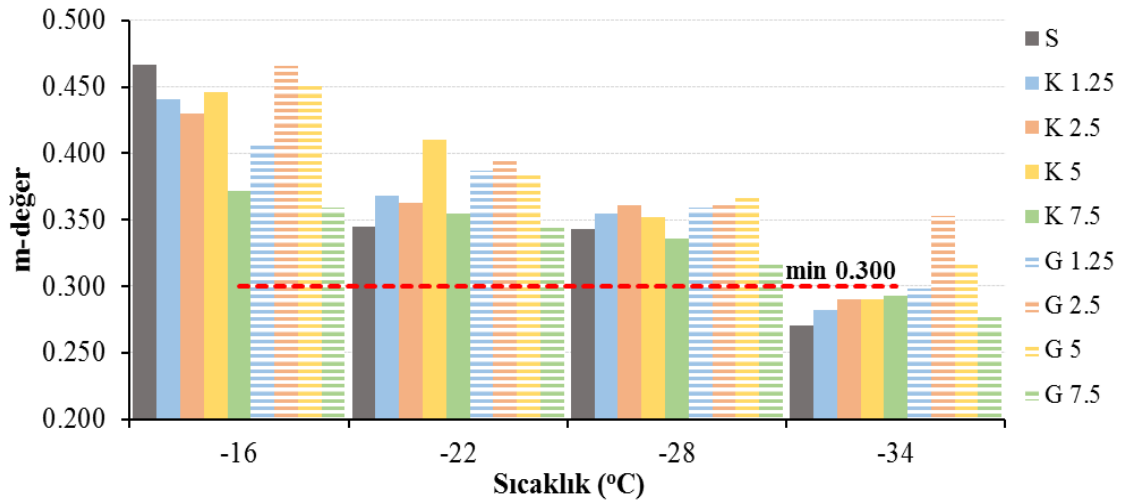
**Çizelge 5.17 : Bağlayıcıların BBR deney sonuçları.**

Bağlayıcı türü	Sıcaklık (°C)	S (MPa)	m-değer	PG
S	-16	5.810	0.467	PG X - 28
	-22	26.12	0.345	
	-28	60.45	0.343	
	-34	89.73	0.270	
K 1.25	-16	9.560	0.441	PG X - 28
	-22	28.44	0.368	
	-28	61.37	0.355	
	-34	90.49	0.282	
K 2.5	-16	13.44	0.430	PG X -28
	-22	33.44	0.363	
	-28	62.34	0.361	
	-34	96.79	0.290	
K 5	-16	14.25	0.446	PG X - 28
	-22	39.17	0.410	
	-28	81.26	0.352	
	-34	100.64	0.310	
K 7.5	-16	15.89	0.372	PG X - 28
	-22	42.92	0.355	
	-28	83.92	0.336	
	-34	102.86	0.293	
G 1.25	-16	10.42	0.408	PG X - 28
	-22	29.36	0.387	
	-28	50.65	0.359	
	-34	74.27	0.298	
G 2.5	-16	13.61	0.466	PG X - 34
	-22	36.45	0.395	
	-28	60.70	0.361	
	-34	83.56	0.323	
G 5	-16	13.18	0.452	PG X - 34
	-22	40.04	0.384	
	-28	70.92	0.367	
	-34	83.60	0.318	
G 7.5	-16	12.22	0.359	PG X - 28
	-22	31.78	0.345	
	-28	72.51	0.316	
	-34	83.57	0.277	



Şekil 5.35 : Bağlayıcılara ait S değerler.

Şekil 5.35 incelendiğinde, sıcaklık arttıkça saf, kül ve geopolimer katkıli bağlayıcıların sünme sertliği değerinde artışlar meydana geldiği, ancak bu artışlar meydana gelmesine rağmen tüm bağlayıcıların ASTM D 6648 standardında belirtildiği gibi maks.300MPa sınırının çok altında kaldığı, hatta geopolimer katkıli bağlayıcıların diğer bağlayıcılara kıyasla S değerinin çok daha düşük olduğu görülmektedir. Bu sonuç, geopolimer katkıli bağlayıcıların kül ve saf bağlayıcıya kıyasla daha elastik bir katı gibi davrandığını ve çok düşük sıcaklıklardan fazla etkilenmediğini göstermektedir.



Şekil 5.36 : Bağlayıcılara ait m değerler.

Şekil 5.36 incelendiğinde, tüm bağlayıcıların -16 °C, -22 °C ve -28 °C sıcaklıklarda şartname limitini (min. 0.300) sağladığı, ancak -34 °C sıcaklıkta sadece G 2.5 ve G5 bağlayıcılarının şartname limitlerini sağladığı görülmektedir.

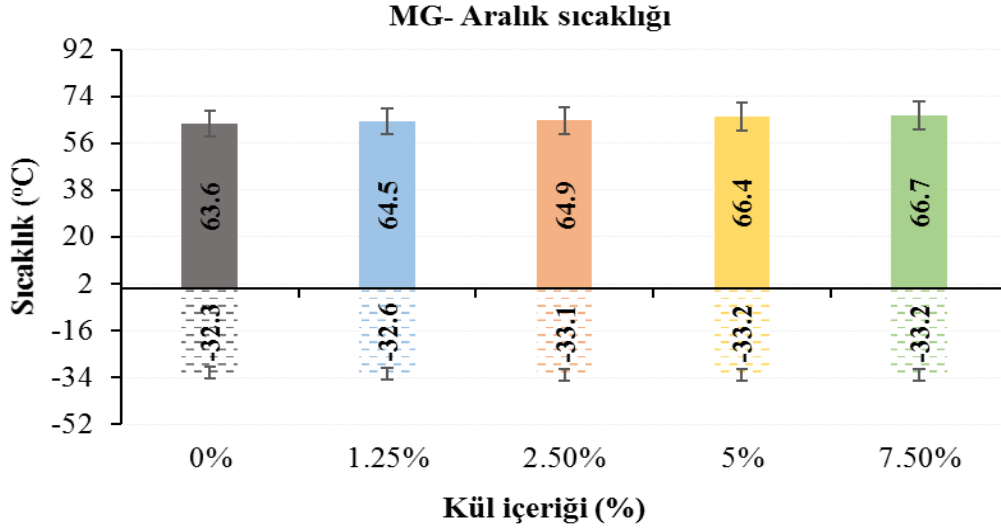
Çalışmada, bağlayıcıların S ve m-değeri parametreleri beraber değerlendirildiğinde, saf bağlayıcının -32.3 °C, kül katkılı bağlayıcıların sırasıyla -32.6 °C, -33.1 °C, -33.2 °C ve -33.2 °C, geopolimer katkılı bağlayıcıların ise sırasıyla -33.7 °C, -37.1 °C, -35.0 °C ve -31.4 °C sıcaklığa kadar düşük sıcaklıklardaki ısı çatlaklarına karşı dirençli oldukları tespit edilmiştir. Buna göre, saf, kül (%1.25, %2.5, %5 ve %7) ve geopolimer (%1.25) katkılı bağlayıcıların düşük sıcaklık performans sınıfları PG X – 28, G2.5 ve G5 bağlayıcılarının PG X – 34, G7.5 bağlayıcısının ise PG X – 28 olarak elde edilmiştir. Bu durum, geopolimer katkılı bağlayıcıların (%2.5 ve %5 oranlarında) düşük sıcaklık çatlamlarına karşı direncinin saf bağlayıcınınkinden çok daha dirençli olduğunu göstermektedir.

#### 5.4.4 Bağlayıcıların ölçülen ve belirlenen performans sınıfları

Bu çalışmada, tüm bağlayıcıların hem düşük (LT) hem de yüksek sıcaklık (HT) performans (PG) ve ölçülen sınıfları (MG) belirlenerek tüm sonuçlar Çizelge 5.18’de, performans ve ölçülen sınıfın sıcaklıkla değişimi ise Şekil 5.37-Şekil 5.40’da verilmiştir.

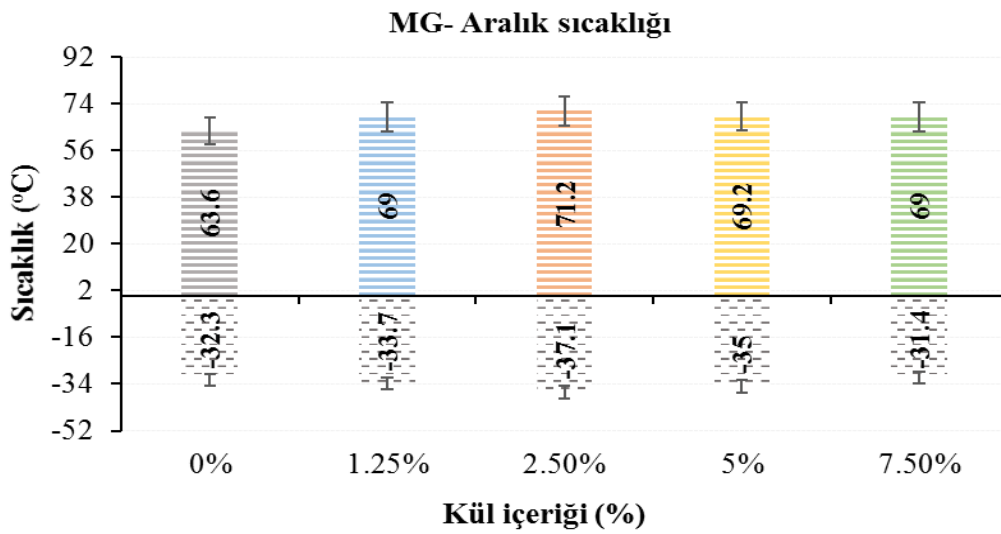
**Çizelge 5.18 : Bağlayıcılara ait PG ve MG değerleri.**

Bağlayıcı türü	Düşük sıcaklık		Yüksek sıcaklık		PG X - Y
	MG	PG	MG	PG	
S	-32.3	-28	63.6	58	PG 58 -28
K 1.25	-32.6	-28	64.5	64	PG 64- 28
K 2.5	-33.1	-28	64.9	64	PG 64 - 28
K 5	-33.2	-28	66.4	64	PG 64– 28
K 7.5	-33.2	-28	66.7	64	PG 64 – 28
G 1.25	-33.7	-28	69.0	64	PG 64– 28
G 2.5	-37.1	-34	71.2	70	PG 70 – 34
G.5	-35.0	-34	69.2	64	PG 64– 34
G 7.5	-31.4	-28	69.0	64	PG 64 - 28



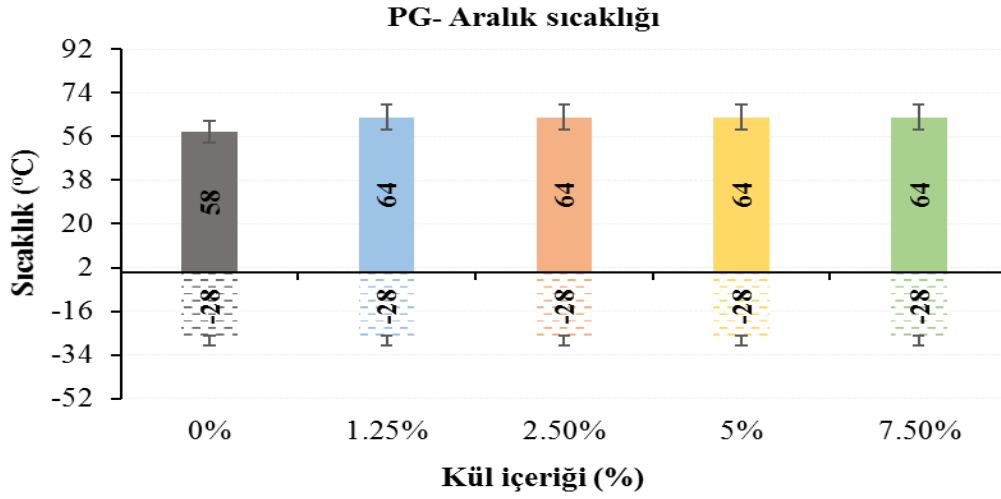
**Şekil 5.37 :** Kül katkıli bağlayıcıların düşük ve yüksek sıcaklık MG değerleri.

Şekil 5.37 incelendiğinde, kül katkıli bağlayıcıların yüksek sıcaklıklarda MG değerlerinin saf bağlayıcıya kıyasla daha yüksek, düşük sıcaklıklardaki MG değerinin ise daha düşük olduğu görülmektedir. Saf bağlayıcının yüksek sıcaklıklardaki MG değeri 63.6°C iken, kül katkısıyla bu değer 66.7°C sıcaklığa kadar çıkmıştır. Benzer şekilde, düşük sıcaklıklar altında kül katkıli bağlayıcıların MG değeri -32.3°C'den -33.2°C'ye kadar düşmüştür. Buradaki sonuçlardan, hem düşük hem de yüksek sıcaklıklar altında kül katkıli bağlayıcıların saf bağlayıcıya kıyasla sırasıyla termal çatlaklara ve kalıcı deformasyonlara karşı daha dirençli olduğu söylenebilir.

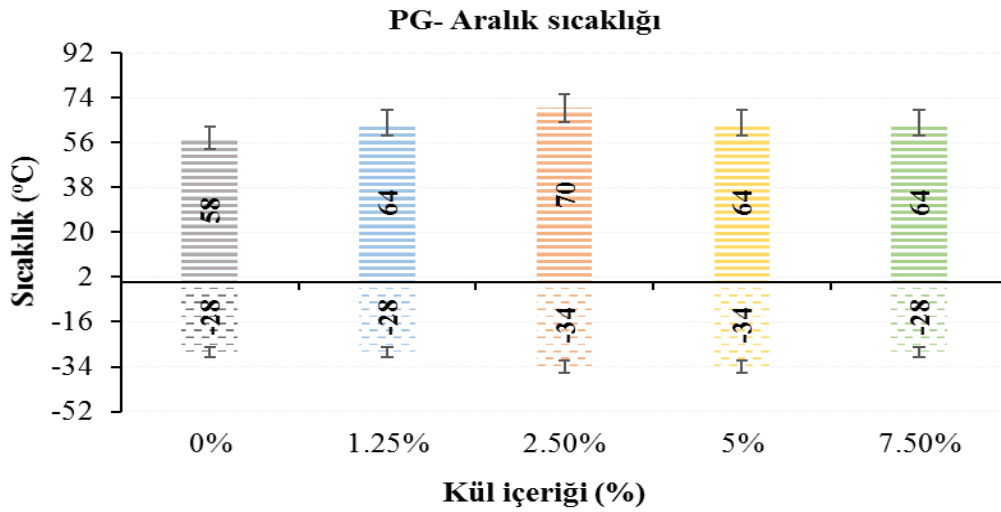


**Şekil 5.38 :** Geopolimer katkıli bağlayıcıların düşük ve yüksek sıcaklık MG değerleri.

Çizelge 5.18 ve Şekil 5.38 birlikte değerlendirildiğinde, geopolimer katkıli bağlayıcıların yüksek sıcaklıklarda MG değerlerinin diğer bağlayıcılara (saf ve kül) kıyasla daha yüksek, düşük sıcaklıklardaki MG değerinin ise daha düşük olduğu görülmektedir. Saf bağlayıcının yüksek sıcaklıklardaki MG değeri 63.6°C sıcaklıklarda iken, geopolimer katkısıyla bu değer 7.6°C kadar yükselerek 71.2°C sıcaklığa kadar artmıştır. Bununla birlikte, düşük sıcaklıklar altında geopolimer katkıli bağlayıcıların MG değeri - 32.3°C'den 4.8°C düşerek -37.1°C'ye kadar düşmüştür. Bu sonuçlardan, geopolimer katkıli bağlayıcıların hem düşük hem de yüksek sıcaklıklar altında saf ve kül katkıli bağlayıcılara kıyasla sırasıyla termal çatlaklara ve kalıcı deformasyonlara karşı daha dirençli olduğu ifade edilebilir.



Şekil 5.39 : Kül katkıli bağlayıcıların düşük ve yüksek sıcaklık PG değerleri.



Şekil 5.40 : Geopolimer katkıli bağlayıcıların düşük ve yüksek sıcaklık PG değerleri.

Şekil 5.39 ve Şekil 5.40 birlikte değerlendirildiğinde, saf bağlayıcının yüksek ve düşük performans sınıfı (PG) sırasıyla PG 58-28, kül katkıli bağlayıcıların artan oranlarda sırasıyla PG 64-28, PG 64-28, PG 64-28 ve PG 64-28, geopolimer katkıli bağlayıcıların ise yine sırasıyla PG 64-28, PG 70-34, PG 64-34 ve PG 64-28 olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlara göre, geopolimer katkıli bağlayıcıların saf ve kül katkıli bağlayıcılara kıyasla hem yüksek hem de düşük sıcaklıklar altındaki deformasyonlara karşı direncinin daha yüksek olduğu söylenebilir.

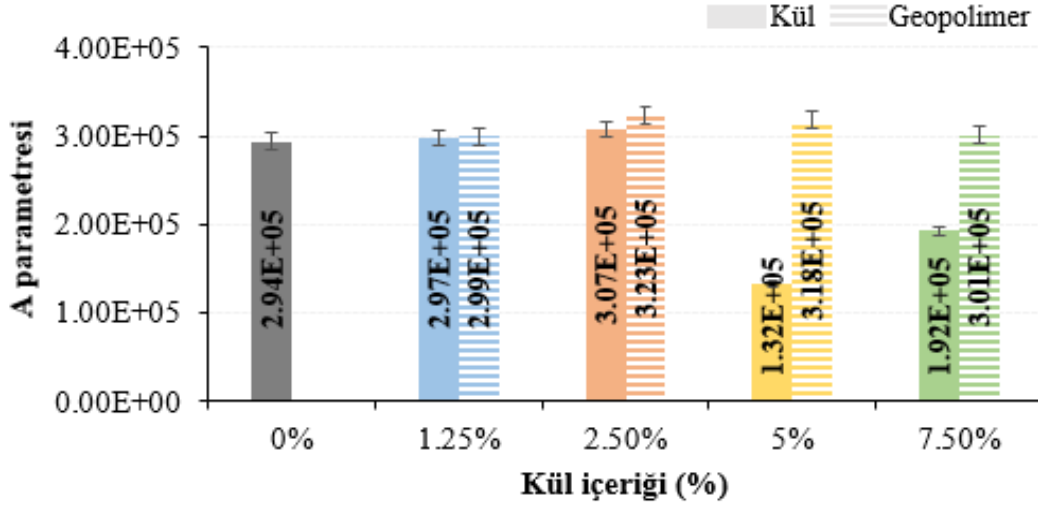
Sonuç olarak, %2.5 geopolimer katkıli bağlayıcının kritik bir oran olduğu görülmektedir. %2.5 geopolimer oranının bağlayıcı modifikasyonda kullanımıyla elde edilen bağlayıcının hem yüksek sıcaklıklarda kalıcı deformasyon direncini, hem de düşük sıcaklıklarda termal çatlaklara karşı direnci üzerinde geliştirici bir etkisi olduğunu söylemek mümkündür.

#### **5.4.5 LAS test sonuçları**

Çalışmada saf, kül ve geopolimer katkıli bağlayıcılar DSR deney cihazı kullanılarak lineer farklı genlik (LAS) testine tabi tutulmuştur. Bu deneyle, döngüsel yüklemeyi sistematik lineer yükleme genlikleri ile uygulayarak asfalt kaplamaların yorulma hasarına karşı olan direncini belirlemektedir. Genlik yayılımı AASHTO TP 101 standardına uygun olarak asfalt bağlayıcılarda belirlenmiş performans derecesine göre orta sıcaklıkta (25°C) yapılmaktadır. Uzun dönem yaşlandırma (PAV) sonrası yapılan bu deneyde standartta belirlendiği gibi A ve B parametreleri elde edilir, böylece bağlayıcıların döngü ömrü (Nf) parametreleri tespit edilir.

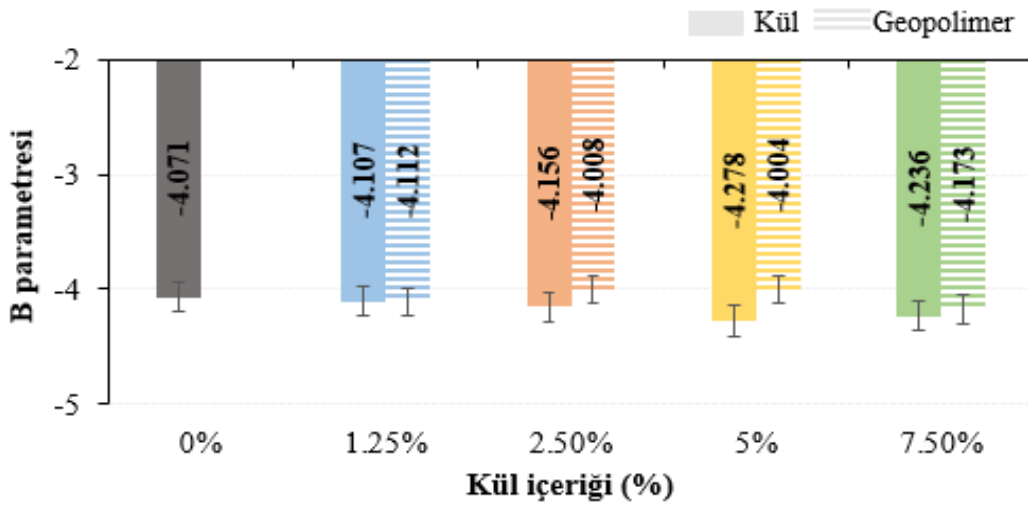
Çalışmada ilk olarak bağlayıcıların “A parametresi” belirlenmiştir. Bu parametre bağlayıcıların bütünlük koruma özelliğini göstermektedir. A parametresi yüksek olduğu zaman asfalt içeriği yükleme döngülerinde dağılmaz. Ardından, bağlayıcıların deformasyon seviyesi değişimine karşı duyarlılığını belirleyebilmek amacıyla “B parametresi” ve yorulma ömrü ya da yorulma bozulmasına uğrayan döngü (trafik) sayısı “Nf döngü ömrü” belirlenmiş ve tüm sonuçlar değerlendirilmiştir.

Saf, kül ve geopolimer katkıli bağlayıcıların A ve B parametresi değerleri Şekil 5.41 ve Şekil 5.42’de verilmiştir.



Şekil 5.41 : Bağlayıcıların A parametresi.

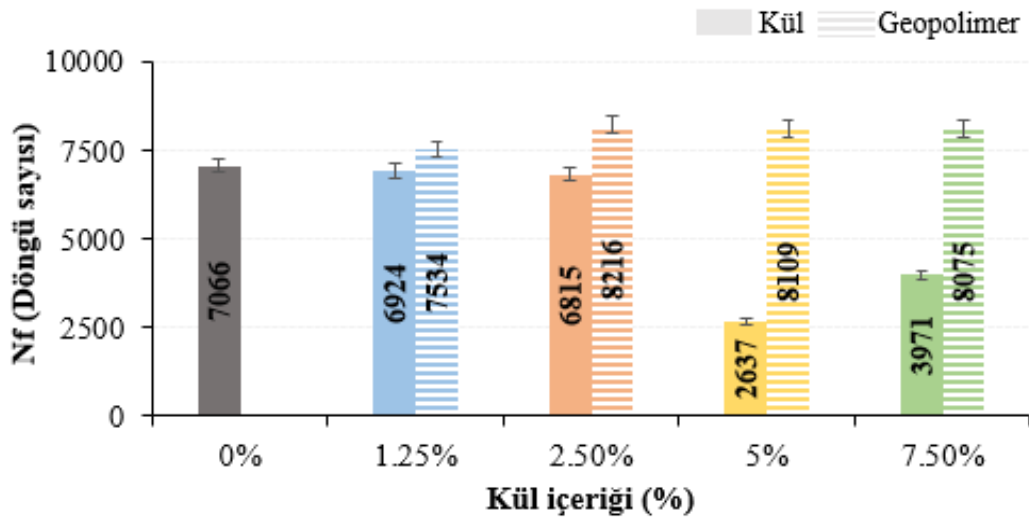
Şekil 5.41 incelendiğinde, saf bağlayıcıya kül eklendiğinde bağlayıcıların A parametresinin %2.5 kül oranına kadar arttığı ancak daha sonra azalmaya başladığı görülmektedir. Bu durum, kül'ün asfalt içerisinde homojen olarak karışmaması/erimemesi sebebiyle meydana gelmektedir. Özellikle %7.5 kül katkıli bağlayıcının A parametresi incelendiğinde, bağlayıcı bünyesinde mikro iskelet oluşması sebebiyle A parametresinde artış görülmüştür. Ancak, saf bağlayıcıya geopolimer eklendiğinde bağlayıcıların A parametresinin arttığı görülmektedir. Örneğin, saf bağlayıcının A parametresi 2.94E+05 iken %2.5 geopolimer eklendiğinde bağlayıcının A parametresi 3.23E+05 olmuş ve parametre 1.10 kat artış göstermiştir. Bu sonuç, bağlayıcının bütünlüğünü korumada 1.10 kat artış meydana geldiği göstermektedir.



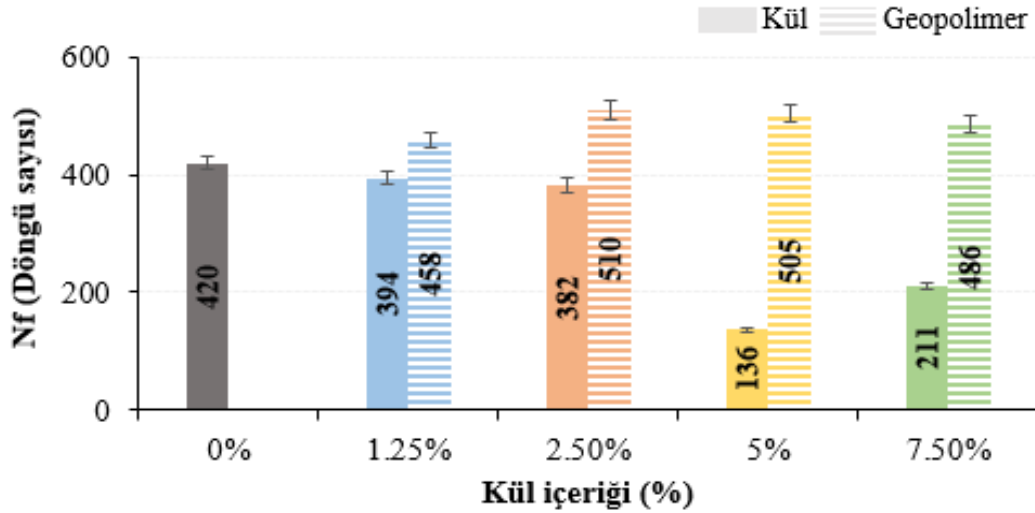
Şekil 5.42 : Bağlayıcıların B parametresi.

Şekil 5.42 incelendiğinde, kül katkılı bağlayıcıların B parametresinin saf bağlayıcıya kıyasla mutlak değerce artış gösterdiği görülmektedir. Örneğin, saf bağlayıcının B parametresinin mutlak değerinin 4.071 olduğu, kül artışıyla en yüksek %5 kül katkılı bağlayıcıda 4.278'e yükselmiştir. Bu sonuç, deformasyon seviyesi değişimine karşı duyarlılığının 1.05 kat arttığı anlamına gelmektedir. Geopolimer katkılı bağlayıcıların B parametresi incelendiğinde ise, saf bağlayıcıya kıyasla mutlak değerce B parametresinin azaldığı görülmektedir. Saf bağlayıcının B parametresinin 4.071'den %2.5 ve %5 geopolimer oranında sırasıyla 4.008 ve 4.004'e kadar düştüğü görülmektedir. B parametresinin azalması, bağlayıcının yorulma ömrünün arttığını göstermektedir. Sonuç olarak, %2.5 ve %5 geopolimer katkılı bağlayıcıların mutlak değer olarak B parametresinin diğer bağlayıcılara kıyasla daha düşük olması, bu bağlayıcıların şekil değiştirmeye karşı daha az duyarlı olduğunu ve yorulma ömrünün arttığını göstermektedir.

A ve B parametrelerinin %2.5 ve %5 deformasyon seviyesi sonucunda iki farklı Nf değeri elde edilmektedir. Burada deformasyon seviyesinin iki farklı düzeyde yapılmasının sebebi, tasarlanan kaplama tabakası kalınlığının farklı olmasındandır. Yani, tabaka kalınlığı 4 inç'den büyük olanlar tabakalar için deformasyon seviyesi %2.5 olarak alınırken (-ki bu tabakalara kalın tabaka denilmektedir) ve tabaka kalınlığı 4 inç'den küçük olan tabakalar (-ince tabaka olarak adlandırılırlar) için deformasyon seviyesi %5 olarak dikkate alınmaktadır [57,219]. Bu durumda, kül içeriğine bağlı olarak bağlayıcıların 2 farklı deformasyon seviyesindeki Nf değerleri Şekil 5.43 ve Şekil 5.44'de yer almaktadır.



Şekil 5.43 : Bağlayıcıların %2.5 deformasyon seviyesinde yorulma ömrü.



**Şekil 5.44 :** Bağlayıcıların %5 deformasyon seviyesinde yorulma ömrü.

Sonuçlar incelendiğinde, saf asfaltın Nf değeri %2.5 deformasyon seviyesinde 7066 döngüde (trafikte), %2.5 geopolimer katkılı bağlayıcı da Nf değeri 8216 döngü bitiminde yorulma bozulmasında uğramıştır. Buradan sonuçlar değerlendirildiğinde, 1.16 kat derecesinde bir artışın geopolimer katkısıyla sağlandığı görülmektedir. Bağlayıcıların %5 deformasyon seviyesinde döngü (trafik) sayıları incelendiğinde ise, saf bağlayıcının Nf değerinin 420 döngüde, %2.5 geopolimer bağlayıcının ise Nf değeri 510 döngü sonunda yorulma bozulmasına uğradığı görülmektedir. Bu sonuca göre, 1.21 kat derecesinde bir artışın geopolimer katkısıyla sağlandığı görülmektedir.

Her iki deformasyon seviyesi birlikte değerlendirildiğinde, kül katkılı bağlayıcıların döngü sayısını azalttığı, geopolimer katkılı bağlayıcıların ise döngü sayısını arttırdığı görülmektedir. Bununla birlikte, geopolimer katkılı bağlayıcıların kalın ve ince tabakaya ait yorulma ömrü üzerindeki etkisinin hemen hemen aynı seviyelerde olduğunu söylemek mümkündür.

#### 5.4.6 MSCR test sonuçları

Çoklu gerilmeli sünme geri dönme deneyi AASHTO T315 standardına göre kısa dönem yaşlandırılmış olan (RTFOT) numuneler üzerinde uygulanmaktadır. Bu deneyde, bağlayıcılar üzerinde 0.1 kPa ve 3.2 kPa sabit kayma gerilmelerinde 10 döngü yapılmaktadır. Her döngüde 1 saniye numune gerilmeye tabi tutulur ve 9 saniye geri dönme süresi uygulanır. MSCR deneyinde “geri dönmeyen sünme uygunluğu” ( $J_{nr}$ ) ve “geri kazanılan deformasyon” (R) sonuçları elde edilmektedir. Her iki kayma gerilmenin  $J_{nr}$  farkları ( $J_{nr\_diff}$ ) ve geri dönme farklarına ( $\%R_{diff}$ ) göre tek dingil yüklemeye (ESAL) karşılık sınıflandırma

yaşanmaktadır. Belirlenen tüm bu parametreler kullanılarak, standart Superpave şartnamesinde yer alan yüksek sıcaklık performans sınıfı (PG) belirlenmesine ikinci bir sınıflandırma yapılabilmektedir. Bununla birlikte, bağlayıcı üzerinde gerçekleştirilen polimer modifikasyonun yeteri düzeyde olup olmadığı da saptanabilmektedir [37].

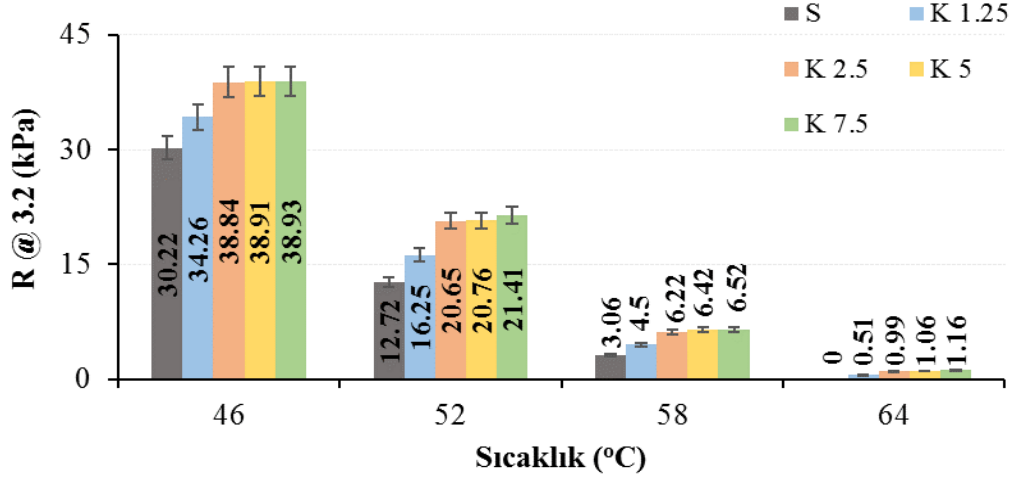
Bu çalışmada, bağlayıcılar 46, 52, 58, 64 ve 70°C sıcaklıklarda MSCR deneyine tabi tutulmuştur. İlk olarak, elde edilen R sonuçları Çizelge 5.19’da verilmiştir.

**Çizelge 5.19 : MSCR deneyi R (kPa<sup>-1</sup>) sonuçları.**

Bağlayıcı türü	Yük (kPa)	Sıcaklık (°C)				
		46	52	58	64	70
S	0.1	41.37	30.09	19.99	11.53	-
	3.2	30.22	12.72	3.06	0.00	-
K 1.25	0.1	45.24	33.21	21.68	13.5	-
	3.2	34.26	16.25	4.50	0.51	-
K 2.5	0.1	48.59	37.38	25.93	17.01	-
	3.2	38.84	20.65	6.22	0.99	-
K 5	0.1	44.95	33.94	22.75	13.59	-
	3.2	38.91	20.76	6.42	1.06	-
K 7.5	0.1	48.74	36.48	25.22	15.81	-
	3.2	38.93	21.41	6.52	1.16	-
G 1.25	0.1	50.25	39.26	27.05	18.52	-
	3.2	42.31	24.31	10.84	2.80	-
G 2.5	0.1	59.88	48.64	36.58	25.53	16.26
	3.2	53.43	36.33	17.06	4.70	0.30
G 5	0.1	58.56	47.73	35.7	24.9	15.73
	3.2	57.91	39.22	19.35	4.86	0.78
G 7.5	0.1	67.08	54.07	40.87	28.91	18.87
	3.2	61.52	43.56	22.88	7.36	1.49

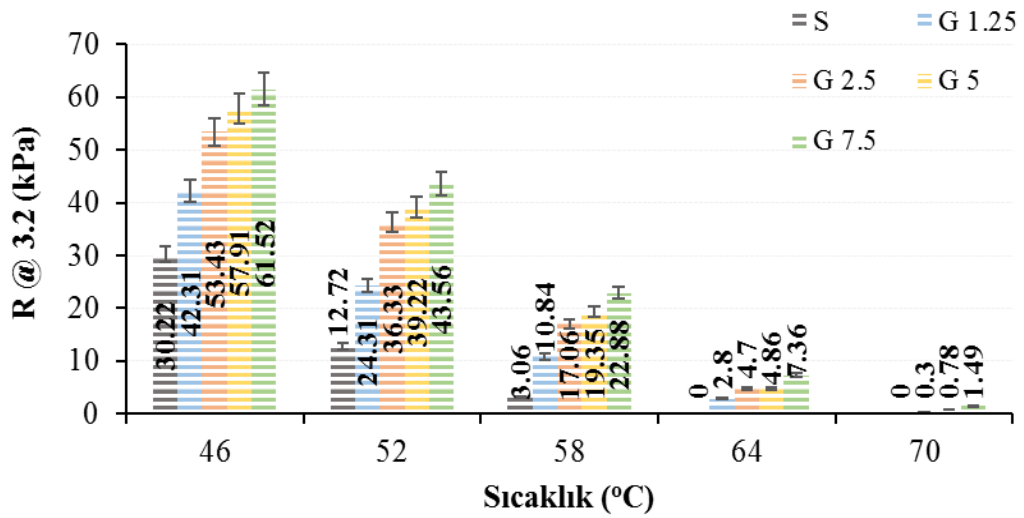
Çalışmada kullanılan saf, kül ve geopolimer katkıli bağlayıcıların %R sonuçlarından anlaşıldığı gibi tüm bağlayıcıların sıcaklık ve yük artışı ile %R değerlerinde azalma, ancak katkı oranı artışı ile %R değerlerinde artışlar meydana geldiği görülmektedir. Bununla birlikte, tüm bağlayıcılarda 0.1 kPa’da elde edilen R değeri, 3.2 kPa’da elde edilen R değerinden daha yüksek çıkmıştır. Bu sonuçlar, çalışmada kullanılan kül ve geopolimer oranlarının daha yüksek kullanılması durumunda bağlayıcının performansında daha az etkili olduğunu [22] göstermektedir.

Kül ve geopolimer katkılarının bağlayıcıların üzerinde etkisinin daha iyi anlaşılabilmesi amacıyla 3.2 kPa'da daha yüksek gerilme ve yüklemeye sebep olan R@3.2'nin sıcaklığa bağlı olarak değişimi Şekil 5.45 ve Şekil 5.46'da verilmiştir.



Şekil 5.45 : Kül katkılı bağlayıcıların geri kazanım deformasyonu (R@3.2).

Şekil 5.45'de kül katkılı bağlayıcıların R @3.2 sonuçları değerlendirildiğinde, kül katkılı bağlayıcıların tüm sıcaklıklarda saf bağlayıcıya kıyasla R değerlerinin arttığı görülmektedir. Örneğin; 52°C sıcaklıkta saf bağlayıcının geri kazanım oranı 12.72 iken, %7 kül katkılı bağlayıcıda bu oran 21.41'e kadar yükselmiş ve 1.68 kat artış göstermiştir.



Şekil 5.46 : Geopolimer katkılı bağlayıcıların geri kazanım deformasyonu (R@3.2).

Şekil 5.46'da elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde ise, tüm sıcaklıklarda geopolimer katkı artışıyla R değerlerinin arttığı görülmüştür. Yine örneklendirecek olursak,

52°C sıcaklıkta saf bağlayıcının geri kazanım oranı 12.72 iken, %7 geopolimer katkıli bağlayıcıda bu oran 43.56'ya kadar yükselmiş ve 3.42 kat artış göstermiştir.

Sonuç olarak, kül ve geopolimer katkıli bağlayıcıların katkı oranının artışı ile farklı sıcaklık ve iki farklı yükleme durumunda kıyaslama yapıldığında, kül katkıli bağlayıcıların geopolimer katkıli bağlayıcılara kıyasla daha az geri kazanım deformasyonuna sebep olduğu, geopolimer katkıli bağlayıcıların kül katkıli bağlayıcılara göre daha iyi performans sergilediği belirlenmiştir.

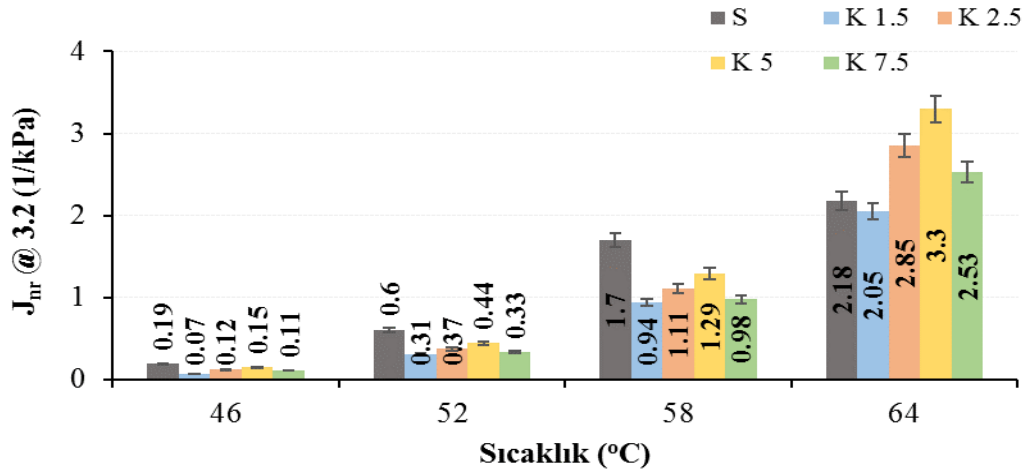
Saf, kül ve geopolimer katkıli bağlayıcıların geri dönmeyen sünme uygunluğu yani "J<sub>nr</sub>" sonuçları Çizelge 5.20'de, bu bağlayıcıların J@3.2 değerlerinin sıcaklığa göre değişimi ise Şekil 5.47 ve Şekil 5.48'de verilmiştir.

**Çizelge 5.20 : MSCR deneyi J<sub>nr</sub> (kPa<sup>-1</sup>) sonuçları.**

Bağlayıcı türü	Yük (kPa)	Sıcaklık (°C)				
		46	52	58	64	70
S	0.1	0.16	0.45	1.16	1.81	-
	3.2	0.19	0.60	1.70	2.18	-
K 1.5	0.1	0.06	0.21	0.59	1.27	-
	3.2	0.07	0.31	0.94	2.05	-
K 2.5	0.1	0.10	0.28	0.75	1.83	-
	3.2	0.12	0.37	1.11	2.85	-
K 5	0.1	0.12	0.33	0.88	2.19	-
	3.2	0.15	0.44	1.29	3.30	-
K 7.5	0.1	0.09	0.25	0.68	1.67	-
	3.2	0.11	0.33	0.98	2.53	-
G 1.25	0.1	0.02	0.11	0.28	0.57	1.86
	3.2	0.02	0.13	0.36	2.05	2.95
G 2.5	0.1	0.04	0.13	0.35	0.91	2.19
	3.2	0.05	0.16	0.50	1.42	3.56
G 5	0.1	0.05	0.13	0.35	0.90	2.16
	3.2	0.05	0.16	0.49	1.39	3.48
G 7.5	0.1	0.03	0.08	0.25	0.66	1.62
	3.2	0.03	0.10	0.34	1.02	2.61

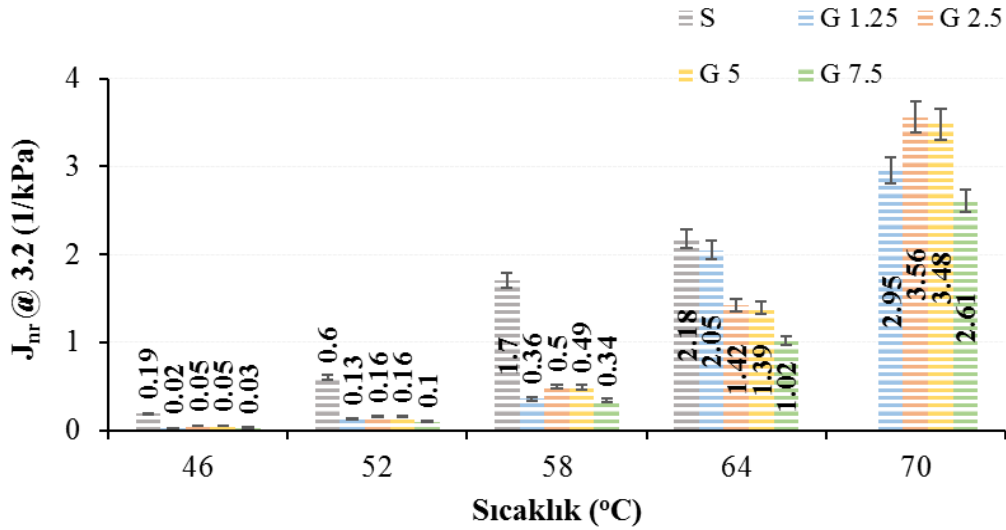
Çizelge 5.20 incelendiğinde, tüm kül ve geopolimer katkıli bağlayıcıların saf bağlayıcıya kıyasla katkıların eklenmesiyle geri dönmeyen sünme uygunluğu yani J<sub>nr</sub>

değerlerinde azalmalar olduğu görülmektedir.  $J_{nr}$  değerindeki azalması bağlayıcının kalıcı deformasyonun daha az olacağını göstermektedir [37].



Şekil 5.47 : Kül katkıli bağlayıcıların  $J@3.2$ -sıcaklık değerleri.

Şekil 5.47’de kül katkıli bağlayıcıların değerleri incelendiğinde, katkı oranı ve sıcaklık artışı  $J_{nr}$  değerlerinin arttığı, ancak saf bağlayıcıya kıyasla kül katkıli bağlayıcıların  $J_{nr}$  değerlerinin daha az olduğu görülmektedir. Örneğin; 58°C sıcaklıkta saf bağlayıcının  $J_{nr}$  değeri 1.7 iken kül katkıli bağlayıcı da bu değer maks. 1.29 olarak elde edilmiştir.



Şekil 5.48 : Geopolimer katkıli bağlayıcıların  $J@3.2$ -sıcaklık değerleri.

Şekil 5.48 incelendiğinde, katkı oranı ve sıcaklık artışı ile geopolimer katkıli bağlayıcıların  $J_{nr}$  değerlerinin arttığı, ancak saf bağlayıcıya kıyasla  $J_{nr}$  değerlerinin daha az olduğu görülmektedir. Örneğin; 64°C sıcaklıkta saf bağlayıcının  $J_{nr}$  değeri 2.18 iken

geopolimer katkısıyla bu değer maks. 1.42 olarak elde edilmiştir. Sonuç olarak, kül ve geopolimer katkılı bağlayıcıların  $J_{nr}$  değerleri birbiriyle kıyaslandığında geopolimer katkılı bağlayıcıların  $J_{nr}$  değerlerinin kül katkılılara kıyasla daha az olduğu, bu sebeple geopolimer katkılı bağlayıcıların kalıcı deformasyonun daha az olacağını söylemek mümkündür.

AASHTO M332 standardına göre 3.2 gerilme seviyesinde tekerlek izi yani  $J_{nr}$  parametresinin aynı PG sınıfında farklı trafik seviyelerine göre sınıflandırılması MSCR PG plus olarak adlandırılmaktadır (Çizelge 5.21). Tüm bağlayıcıların klasik DSR PG,  $J_{nr}@3.2$  (1/kPa) ve MSCR PG plus sonuçları sınıflarına ait sonuçlar Çizelge 5.22’de, sıcaklığa bağlı olarak PG Plus değişimleri Şekil 5.49’da verilmiştir.

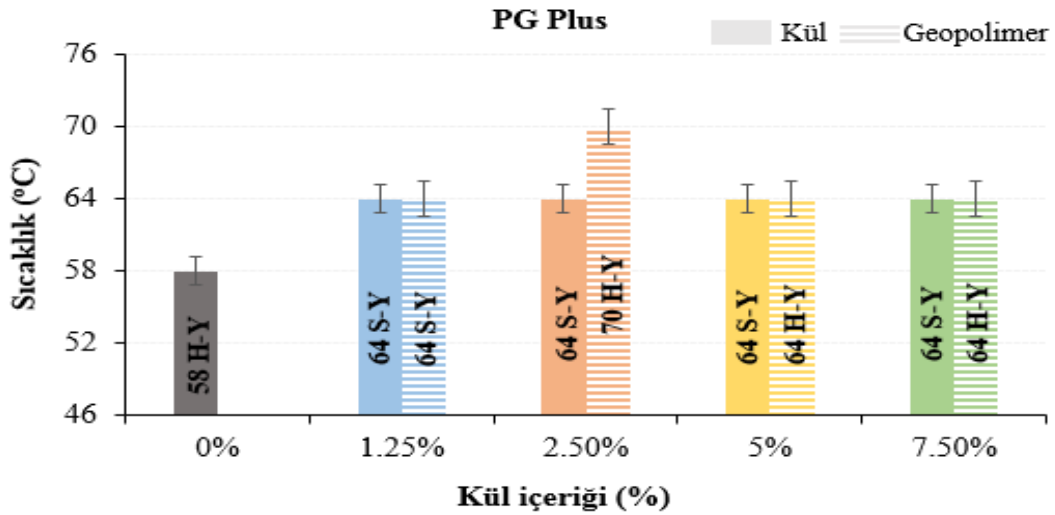
**Çizelge 5.21 : MSCR PG Plus adlandırması.**

Trafik seviyesi	Adlandırma
Standart (standard)	S
Ağır (heavy)	H
Çok ağır (very heavy)	V
Aşırı ağır (extremely heavy)	E

**Çizelge 5.22 : MSCR PG Plus adlandırması.**

Bağlayıcı türü	Klasik DSR PG	$J_{nr}@3.2$ (1/kPa)	MSCR PG Plus
S	PG 58-Y	1.70	58 H-Y
K 1.25	PG 64-Y	2.05	64 S-Y
K 2.5	PG 64-Y	2.85	64 S-Y
K 5	PG 64-Y	3.30	64 S-Y
K 7.5	PG 64-Y	2.53	64 S-Y
G 1.25	PG 64-Y	2.05	64 S-Y
G 2.5	PG 70-Y	1.42	70 H-Y
G 5	PG 64-Y	1.39	64 H-Y
G 7.5	PG 64-Y	1.02	64 H-Y

Çizelge 5.22 ve Şekil 5.49 birlikte değerlendirildiğinde, saf bağlayıcının 58°C sıcaklıkta ağır trafiğe, kül katkılı bağlayıcıların tüm oranlarda 64°C sıcaklıkta standart trafiğe, %1.25 geopolimer oranındaki bağlayıcının 64°C sıcaklıkta standart trafiğe, %2.5 geopolimer bağlayıcının 70°C sıcaklıkta ağır trafiğe, %5 ve %7.5 geopolimer bağlayıcılarının ise 64°C sıcaklıkta ağır trafiğe karşı dirençli olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuçlara göre, kül katkılı bağlayıcıların saf bağlayıcıya kıyasla, geopolimer katkılı bağlayıcıların ise hem saf ve hem de kül katkılı bağlayıcılara kıyasla daha yüksek sıcaklıklarda iyi performans gösterdiği söylenebilir.



Şekil 5.49 : Bağlayıcıların PG Plus sonuçları.

MSCR protokolünde bağlayıcıları sınıflandırmak için ikinci bir şart, 0.1 kPa ve 3.2 kPa'daki sünme uyumlulukları arasındaki fark ( $J_{nr\_diff}$ )'tır. Bu şarta göre, bağlayıcının %75'ten büyük yüzde farkına sahip olması, onun tekerlek izine karşı daha duyarlı olduğunu ifade etmektedir. Çalışmada, saf, kül ve geopolimer katkılı bağlayıcıların  $J_{nr\_diff}$  ve  $\%R_{diff}$  değerleri Çizelge 5.23'de verilmiştir.

Çizelge 5.23 : Bağlayıcıların  $J_{nr\_diff}$  ve  $\%R_{diff}$  değerleri.

Bağlayıcı türü	Yük (kPa)	Sıcaklık (°C)				
		46	52	58	64	70
S	$J_{nr\_diff}$	20.37	35.64	45.76	48.66	-
	$\%R_{diff}$	26.97	57.73	84.71	100.0	-
K 1.5	$J_{nr\_diff}$	19.15	31.26	41.23	49.26	-
	$\%R_{diff}$	19.87	38.94	71.08	91.54	-
K 2.5	$J_{nr\_diff}$	19.38	33.73	47.61	55.87	-
	$\%R_{diff}$	20.05	44.76	76.02	94.19	-
K 5	$J_{nr\_diff}$	20.30	35.13	46.58	50.43	-
	$\%R_{diff}$	23.96	50.62	79.76	98.07	-
K 7.5	$J_{nr\_diff}$	19.65	32.60	44.69	51.03	-
	$\%R_{diff}$	20.12	44.04	74.14	92.68	-
G 1.25	$J_{nr\_diff}$	15.21	23.16	40.87	53.59	61.10
	$\%R_{diff}$	9.24	21.04	53.25	78.25	98.05
G 2.5	$J_{nr\_diff}$	15.88	25.67	41.48	56.23	62.33
	$\%R_{diff}$	10.77	25.30	53.26	81.61	98.17
G 5	$J_{nr\_diff}$	15.49	25.84	40.68	54.73	61.08
	$\%R_{diff}$	51.36	26.20	54.20	81.69	98.24
G 7.5	$J_{nr\_diff}$	18.07	24.28	38.18	53.98	61.22
	$\%R_{diff}$	8.29	19.44	44.02	74.54	92.10

Yüksek  $J_{nr\_diff}$  sonucu bağlayıcının artan yüklemeye karşı duyarlı olduğunu, düşük  $\%R_{diff}$  sonuçları artan kayma gerilmelerine karşı elastik özelliğini yitirmediğini göstermektedir. Çizelge 5.23 incelediğinde, saf ve kül katkılı bağlayıcıların 52°C ve altındaki sıcaklıklarda modifiye bağlayıcıların  $J_{nr\_diff}$  ve  $\%R_{diff}$  değeri saf bağlayıcıya göre daha düşük elde edildiği görülmektedir. Bununla birlikte 58°C sıcaklıkta %7.5 kül katkılı bağlayıcı diğer bağlayıcılardan daha düşük sonuçlar sergilemiştir (daha düşük  $\%R_{diff}$ ). Sonuç olarak, sıcaklığın artmasıyla 64°C sıcaklıkta kül katkılı bağlayıcılar saf bağlayıcıya kıyasla kalıcı deformasyonlara karşı daha duyarlı olsa da  $\%R_{diff}$  kriteri açısından daha iyi performanslar sergilemişlerdir.

Saf ve geopolimer katkılı bağlayıcıların sonuçları incelendiğinde ise, 58°C ve altındaki sıcaklıklarda modifiye bağlayıcıların saf bağlayıcıya kıyasla düşük  $J_{nr\_diff}$  değerlerine ve düşük  $\%R_{diff}$  değerlerine sahip oldukları tespit edilmiştir. Fakat modifiye bağlayıcıların artan sıcaklık etkisi (64°C sıcaklık ve sonrasında) ile  $J_{nr\_diff}$  sonuçları saf bağlayıcıya kıyasla daha yüksek,  $\%R_{diff}$  değerleri ise daha düşük elde edilmiştir. Başka bir deyişle katkı oranının artışı geopolimer katkılı bağlayıcılarda kalıcı deformasyonlara karşı direnç sağlamıştır.

## **5.5 Bağlayıcıların Karakterizasyon Sonuçları**

Bu çalışmada, saf asfaltın mikroyapısal özellikleri üzerinde çöp atığı külü (ÇAK) ve alkali aktivatör (AA)'ün etkilerini belirleyebilmek amacıyla hazırlanmış olan kül ve geopolimer katkılı bağlayıcılar üzerinde taramalı elektron mikroskobu (SEM), X-ışını difraksiyonu (XRD), fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FT-IR) ve element analizi (C,H,N,S) testleri yapılmıştır. Tüm testler İnönü Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Merkezi (İBTAM) laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

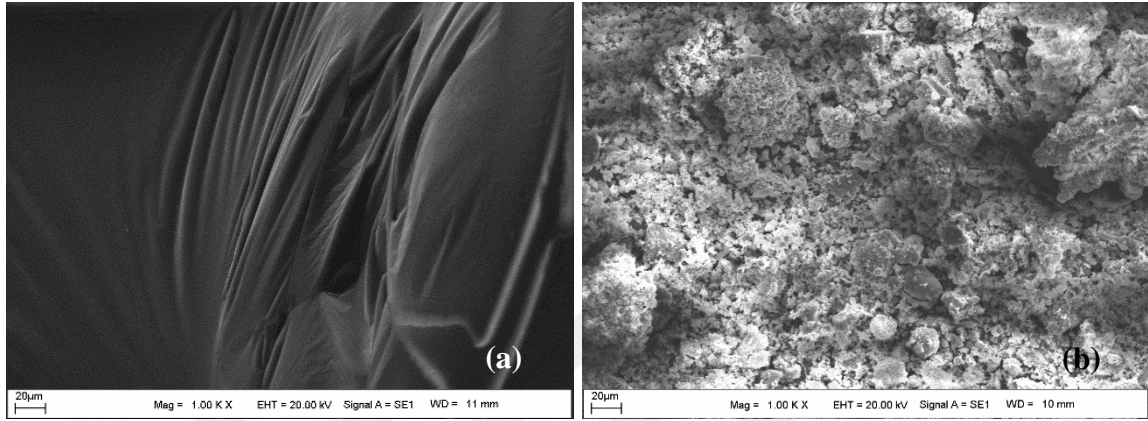
### **5.5.1 Yaşlandırılmamış bağlayıcıların sonuçları**

Çalışmada saf bağlayıcı, kül ve modifiye edilmiş yaşlandırılmamış (orijinal) bağlayıcılara ait SEM, XRD, FT-IR spektroskopisi ve elementel analiz sonuçları aşağıda alt başlıklar halinde verilmiştir.

### 5.5.1.1. SEM analizi sonuçları

Çalışmada, saf asfalt (S), kül (ÇAK) ve kül katkıli bağlayıcılar ( K 1.25, K 2.5, K5 ve K 7.5) ile geopolimer katkıli bağlayıcıların (G 1.25, G 2.5, G5 ve G 7.5) tamamı üzerinde SEM analizleri, Zeiss EVO 40 cihazı ile gerçekleştirilmiştir.

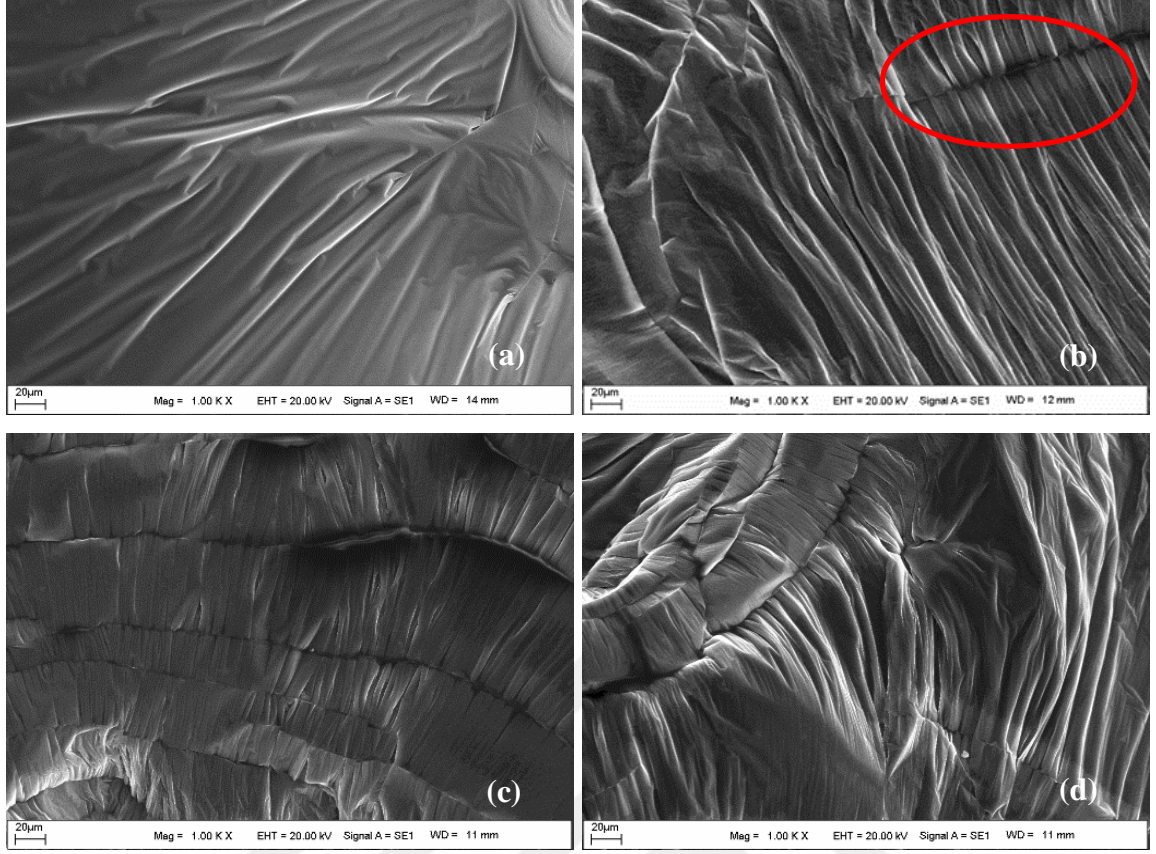
Saf asfalt ve ÇAK'a ait SEM görüntüleri Şekil 5.50'de, bağlayıcılara ait görüntüler ise Şekil 5.51 ve Şekil 5.52'de verilmiştir.



Şekil 5.50 : (a) Saf asfalt (b) ÇAK.

Saf asfalta ait SEM görüntüsü incelendiğinde, yapının oldukça homojen ve tek fazlı tek bir makromoleküler yapıda olduğu görülmektedir. Bağlayıcı yapısında görülen hafif büzülmelerin bağlayıcının kuruması esnasında oluştuğu, büzülmeler arasındaki düzensizliklerin ise yapıda bulunan kristalin bölgelerin varlığı ile açıklanabilir. ÇAK'ın SEM görüntüleri incelendiğinde ise büyük oranda homojen bir yapıya sahip olduğu ancak yapıda inorganik yapıların da mevcut olduğu, özellikle şekilsiz kül bileşenlerinin altında düzgün geometrik şekillere sahip yapıların da mevcut olduğu görülmektedir.

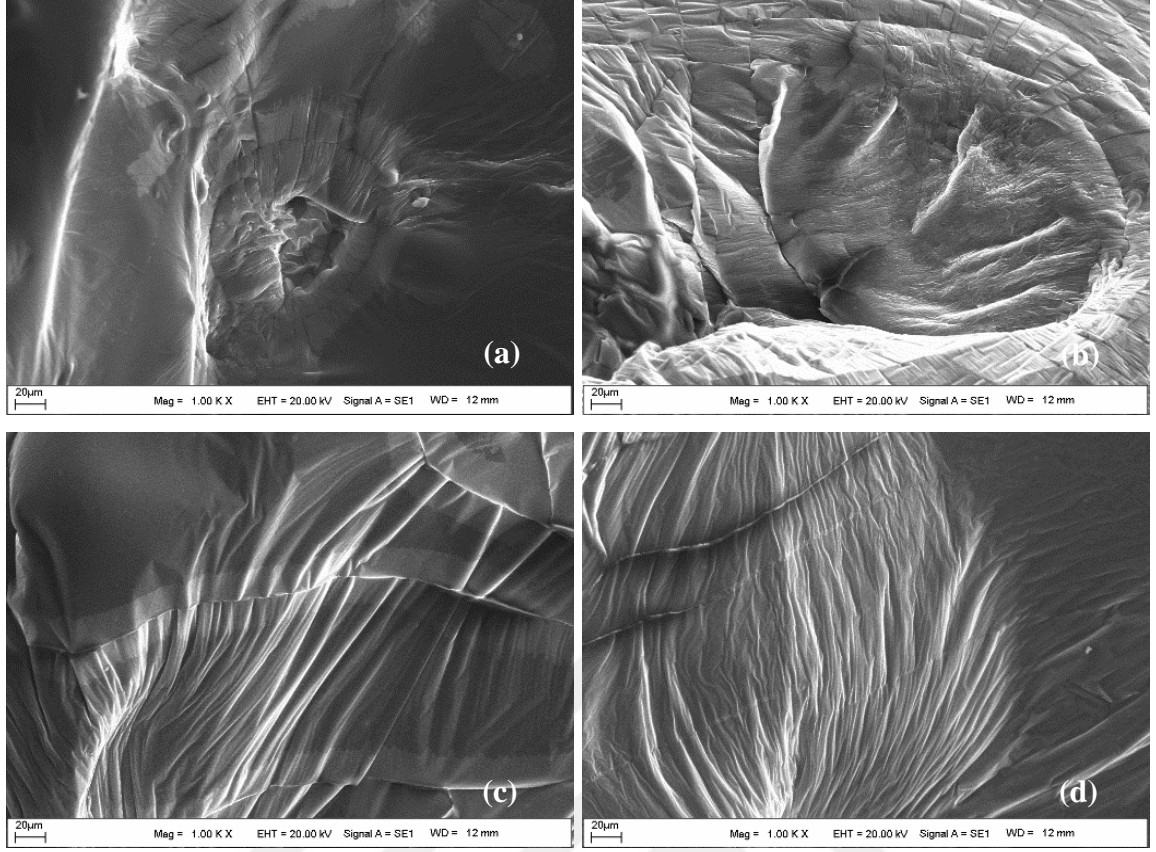
Şekil 5.51 incelendiğinde, kül oranı artışıyla bağlayıcıların yapısındaki büzülmelerin artış gösterdiği, hatta %2.5 oranından sonra sınır bölgelerin oluştuğu ve bunların arttığı görülmektedir. Bu durumun, bağlayıcı bünyesinde yer alan kristalin bölgeler sebebiyle meydana geldiği değerlendirilmektedir. Bununla birlikte, kül katkıli bağlayıcılarda genel olarak homojenliğin korunduğu, asfalt+kül harmanının tek fazlı bir yapıda olduğu görülmektedir.



**Şekil 5.51 :** (a) K 1.25 (b) K 2.5 (c) K 5 ve (d) K 7.5 bağlayıcılarına ait SEM görüntüleri.

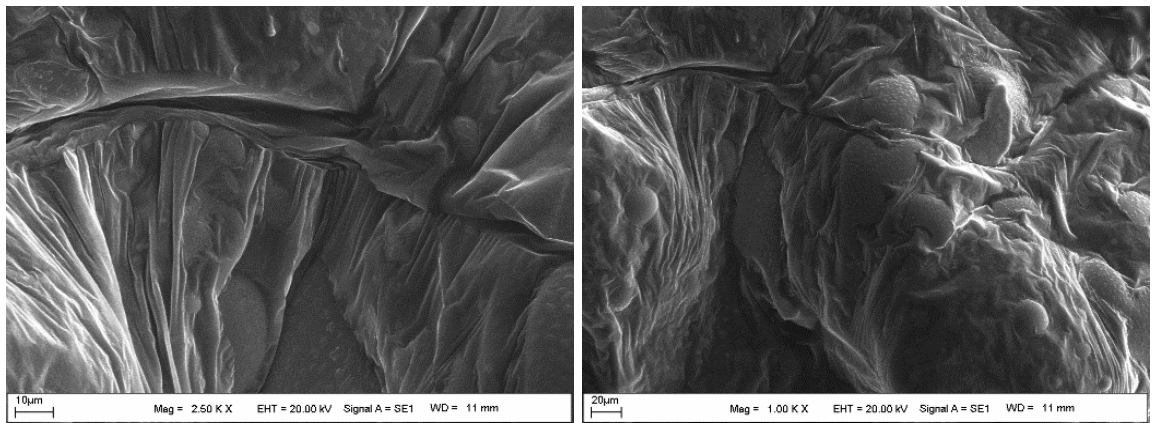
Çalışmada, %2.5 kül oranının fiziksel ve reolojik test sonuçlarında kritik bir oran olduğu göz önüne alınarak alkali aktivatör (AA) oranının belirlenmesinde %2.5 kül oranı esas alındı ve AA'nın bağlayıcı üzerindeki etkisi bu kül oranına göre belirlenmeye çalışılmıştır.

Şekil 5.52 incelendiğinde, AA oranı artışıyla bağlayıcı bünyesindeki büzölmelerin %40 AA oranına kadar arttığı ve bu büzölmelerde düzensizliklerin meydana geldiği, ancak bu orandan sonra büzölmelerin ve düzensizliklerin azaldığı görülmektedir. Bu büzölmelerin, bağlayıcı yapısında meydana gelen kristalin bölgelerin artış göstermesi sebebiyle meydana geldiği değerlendirilmektedir. Bu sonuçlardan, %45 AA oranının en etkin oran olduğu çıkarılmaktadır.



**Şekil 5.52 :** K 2.5 bağlayıcısına (a) %20 AA (b) %30 AA (c) %40 AA ve (d) %50AA ilaveli bağlayıcıların SEM görüntüleri.

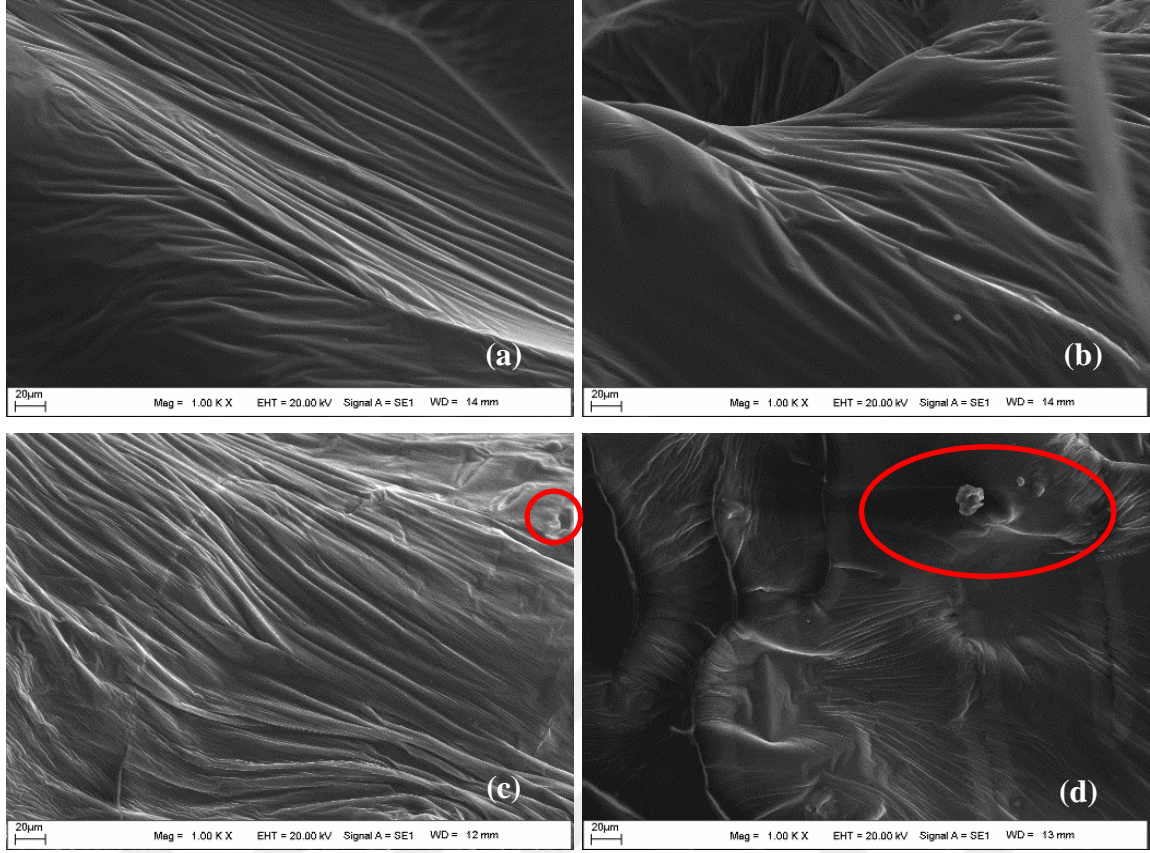
Kül oranına göre ağırlıkça belirlenmiş olan %45 AA oranının saf bağlayıcı üzerindeki etkisini belirleyebilmek amacıyla saf asfalt+%45AA için SEM görüntüsü Şekil 5.53’de, geopolimer katkılı bağlayıcıların SEM görüntüleri ise Şekil 5.54’de verilmiştir.



**Şekil 5.53 :** Saf asfalt+ %45 AA karışımına ait SEM görüntüleri.

Şekil 5.53 incelendiğinde, saf asfalta %45 AA ilavesi ile bağlayıcının karakteristik homojen ve tek fazlı yapısını koruduğu, AA (sodyum silikat)’nın yapısındaki kristalin

bölgelerin bağlayıcı ile karıştığına da artış gösterdiği ve bu sebeple asfalt+AA karışımında düzensizliklerin arttığı görülmektedir.

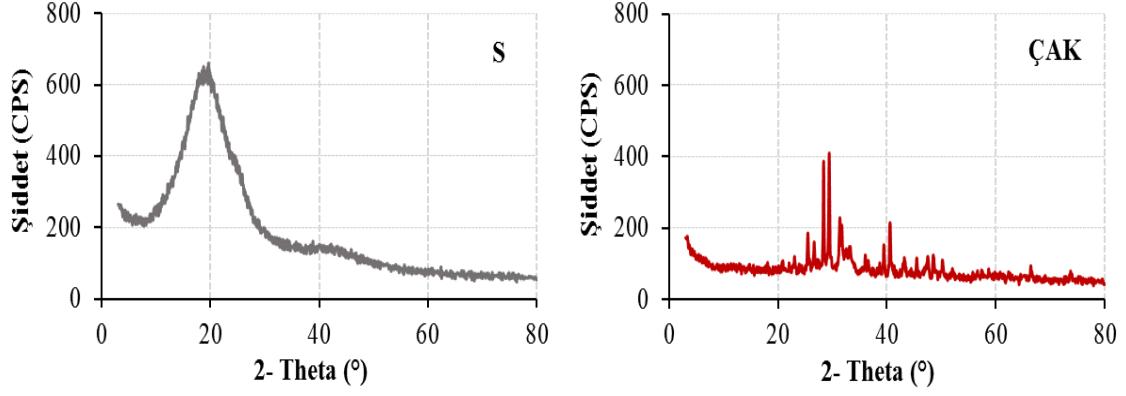


**Şekil 5.54 :** (a) G 1.25 (b) G 2.5 (c) G 5 ve (d) G 7.5 bağlayıcılarına ait SEM görüntüleri.

Şekil 5.54’de geopolimer katkı bağlayıcıların SEM görüntüleri incelendiğinde, %2.5 geopolimer oranına kadar bağlayıcıların homojen ve tek fazlı yapısını koruduğu, ancak bu orandan sonra homojenliğin bozulmaya başladığı görülmektedir. Bununla birlikte, %2.5 geopolimer oranından sonra bağlayıcı bünyesinde büzülmenin meydana geldiği ve düzensizliklerin oluştuğu görülmektedir. Bu durumda, hem homojen, tek fazlı yapının korunması hem de sınırların oluşmadığı en ideal geopolimer oranının %2.5 geopolimer katkı bağlayıcılar olduğu söylenebilir.

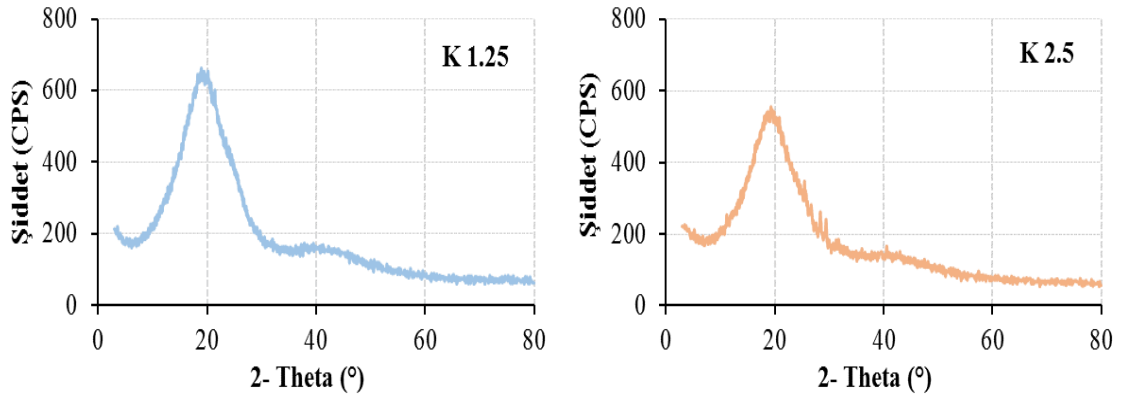
### 5.5.1.2 XRD analizi sonuçları

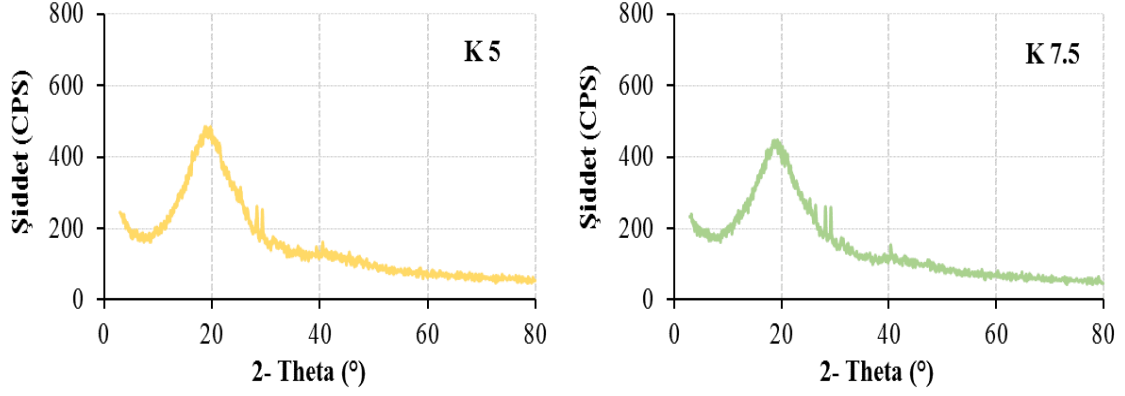
Bu çalışmada, kullanılan malzemeler ve hazırlanan modifiye bağlayıcıların tamamına CuK $\alpha$  radyasyonlu bir Rigaku Giegerflex D-Max / B toz difraktometre cihazı ile XRD analizi yapılmıştır. İlk olarak saf asfalt ve ÇAK için elde edilen XRD desenleri Şekil 5.55’de, bağlayıcıların XRD desenleri ise Şekil 5.56- Şekil 5.59’da verilmiştir.



**Şekil 5.55** : Saf asfalt ve çöp atığı külüne ait XRD deseni.

Saf asfaltın (S) XRD deseni incelendiğinde, elde edilen desenin asfalt bağlayıcılar için karakteristik bir yapıda olduğunu, ilk pikin kristalin  $2\theta \cong 20$  geniş ve yayvan olduğu; ikinci pikin ise  $2\theta \cong 43$  civarında ise geniş ve daha az alana sahip amorf piklerden oluştuğu görülmektedir. Ayrıca, saf asfaltın grafit ve grafen yapısında olduğu,  $2\theta \cong 20$  civarındaki grafitte ait olan geniş ve keskin pik incelendiğinde kısmen kristalin bölgelerin olduğu, ikinci pikte ise tamamen amorf bölgelerin olduğu görülmektedir. ÇAK örneğine ait XRD spektrumu incelendiğinde ise, külün inorganik yapıda olduğu ve farklı oksitlerin karışımı olması nedeniyle tamamen kristalin yapıda olduğu görülmektedir. ÇAK'ın kimyasal bileşimi dikkate alındığında (CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>O, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, MgO ana bileşenler) XRD spektrumu beklendiği gibi elde edilmiştir.

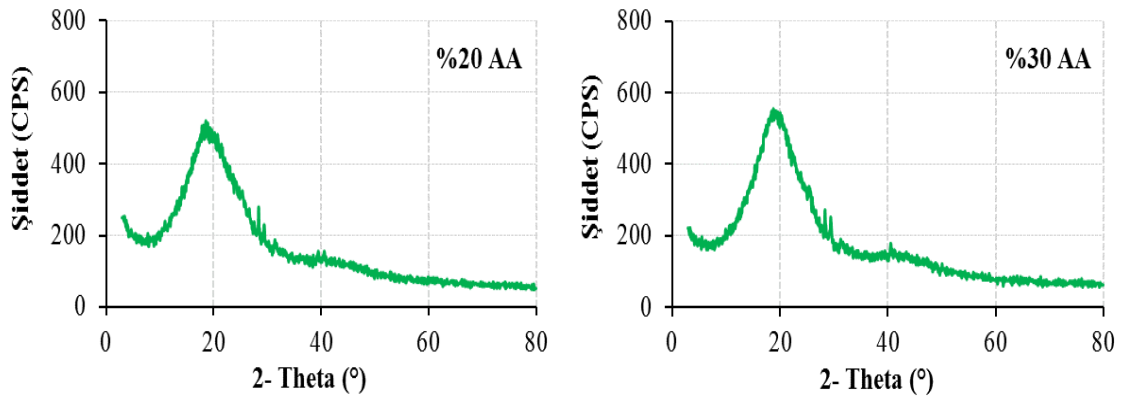


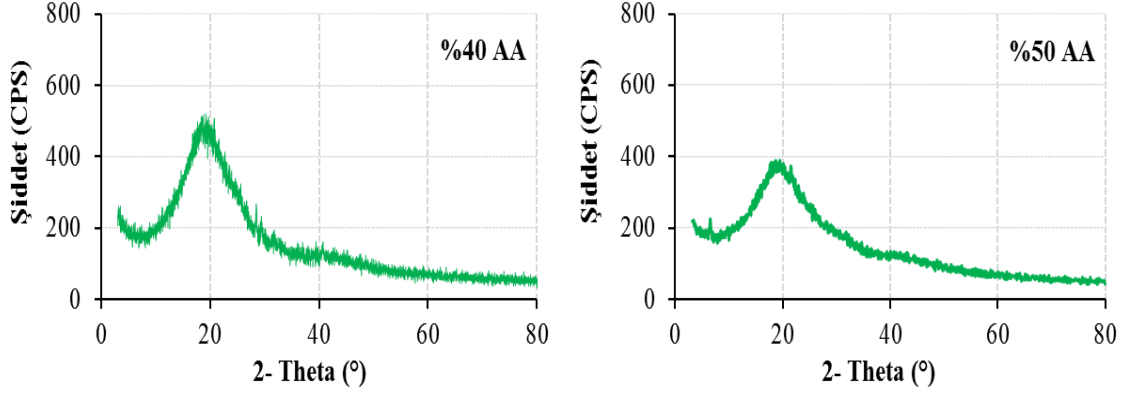


**Şekil 5.56 :** Kül katkılı bağlayıcılara ait XRD desenleri.

Kül katkılı bağlayıcıların XRD deseni incelendiğinde, kül oranı artışıyla bağlayıcıların ilk pik şiddetinde ( $2\theta \cong 20$  geniş) azalmalar meydana geldiği, ikinci pikte ise ( $2\theta \cong 40$  civarı) yayvanlaşmanın giderek arttığı görülmektedir. İlk pikte meydana gelen azalma bağlayıcı bünyesindeki kristalin bölgenin azaldığını, ikinci pikte meydana gelen yayvanlaşma ise amorfliğin giderek arttığını göstermektedir. Bu durum külün grafitik yapı içerisinde yer alması ve grafen yapıdan dolayı da bu yapı da değişikliğe sebep olmaması ile açıklanabilir. Ayrıca küle ait kristalin pikler %1.25 oranında görülmezken %2.5 oranından itibaren açıkça ortaya çıkmaktadır. Bu durum külün asfalt ile reaksiyona girmediği fakat yapıda özellikle grafit tabakaları arasında yayılım göstermesi ile açıklanabilir.

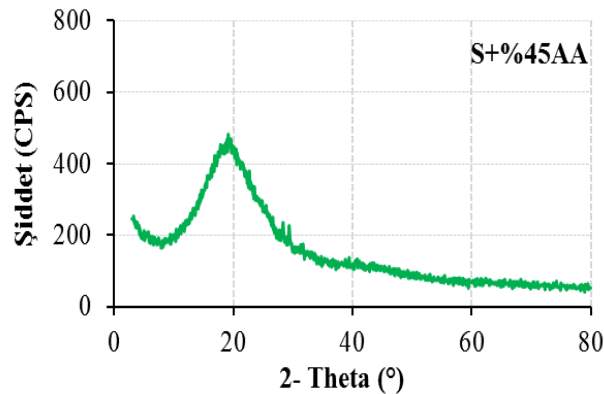
Küle ait kristalin piklerin %2.5 oranından itibaren görülmeye başlaması ve ayrıca SEM görüntülerinde de bu oranın kritik olması sebebiyle %2.5 kül oranı esas alınarak optimum AA oranı belirlenmeye çalışılmıştır.





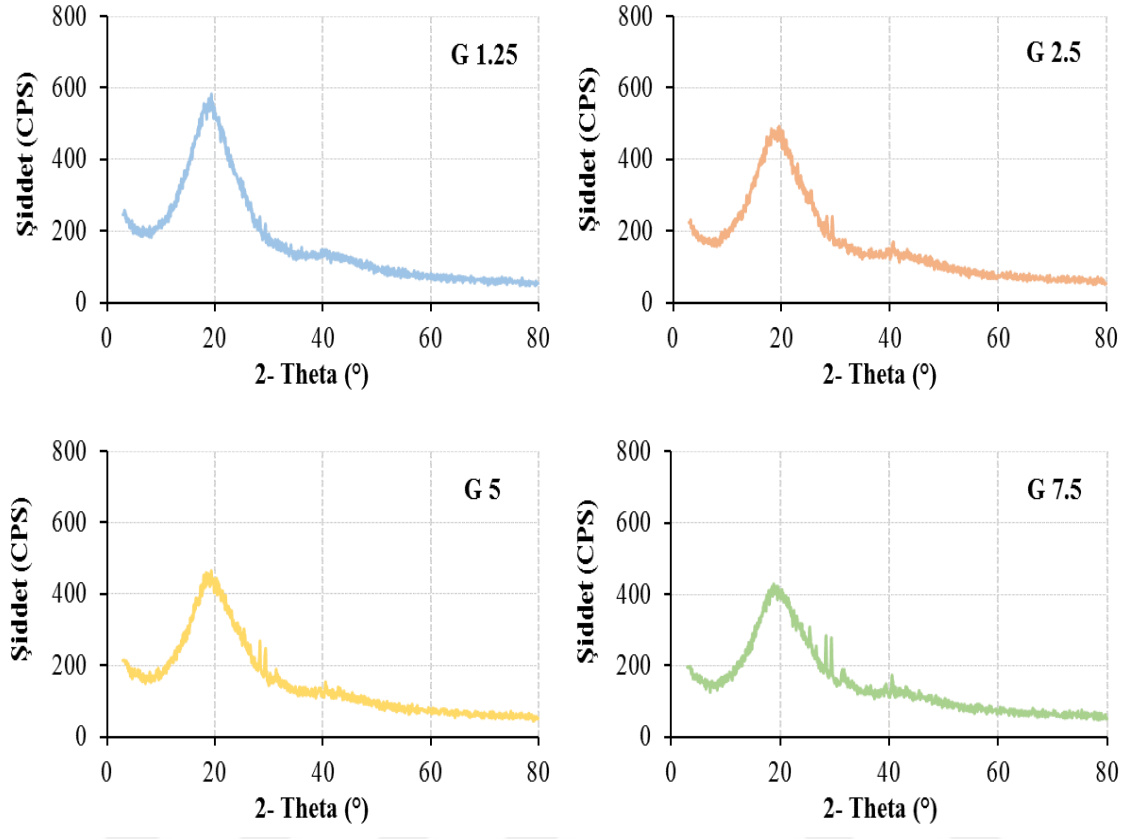
**Şekil 5.57 :** K 2.5 bağlayıcısına %20, %30, %40 ve %50AA ilaveli bağlayıcıların XRD desenleri.

Şekil 5.57 incelendiğinde K 2.5 bağlayıcısına farklı oranlarda AA ilave edildiğinde, AA artışıyla yayvan grafit pikinin azaldığı, grafen pikinin ise etkilenmediğini görülmektedir. AA'nın ortama ilave edilmesiyle başta kül ardından asfalt bileşenleri olmak üzere bir reaksiyon meydana getirdiği ifade edilebilir. AA'nın bazik yapıda olması, asfalt ile kimyasal reaksiyon meydana getirmesi kaçınılmazdır. Özellikle pik yüksekliklerinin büyük oranda azalması ortama ilave edilen AA'nın güçlü bazik yapısı sebebiyle asfalt ve kül ile meydana getirdiği kimyasal reaksiyonun olduğunu göstermektedir. Ayrıca, %50 oranında grafit pikinin çok fazla azalması sonucunda  $22 \cong 2\theta$  değerinde kül bileşenlerine ait kristalin pikin görünmesi bu görüşü desteklemektedir. Bununla birlikte, kül ile AA'nın kimyasal reaksiyonunda bileşen(lerin) kristal yapısı bozulmadığı için bu beklenen bir sonuçtur. Bu sonuçlara göre, XRD piklerinde meydana gelen en açık değişim %40 ve %50 oranlarında olduğundan AA oranı iki değerlerin ortalaması olarak alınmıştır.



**Şekil 5.58 :** Saf asfalt+ %45 AA karışımına ait XRD desenleri.

Nitekim Şekil 5.58 incelendiğinde, saf asfalt+%45 AA karışımında saf asfaltın XRD spektrumu %40 ve %50 oranlarının arasındaki bir değişimde uygun olarak görülmektedir.

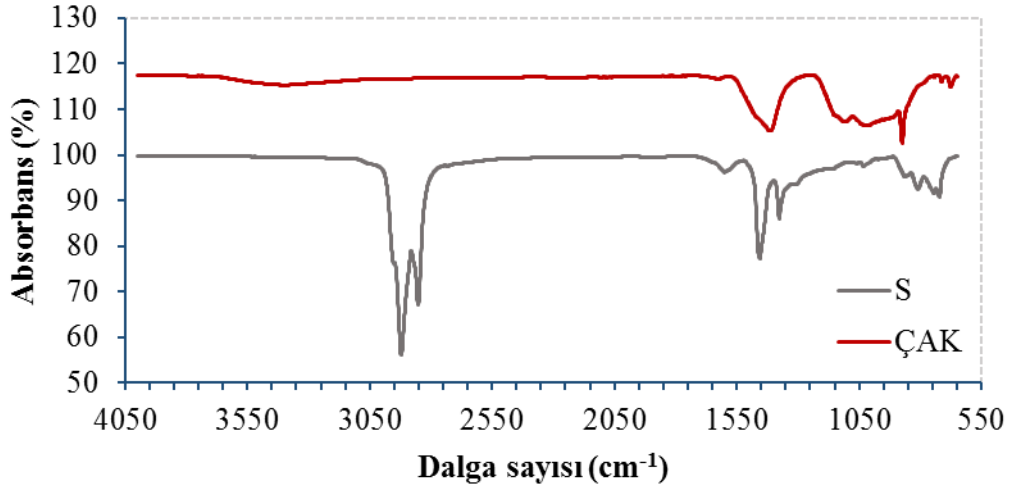


Şekil 5.59 : Geopolimer katkılı bağlayıcılara ait XRD desenleri.

Şekil 5.59 incelendiğinde, geopolimer oranı artışıyla bağlayıcıların ilk pik şiddetinde azalma meydana geldiği görülmektedir. Geopolimer oranı arttığında  $20 \cong 2\theta$ 'daki pik maksimumunun düştüğü ve pikin yayvanlaştığı görülmektedir (özellikle %2.5 oranından sonra). Kristalin piklerin daha belirginleşmesi ortamdaki geopolimer konsantrasyonun artmasına bağlı olsa da Şekil 5.57 dikkate alındığında piklerdeki azalmanın ortama ilave edilen AA'nın konsantrasyonundan bağımsız olarak kimyasal reaksiyonun olduğunun bir göstergesidir.

### 5.5.1.3 FT-IR spektroskopisi sonuçları

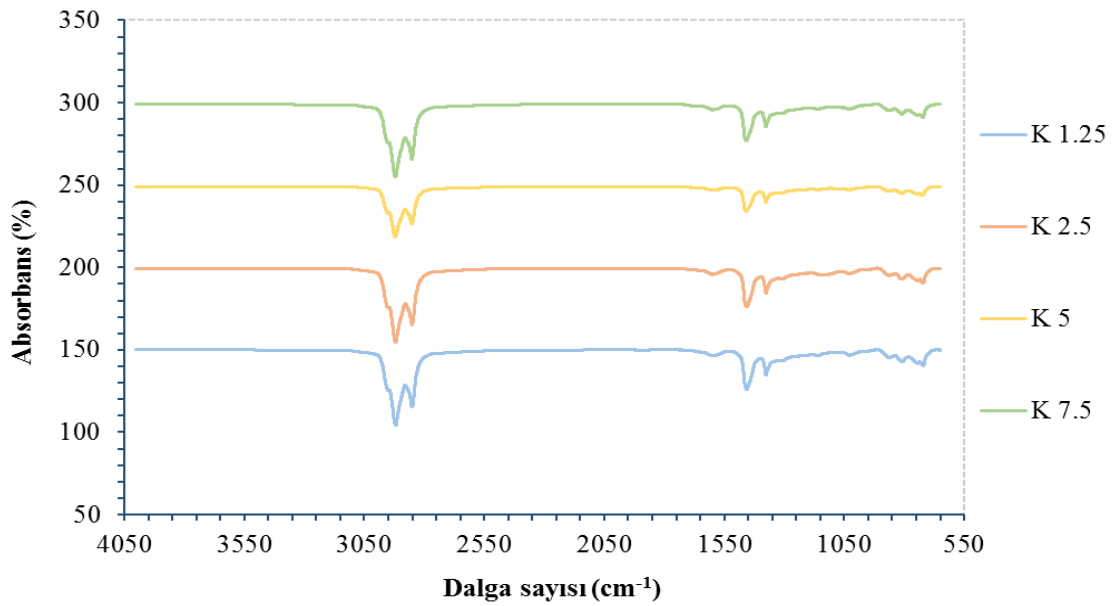
Çalışmada karışımında kullanılan malzemeler ve modifiye bağlayıcıların FT-IR spektroskopisi "PerkinElmer Spectrum One" cihazı ile  $500-4000 \text{ cm}^{-1}$  dalgaboyu aralığında yapılmıştır. İlk olarak saf bağlayıcı ve ÇAK'a ait elde edilen sonuçlar Şekil 5.60'da verilmiştir.



Şekil 5.60 : Saf bağlayıcı ve ÇAK'ın FT-IR sonuçları.

Saf bağlayıcının FT-IR sonuçları incelendiğinde,  $2845\text{ cm}^{-1}$  ve  $2915\text{ cm}^{-1}$  dalga sayısındaki alifatik C-H pikleri belirgin olarak görülmektedir. Saf bağlayıcının  $1032\text{ cm}^{-1}$  deki piki çok küçükken,  $1456\text{ cm}^{-1}$  piki asfaltın yapısındaki  $\text{CH}_2$ 'den kaynaklanmaktadır. ÇAK'a ait FT-IR incelendiğinde, külün yapısındaki inorganik bileşenlere ait M-O ve M-O-M pikleri için  $1000\text{-}1100\text{ cm}^{-1}$  arasındaki geniş ve yayvan pik açıkça görülmektedir.  $3300\text{ cm}^{-1}$  bölgesindeki hafif yayvan pik ise yapıdaki suya ait -OH gerilmesine aittir.

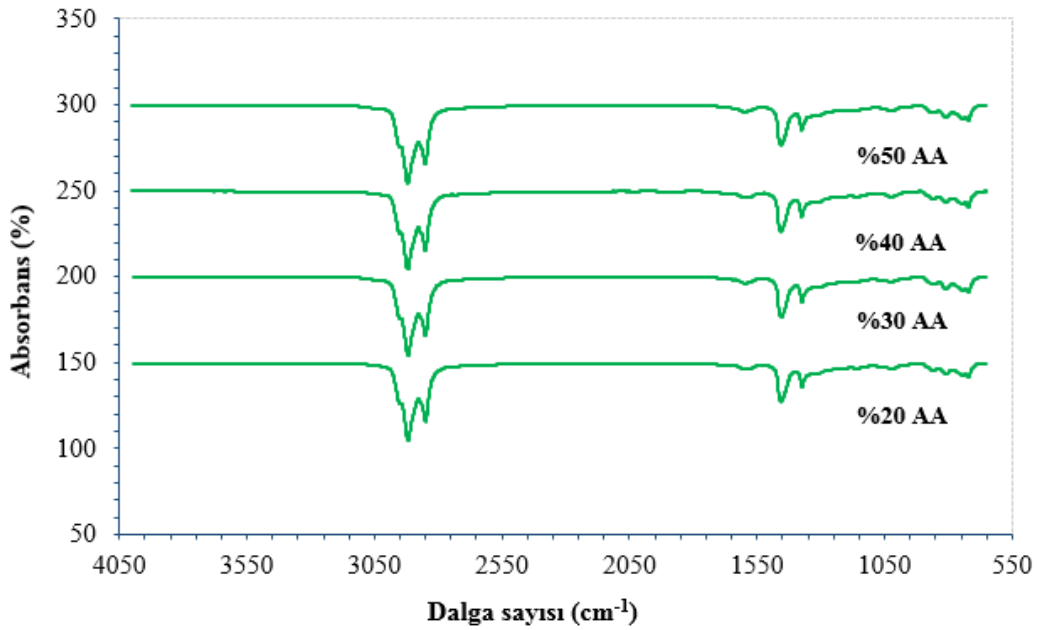
Saf bağlayıcı içerisine çeşitli oranlarda kül ilave edilerek hazırlanan kül katkılı bağlayıcıların FT-IR sonuçları Şekil 5.61'de verilmiştir.



Şekil 5.61 : Kül katkılı bağlayıcıların FT-IR sonuçları.

Şekil 5.61 incelendiğinde kül katkısının kül katkıli bağlayıcıların FTIR spektrumundaki temel piklerin pik yüksekliği, genişliği ve alanı üzerine önemli bir etkisi olmadığı görülmektedir. Bu durum beklenen bir sonuçtur çünkü kül katkıli bağlayıcı içerisinde asfalt ve kül arasında kimyasal bir etkileşim meydana gelmemiştir. Ancak burada, %2.5 kül oranında bağlayıcının 1100  $\text{cm}^{-1}$  pikinde küçük bir değişiklik olduğu görülmektedir. Nitekim, XRD deseninde de olduğu gibi bu oranda kristalinliğin az da olsa artmasının bu pikteki değişimle meydana geldiği düşünülmektedir.

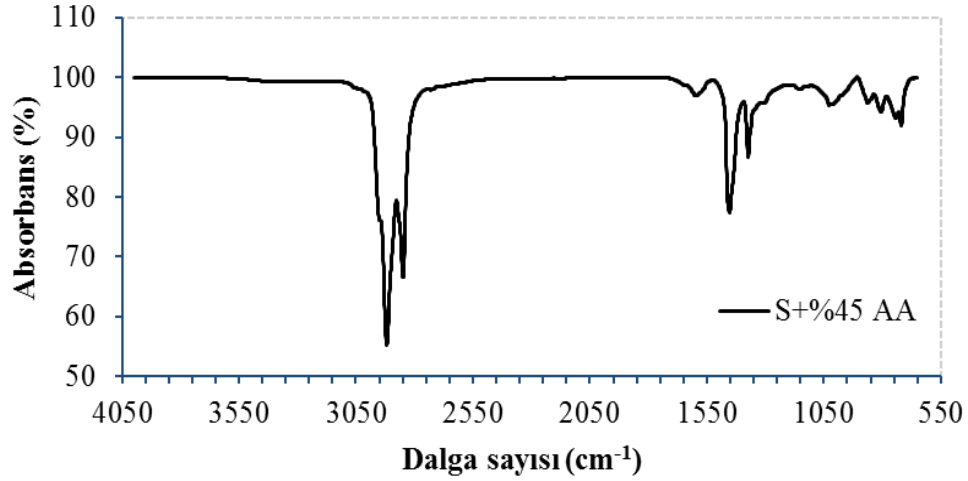
Şekil 5.62’de %2.5 kül katkıli bağlayıcıya çeşitli oranlarda AA ilave edilmesiyle elde edilen bağlayıcılara ait FT-IR sonuçları verilmiştir.



Şekil 5.62 : K 2.5+ %20, %30, %40 ve %50AA ilaveli bağlayıcıların FT-IR sonuçları.

Şekil 5.62 incelendiğinde, Şekil 5.61’de olduğu gibi büyük değişikliklerin meydana gelmediği görülmektedir. Ancak özellikle %40 ve %50 AA oranında AA ilavesiyle 1000  $\text{cm}^{-1}$  civarındaki M-O ve M-O-M yapılara ait geniş ve şiddeti düşük olan pik bölgesinde çok azda olsa değişiklikler görülmüştür. Bu durum alkali aktivatör-kül etkileşiminin olması ile açıklanabilmektedir. Elde edilen sonuçlara göre, %40 ile %50 oranlarının aritmetik ortalamasının AA oranı olarak belirlenmesinin uygun olduğu burada da görülmektedir.

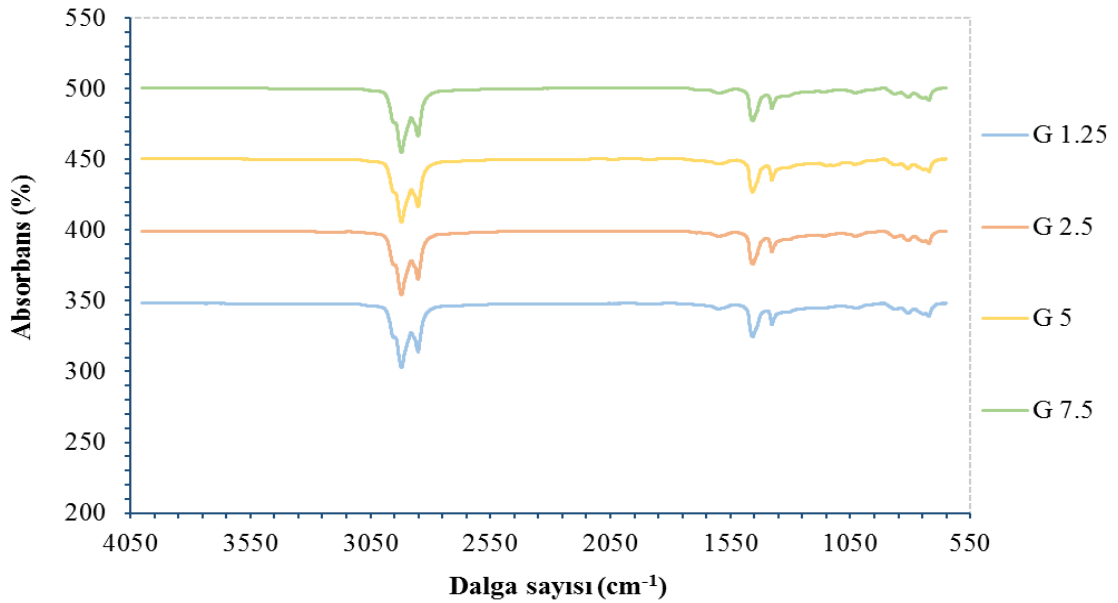
Şekil 5.63’de saf asfalta %45 oranında AA ilave edilmesi ile elde edilen bağlayıcının FT-IR sonuçları verilmiştir.



**Şekil 5.63** : Saf asfalt+ %45 AA karışımına ait FT-IR sonuçları.

Şekil 5.63 incelendiğinde saf asfalta AA ilavesinde alifatik C-H gerilmesine ait piklerde değişim olmazken diğer pik şiddetlerinde kısmen de olsa azalma meydana geldiği görülmektedir. Bu durum, AA ilavesi ile ortamda homojen dağılım sonucu diğer gerilmelere ait yapıların perdelenmesi ile açıklanabilir. Ayrıca sodyum silikata (AA) ait M-O ve M-O-M gerilmelerine ait  $1000\text{ cm}^{-1}$  geniş bandı S+%45AA bağlayıcısında oldukça küçülmüştür. Bu durum, sodyum silikatın asfalt ile reaksiyona girmesi ile açıklanabilmektedir.

Asfalt+kül+AA ilave edilerek hazırlanan geopolimer katkıli bağlayıcıların FT-IR sonuçları Şekil 5.64’de verilmiştir.



**Şekil 5.64** : Geopolimer katkıli bağlayıcıların FT-IR sonuçları.

Şekil 5.64 incelendiğinde asfalta kül ve alkali aktivatör ilavesinde FTIR yapısında açık bir değişim gözlenmezken FTIR spektrumları tek tek incelendiğinde G2.5 numunesinde 1100-1200  $\text{cm}^{-1}$  arasında açık bir pik görülmektedir. Bu durum, G2.5 bağlayıcısında kimyasal etkileşimin daha iyi olduğunu göstermektedir. Ayrıca, geopolimer katkıli bağlayıcılarda alkali aktivatör-kül arasında etkileşim sonucu organik yapıda herhangi bir değişiklik meydana gelmediği de ifade edilebilir.

#### 5.5.1.4 Element analizi sonuçları

Saf asfalt, ÇAK ve modifiye bağlayıcıların bünyesinde bulunan elementlerin (C, H, N, S) varlığı elementel analiz ile belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar Çizelge 5.24’de verilmiştir.

**Çizelge 5.24 : Elementel analiz sonuçları.**

Bağlayıcı türü	%C	%H	%N	%S	%O*
Saf asfalt (S)	79.71	10.02	0.413	6.819	3.038
ÇAK	3.414	0.504	-	2.140	93.942
K 1.25	82.13	10.33	0.341	6.446	0.753
K 2.5	78.70	9.216	0.430	6.150	5.504
K 5	76.86	8.877	0.352	6.060	7.851
K 7.5	76.24	8.540	0.254	6.198	8.768
%20 AA	78.46	9.260	0.193	6.407	5.680
%30 AA	77.77	8.887	0.344	6.237	6.762
%40 AA	77.53	9.025	0.288	6.186	6.971
%50 AA	80.10	9.173	0.221	6.484	4.022
S+%45AA	57.16	8.426	0.182	5.223	29.01
G 1.25	80.54	9.942	0.352	6.472	2.694
G 2.5	78.70	9.268	0.227	6.539	5.266
G 5	75.24	8.756	0.320	6.049	9.635
G 7.5	73.30	8.162	0.213	6.337	11.988

%O\*: 100’den çıkartılarak hesaplanmıştır.

Çizelge 5.24 incelendiğinde saf asfaltın karbonca zengin olduğu, oksijen içermesi sebebiyle de fonksiyonel gruplar içerdiği görülmektedir. ÇAK örneğindeki karbon, külün çöp yakma tesisi atığı olması itibarıyla yapıda olması beklenen bir sonuçtur. K1.25-7.5 oranlarına ait karbon içeriklerinin kül katkı oranı arttıkça karbon oranının azalması beklenen bir sonuçtur. Bu sebeple, kül katkı oran artışıyla karbon oranı giderek azalacaktır. Geopolimer katkıli bağlayıcılarda karbon ve hidrojen değerleri geopolimer oranı arttıkça azalmakta ancak oksijen oranı artmaktadır. Bu durum, kül - alkali aktivatör ve asfalt

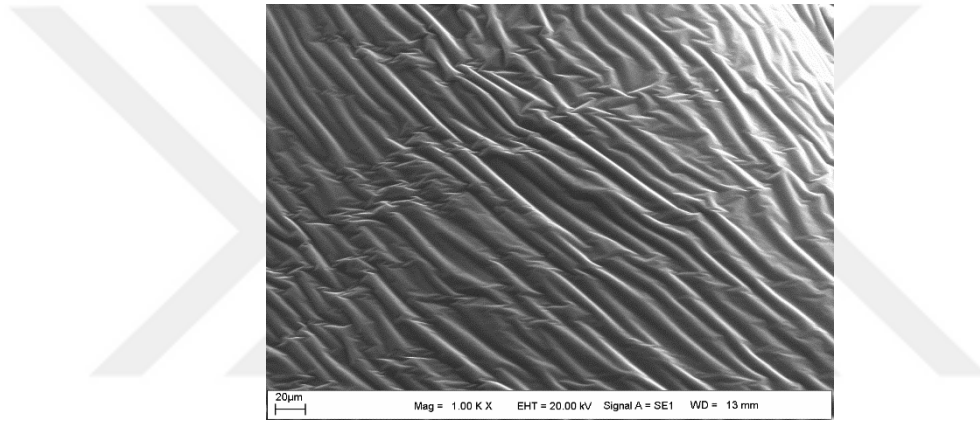
arasındaki etkileşim sonucu organik yapının oksijence zenginleşmesinden dolayı söz konusu olabilmektedir.

### 5.5.2 Kısa dönem yaşlandırılmış bağlayıcıların sonuçları

Çalışmada RTFOT ile yaşlandırılmış saf, kül ve geopolimer katkılı bağlayıcıların SEM, XRD, FT-IR spektroskopisi ve elementel analiz sonuçları alt başlıklar halinde sırasıyla verilmiştir.

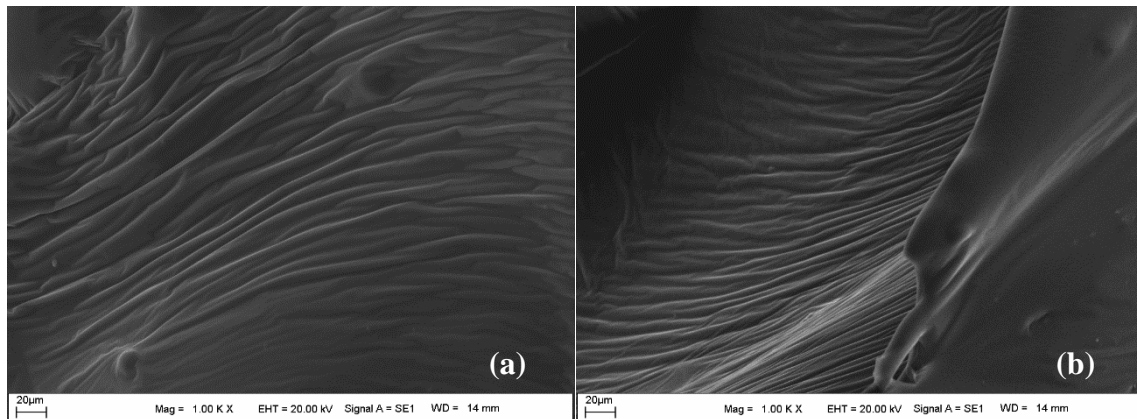
#### 5.5.2.1 SEM analizi sonuçları

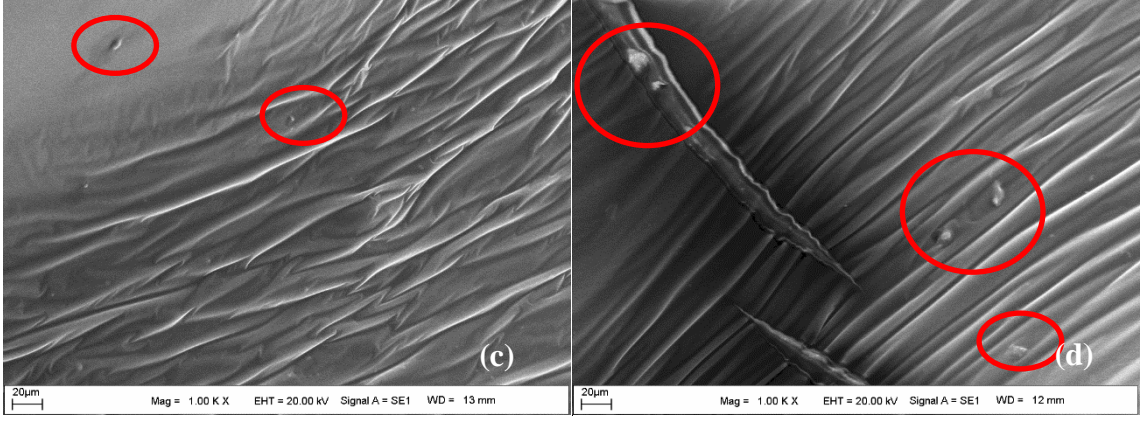
RTFOT ile yaşlandırılmış saf, kül ve geopolimer katkılı bağlayıcıların SEM görüntüleri Şekil 5.65 – Şekil 5.67’de verilmiştir.



Şekil 5.65 : RTFOT ile yaşlandırılmış saf bağlayıcının SEM görüntüsü.

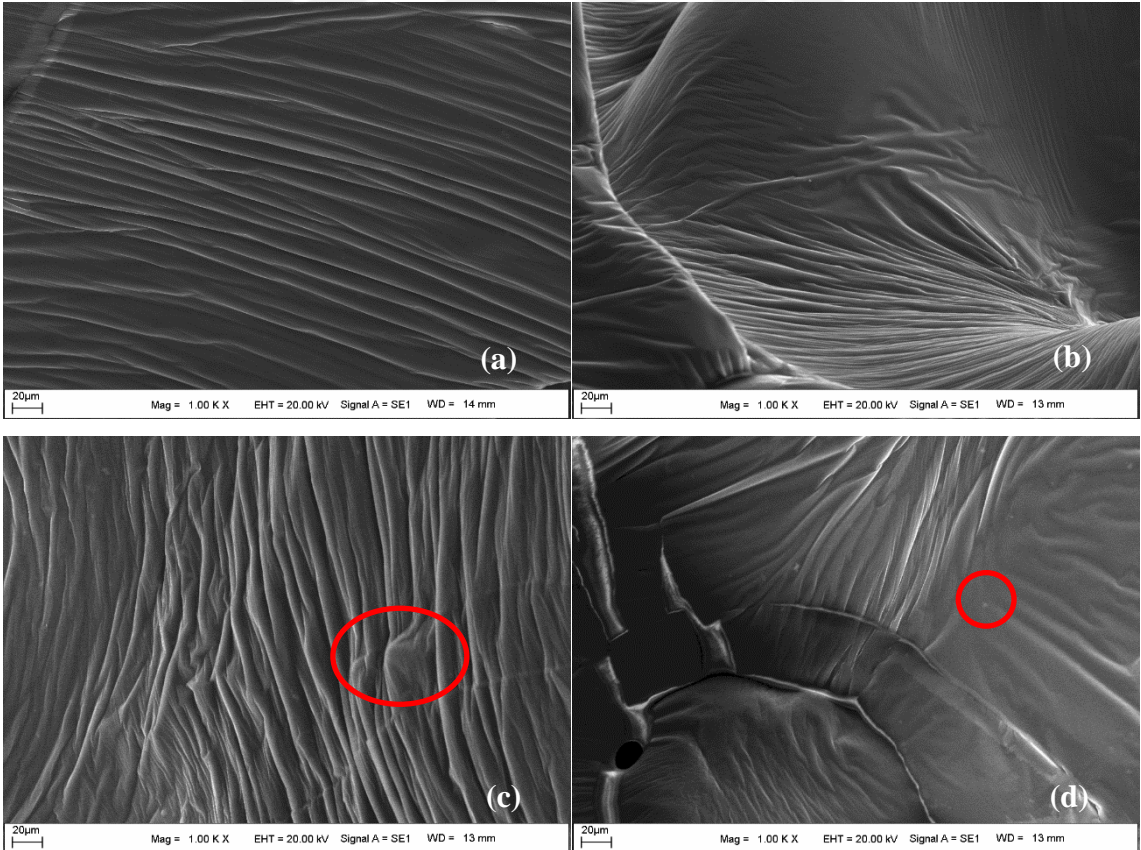
Şekil 5.65 incelendiğinde, kısa dönem yaşlanmanın etkisi ile büzülmelerin arttığı görülmektedir. Bu durum, kısa dönem yaşlanma prosedürü (RTFOT) gereği havanın etkisi sonucu beklenen bir sonuçtur.





**Şekil 5.66** : RTFOT ile yaşlandırılmış (a) K 1.25 (b) K 2.5 (c) K 5 ve (d) K 7.5 bağlayıcılarına ait SEM görüntüleri.

Şekil 5.66 incelendiğinde, katkı oranı artışıyla RTFOT kalıntısı bağlayıcılarda büzülmelerin arttığı, bununla birlikte %5 kül oranından itibaren kül partiküllerinin bağlayıcı ile karışmadığı ve homojenliğin bozulduğu görülmektedir.

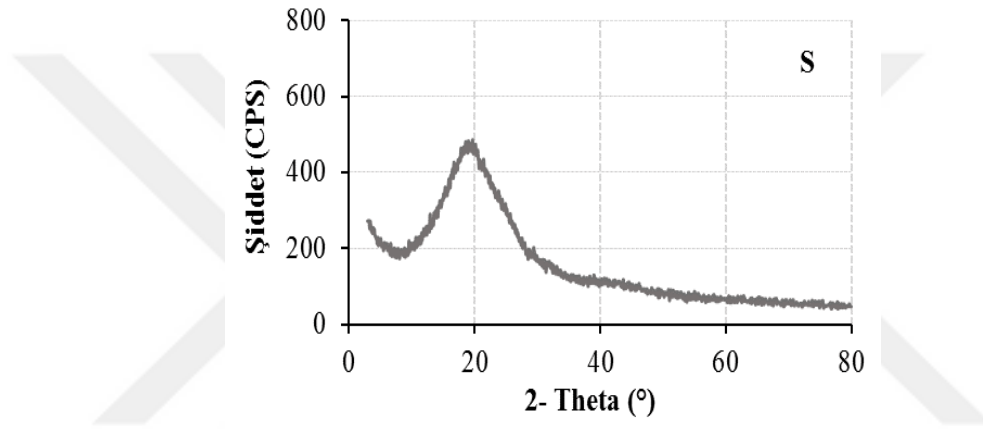


**Şekil 5.67** : RTFOT ile yaşlandırılmış (a) G 1.25 (b) G 2.5 (c) G 5 ve (d) G 7.5 bağlayıcılarına ait SEM görüntüleri.

RTFOT kalıntısı geopolimer katkıli bağlayıcıların SEM görüntüleri incelendiğinde, G 1.25 ve G 2.5 bağlayıcılarında homojen ve tek fazlı yapının yaşlanma etkisiyle bile korunduğu görülmektedir. Ancak %2.5 geopolimer oranından sonra sınır bölgelerin oluşmaya başladığı, ayrıca homojenliğin bozulmaya başladığı da görüntülerden anlaşılmaktadır.

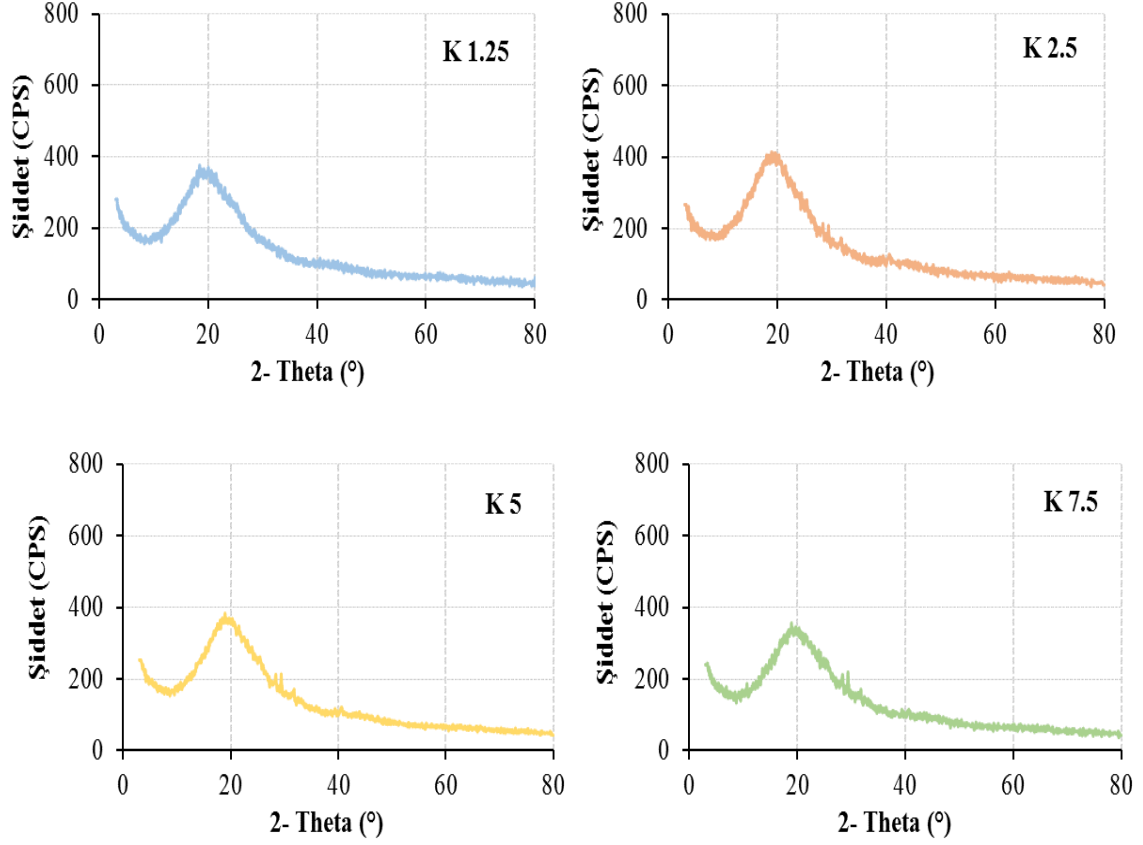
### 5.5.2.2 XRD analizi sonuçları

RTFOT ile yaşlandırılmış saf, kül ve geopolimer katkıli bağlayıcıların XRD desenleri Şekil 5.68 – Şekil 5.70’de verilmiştir.



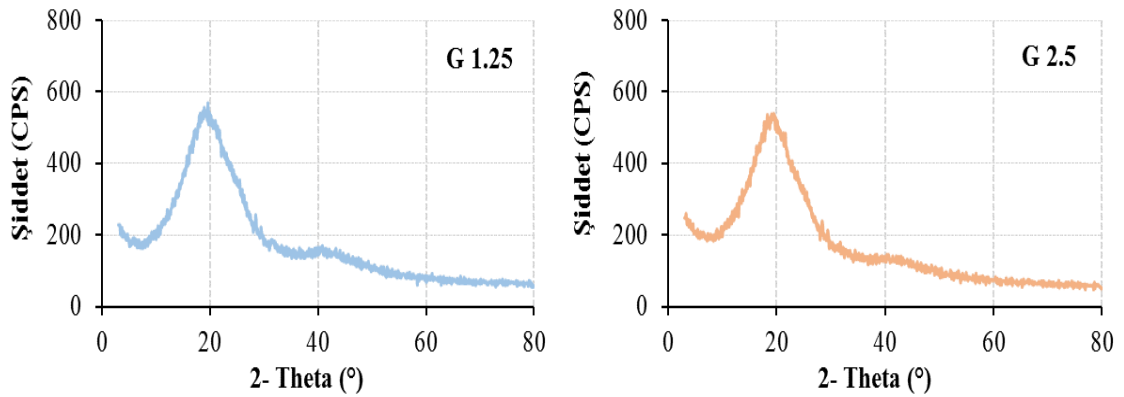
Şekil 5.68 : RTFOT ile yaşlandırılmış saf bağlayıcıya ait XRD desenleri.

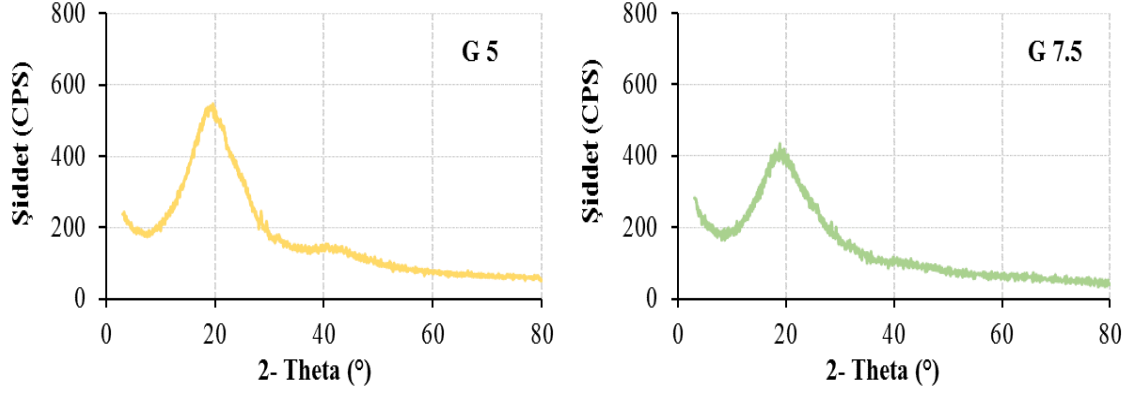
Saf asfaltın RTFOT ile yaşlanmasıyla genel olarak asfaltın makromoleküler yapısı üzerinde önemli bir değişiklik meydana gelmediği, sadece pik yoğunluğunun kısmen azaldığı, bunun sebebinin ise uçucu madde kaybına bağlı olarak meydana geldiği değerlendirilmektedir. Nitekim saf asfalta ait XRD spektrumunda pik şiddeti 620 civarında iken yaşlandırma sonucu 500 değerinin altına düşmüştür. Yaşlandırma işleminden kaynaklı yapıdan uçucu madde uzaklaşması sebebiyle bu sonucun olması mümkündür. Pik şiddetindeki azalma ise asfaltın konsantrasyonu ile ilişkilidir bu sebeple yapısal değişim söz konusudur.



**Şekil 5.69 :** RTFOT ile yaşlandırılmış kül katkılı bağlayıcılara ait XRD desenleri.

Şekil 5.69 incelendiğinde, kül katkı oranı artışıyla saf bağlayıcıya kıyasla pik şiddetinin azaldığı, bununla birlikte, makromoleküler yapı da az da olsa değişimler meydana geldiği görülmektedir. Ayrıca, kül oranı artışıyla bağlayıcılardaki inorganik yapıya ait krsitalin piklerin belirginleşmeye başladığı ve özellikle yaşlanma ile de K5 ve K7.5 bağlayıcılarında daha belirgin olduğu görülmektedir.



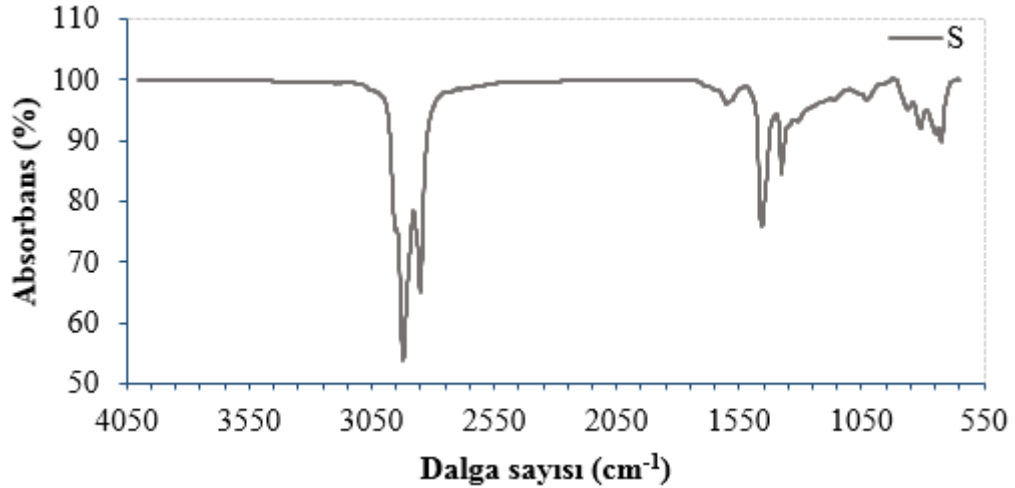


**Şekil 5.70 :** RTFOT ile yaşlandırılmış geopolimer katkıli bağlayıcılara ait XRD desenleri.

Şekil 5.70 incelendiğinde, geopolimer katkısıyla tüm bağlayıcıların pik değerlerinde çok fazla değişim olmadığı görülmektedir. Geopolimer ile asfaltın kararlı bir yapı oluşturması (kimyasal etkileşim sonucunda) ve bunun sonucunda da RTFOT'un etkisi ile yapısal birimlerin makromoleküler yapıdan ayrılmasının zorlaşmasından dolayı elde edilen bu durum beklenen bir sonuç olmuştur.

### 5.5.2.3 FT-IR spektroskopisi sonuçları

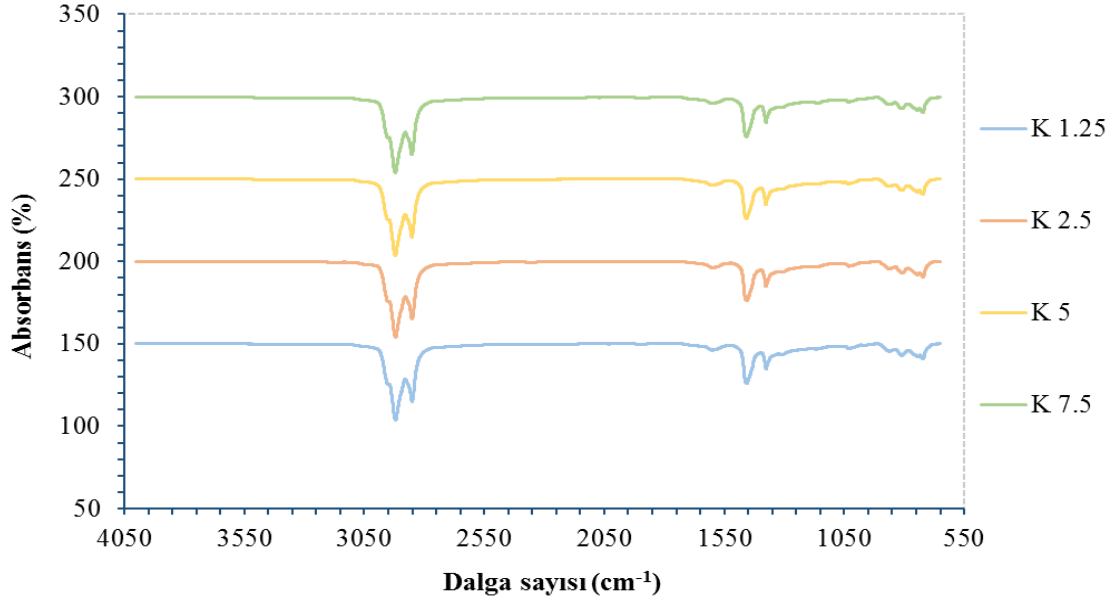
RTFOT ile yaşlandırılmış saf ve katkıli bağlayıcıların FT-IR sonuçları Şekil 5.71 – Şekil 5.73'de verilmiştir.



**Şekil 5.71 :** RTFOT ile yaşlandırılmış saf bağlayıcıya ait FT-IR sonuçları.

Saf bağlayıcının FT-IR sonuçları incelendiğinde, orijinal asfalt numunesine nazaran RTFOT işlemi sonucu (163°C sıcaklıkta 80 dakika hava sirkülasyonu) yapıdan uçucu bileşenlerin ayrılması sonucu alifatik yapıların zenginleşmesi söz konusudur. Orijinal asfaltta alifatik C-H gerilmesine ait pik yüksekliği ile RTFOT işlemi sonucu pik yüksekliği

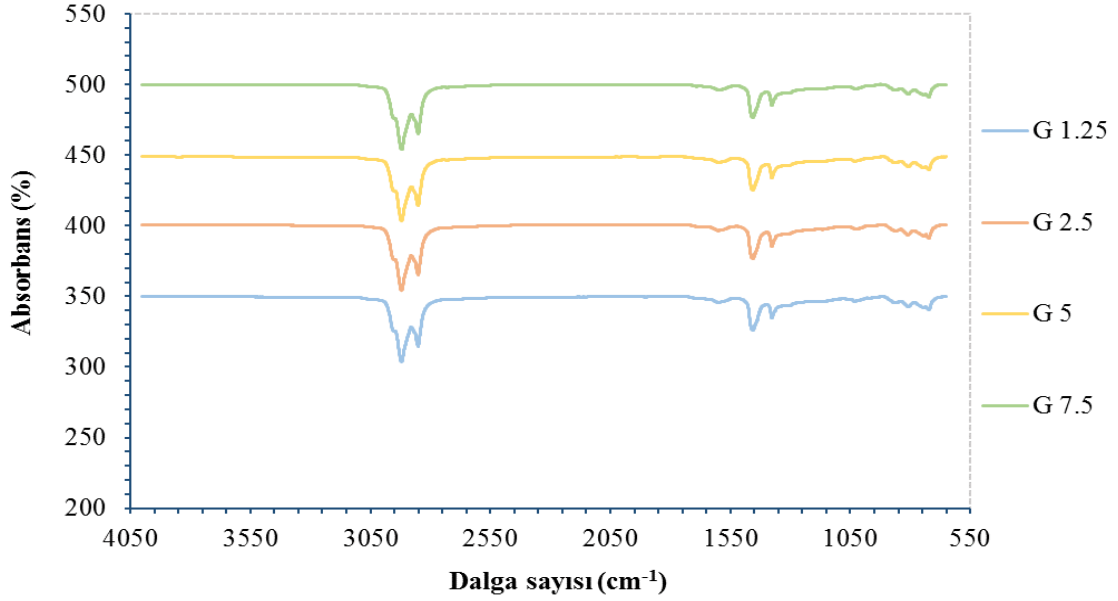
kıyaslandığında yaklaşık 8 birim daha yüksek çıkmıştır. Örneklerin elementel analiz sonuçları da bu görüşü doğrulamaktadır.



**Şekil 5.72 :** RTFOT ile yaşlandırılmış kül katkılı bağlayıcıların FT-IR sonuçları.

Şekil 5.72 incelendiğinde, FTIR spektrumunda gözlenen pikler içerisinde RTFOT işlemi görmemiş bağlayıcılara (orijinal) nazaran özellikle K5 ve K7.5 numunesinde alifatik C-H pik şiddetinde önemli miktarda azalma gözlemlenmiştir. Diğer oranlarda değişim olmamakla beraber elementel analiz sonuçlarında belirgin bir değişim söz konusudur. Bu durum RTFOT işlemi sonucu yapısal olarak özellikle K5 ve K7.5 numunelerinde yapısal parçalanmanın olması ile açıklanabilir.

Şekil 5.73 incelendiğinde, yaşlanmış geopolimer katkılı bağlayıcıların yaşlanmamış (orijinal) bağlayıcılara kıyasla FTIR piklerinde belirgin bir değişim olmamakla beraber G2.5 numunesinde alifatik C-H pik şiddetinde azalma söz konusudur. Bu durum kül-alkali aktivatör kimyasal etkileşimi yanında asfalt etkileşiminin de olduğunu göstermektedir. Elementel analiz sonuçları da bu görüşü desteklemektedir.



Şekil 5.73 : RTFOT ile yaşlandırılmış geopolimer katkıli bağlayıcıların FT-IR sonuçları.

#### 5.5.2.4 Element analizi sonuçları

RTFOT ile yaşlandırılmış saf, kül ve geopolimer katkıli bağlayıcıların elementel analiz sonuçları Çizelge 5.25’de verilmiştir.

Çizelge 5.25 : RTFOT kalıntısı bağlayıcıların elementel analiz sonuçları.

Bağlayıcı türü	%C	%H	%N	%S	%O*
S	81.78	10.10	0.436	6.662	1.022
K 1.25	81.52	9.861	0.416	6.626	1.577
K 2.5	80.84	9.449	0.428	6.603	2.680
K 5	77.41	8.746	0.436	6.342	7.066
K 7.5	77.65	8.339	0.423	6.486	7.102
G 1.25	79.88	8.956	0.461	6.765	3.938
G 2.5	78.87	8.954	0.459	6.764	4.953
G 5	79.83	8.985	0.369	6.368	4.448
G 7.5	80.78	9.223	0.359	7.234	2.404

%O\*: 100’den çıkartılarak hesaplanmıştır.

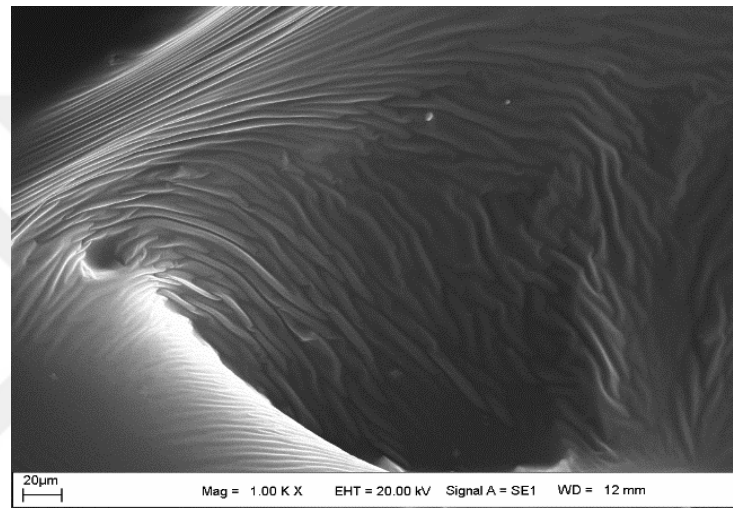
Çizelge 5.25 incelendiğinde genel olarak RTFOT işlemi görmemiş (orijinal) bağlayıcıların elementel analiz sonuçlarına kıyasla karbon içerikleri artarken hidrojen içerikleri azalmaktadır. Oksijen içeriğindeki artma RTFOT işlemi sonucu yapıdan alifatik hidrokarbon grupların ayrıldığı ve/veya yapının oksijenle zenginleşmesi ile açıklanabilir.

### 5.5.3 Uzun dönem yaşlandırılmış bağlayıcıların sonuçları

Çalışmada PAV ile uzun dönem yaşlandırılmış saf, kül ve geopolimer katkıli bağlayıcıların SEM, XRD, FT-IR spektroskopisi ve elementel analiz sonuçları alt başlıklar halinde sırasıyla verilmiştir.

#### 5.5.3.1 SEM analizi sonuçları

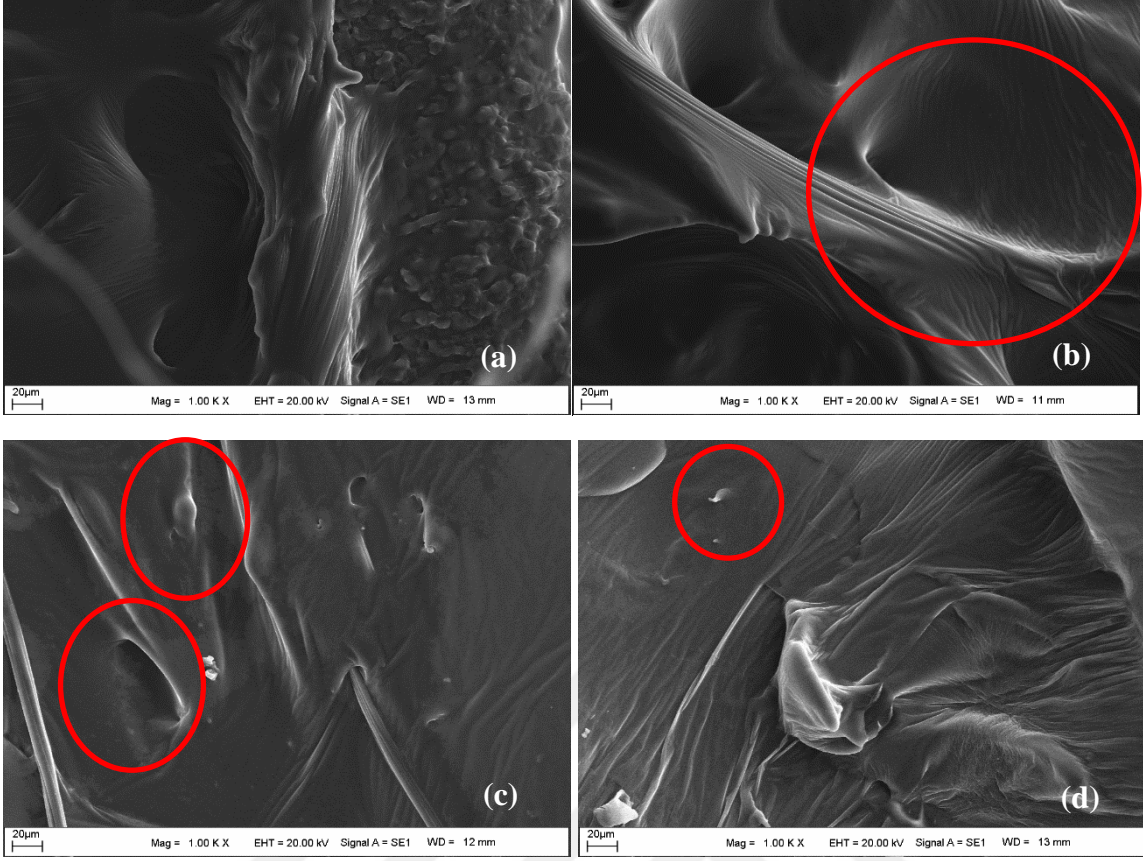
PAV ile yaşlandırılmış saf, kül ve geopolimer katkıli bağlayıcıların SEM görüntüleri Şekil 5.74'de verilmiştir. PAV kalıntısı kül ve geopolimer katkıli bağlayıcılara ait SEM görüntüleri ise Şekil 5.75 ve Şekil 5.76'da verilmiştir.



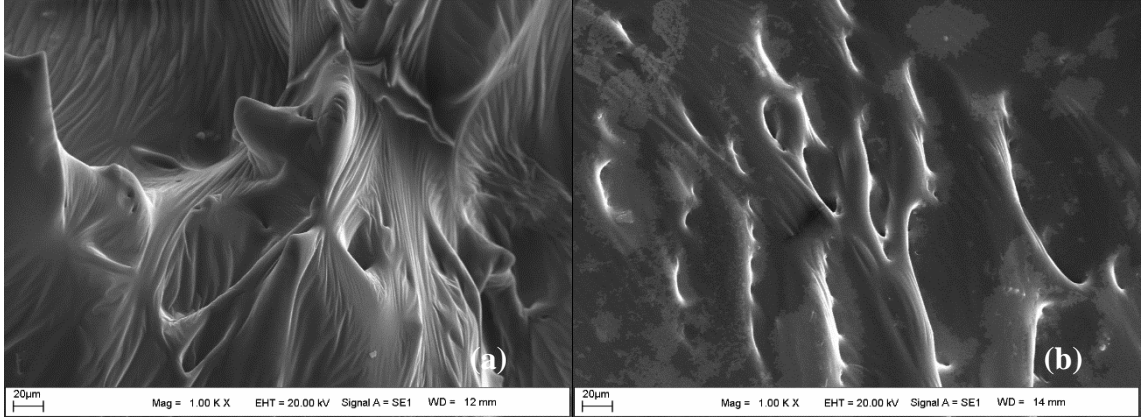
Şekil 5.74 : PAV ile yaşlandırılmış saf bağlayıcının SEM görüntüsü.

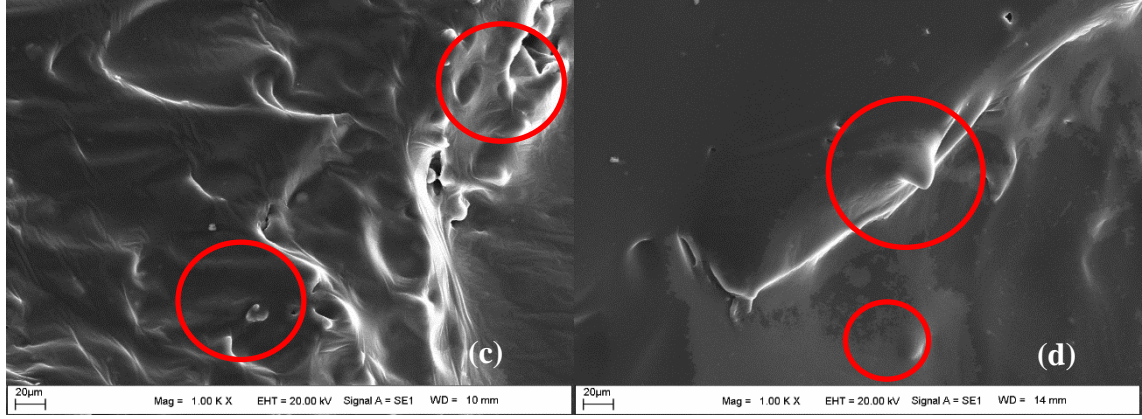
PAV kalıntısı saf bağlayıcıya ait SEM görüntüsü incelendiğinde, sıcaklık ve basınç etkisiyle yapıda boşluk ve çökmelerin olduğu, ancak homojen yapının bozulmadığı görülmektedir.

Şekil 5.75 incelendiğinde, katkı oranı artışıyla %2.5 oranından sonraki oranlarda homojenliğin bozulmaya başladığı, bununla birlikte bağlayıcıların bünyelerinde genel olarak sıcaklık ve basınç etkisiyle boşlukların olduğu görülmektedir.



Şekil 5.75 : PAV ile yaşlandırılmış (a) K 1.25 (b) K 2.5 (c) K 5 ve (d) K 7.5 bağlayıcılarına ait SEM görüntüleri.



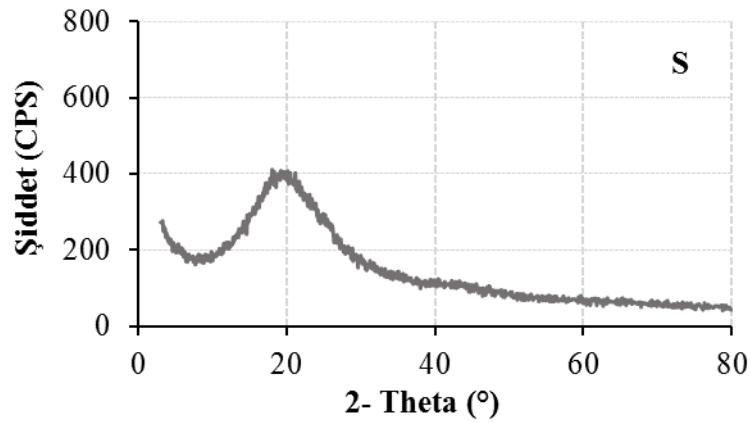


**Şekil 5.76 :** PAV ile yaşlandırılmış (a) G 1.25 (b) G 2.5 (c) G 5 ve (d) G 7.5 bağlayıcılarına ait SEM görüntüleri.

Geopolimer katkıli bağlayıcıların görüntüleri değerlendirildiğinde ise PAV testinden sonra basınç etkisi ile yüzeyde boşlukların meydana geldiği %2.5 oranından sonra homojenliğin bozulmaya başladığı görülmektedir.

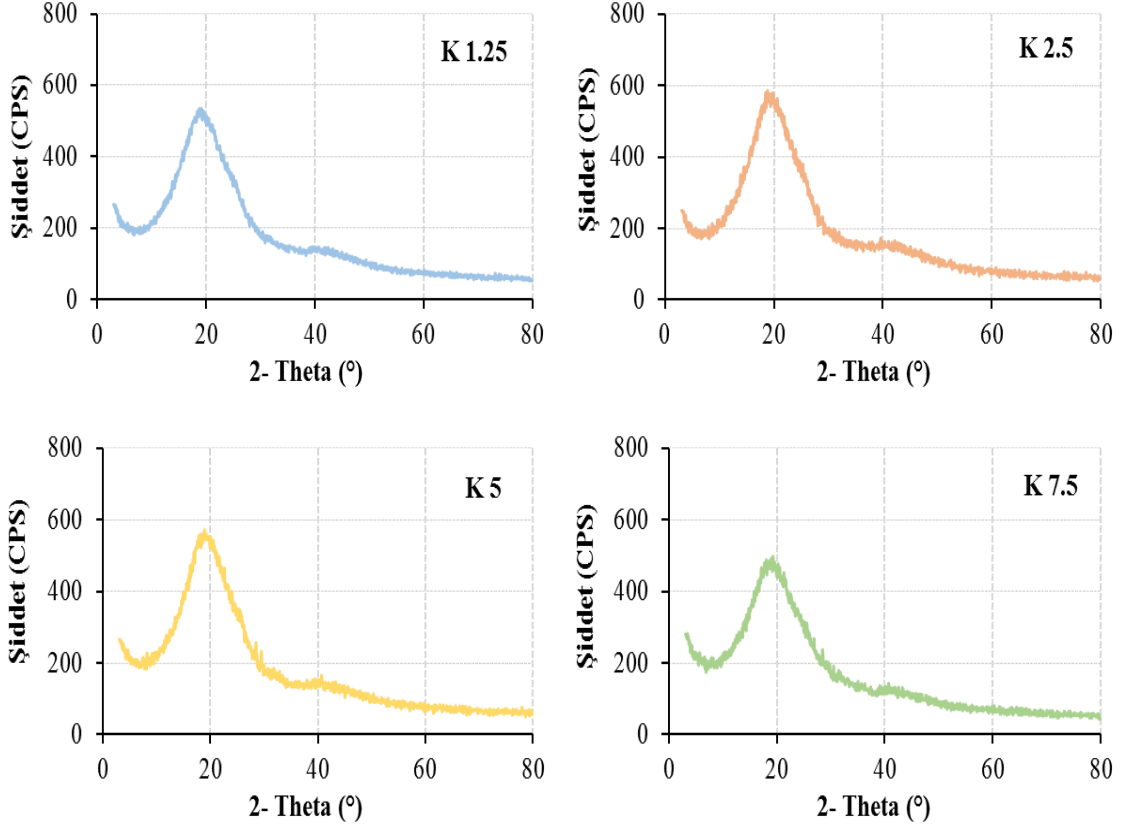
### 5.5.3.2 XRD analizi sonuçları

PAV ile yaşlandırılmış saf, kül ve geopolimer katkıli bağlayıcıların XRD desenleri Şekil 5.77 – Şekil 5.79’da verilmiştir.



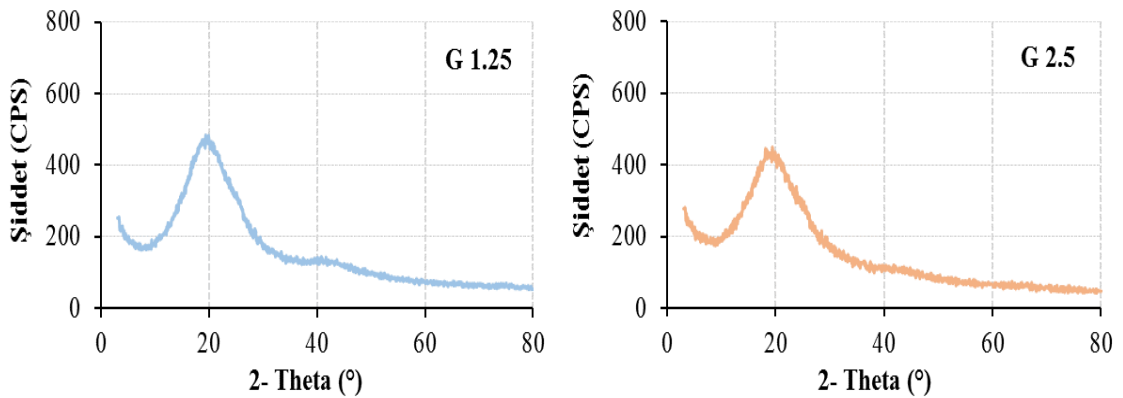
**Şekil 5.77 :** PAV ile yaşlandırılmış saf bağlayıcıya ait XRD desenleri.

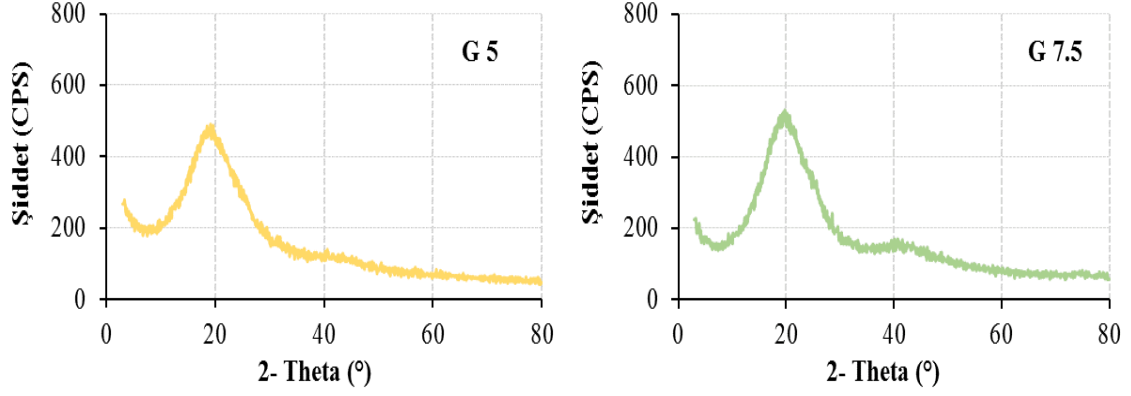
Şekil 5.77 incelendiğinde, saf bağlayıcının orijinal ve RTFOT kalıntısı saf bağlayıcıya göre pik şiddetinde azalma meydana geldiği görülmektedir. Meydana gelen bu azalmanın sıcaklık ve basınç etkisiyle uçucu bileşenlerin yapıdan ayrılması ve ayrıca kristalli birimlerin basınç altında alt katmanlarda birikmesi sonucu yüzeyde amorf yapının öne çıkmasından kaynaklandığı değerlendirilmektedir.



**Şekil 5.78** : PAV ile yaşlandırılmış kül katkılı bağlayıcılara ait XRD desenleri.

Şekil 5.78 incelendiğinde, orijinal bağlayıcıya kıyasla pik şiddetinde azalma, RTFOT kalıntısı bağlayıcılara göre ise pik şiddetinde artma meydana geldiği görülmektedir. Bunun sebebi, PAV yaşlandırmasında yapısal kararlılığın korunduğu ve yaklaşık 100°C sıcaklıkta 2.1 MPa basınçta yapısal uçucu bileşenlerin ayrılması ile açıklanabilir.



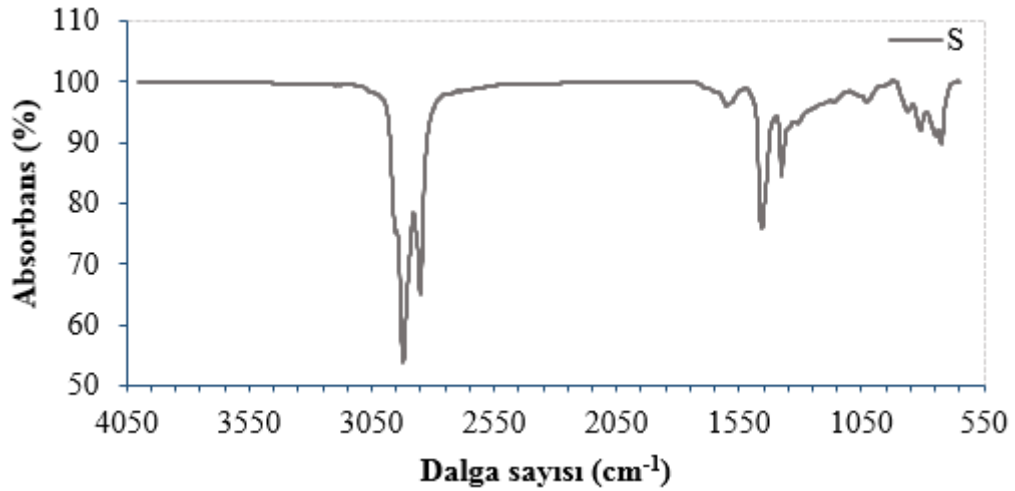


**Şekil 5.79** : PAV ile yaşlandırılmış geopolimer katkıli bağlayıcılara ait XRD desenleri.

Şekil 5.79 incelendiğinde, orijinal ve RTFOT kalıntısı geopolimer katkıli bağlayıcılara göre pik şiddetinde azalma meydana geldiği görülmektedir. Bu sonuç, sıcaklık ve basınç etkisiyle uçucu bileşenlerin bağlayıcı bünyesinden çıkması ve geopolimerin asfalt ile etkileşimi sonucu oluşabilecek yapıların basınç etkisiyle yapıdan uzaklaşması ile açıklanabilir.

### 5.5.3.3 FT-IR spektroskopisi sonuçları

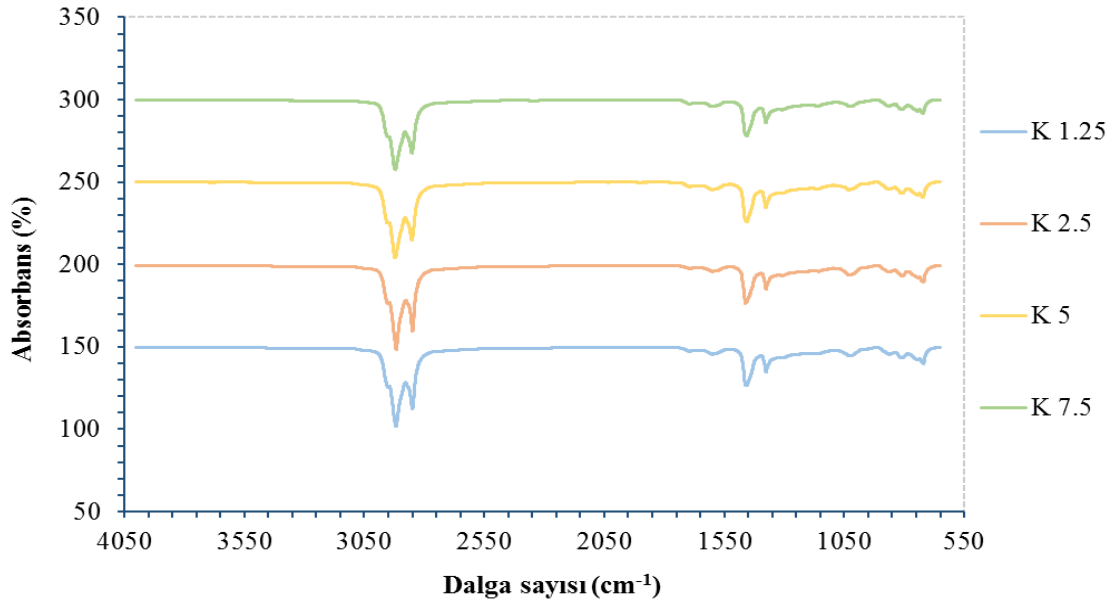
PAV ile yaşlandırılmış saf ve katkıli bağlayıcıların FT-IR sonuçları Şekil 5.80 – Şekil 5.82’de verilmiştir.



**Şekil 5.80** : PAV ile yaşlandırılmış saf bağlayıcıya ait FT-IR sonuçları.

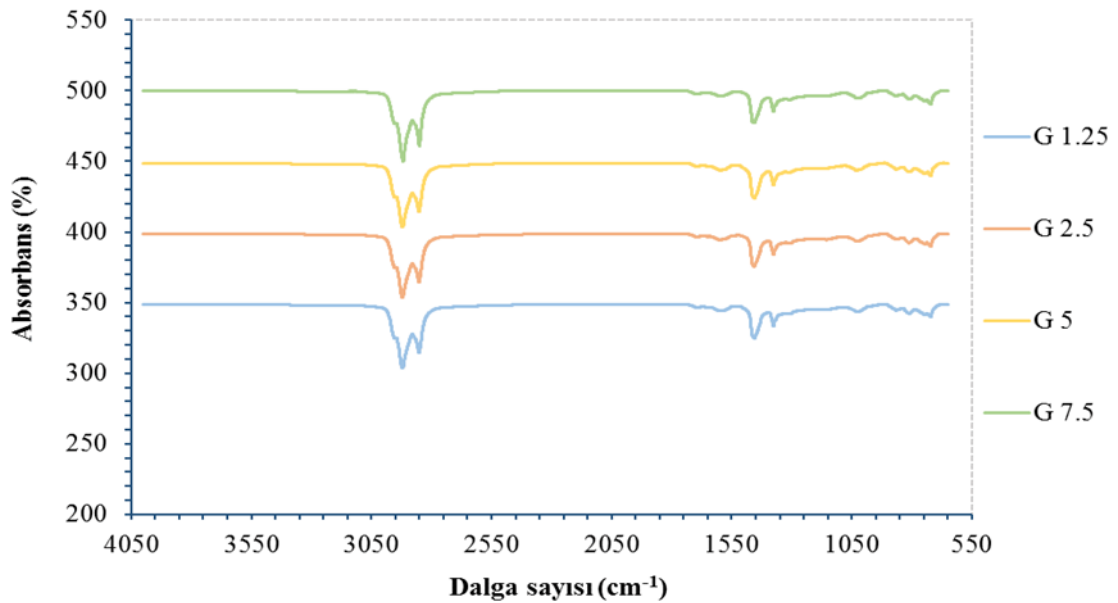
Saf bağlayıcının FT-IR sonuçları incelendiğinde, 1030  $\text{cm}^{-1}$  dalga boyunda C-O piki PAV işlemi sonucu oldukça belirginleştiği görülmektedir. Diğer pik şiddetlerinde değişim gözlenmezken bu piktaki değişim organik yapının oksijenli fonksiyonel gruplara

dönüştüğünü göstermektedir. Elementel analiz sonuçları da nitekim bu durumu desteklemektedir.



Şekil 5.81 : PAV ile yaşlandırılmış kül katkıli bağlayıcıların FT-IR sonuçları.

Şekil 5.81 incelendiğinde kül katkıli bağlayıcıların PAV işlemi sonucu tüm oranlarında alifatik C-H piklerinin pik şiddetlerinin arttığı görülmektedir. Özellikle, 1030 cm<sup>-1</sup> pikinin bu numunelerde ortaya çıkması karışımda basıncın etkisiyle madde kaybının olmamasına ve oksijenli fonksiyonel grupların artması ile açıklanabilir.



Şekil 5.82 : PAV ile yaşlandırılmış geopolimer katkıli bağlayıcıların FT-IR sonuçları.

Şekil 5.82 incelendiğinde geopolimer karışımında kül-alkali aktivatör-asfalt etkileşimi özellikle G2.5 bağlayıcısında açıkça görülmektedir. G2.5 bağlayıcısındaki 1030 cm<sup>-1</sup> piki PAV işlemi görmemiş örneğe göre açıkça ortaya çıkmaktadır. Buradan hareketle, orijinal, RTFOT ve PAV ile yaşlandırılmış G2.5 bağlayıcısında asfalt+kül+AA kimyasal etkileşiminin en net görüldüğü ifade edilebilir.

#### 5.5.3.4 Element analizi sonuçları

PAV ile yaşlandırılmış saf, kül ve geopolimer katkılı bağlayıcıların elementel analiz sonuçları Çizelge 5.26'da verilmiştir.

**Çizelge 5.26 : PAV kalıntısı bağlayıcıların elementel analiz sonuçları**

Bağlayıcı türü	%C	%H	%N	%S	%O*
S	79.11	9.417	0.346	6.345	4.782
K 1.25	79.34	9.015	0.357	5.983	5.305
K 2.5	79.63	8.714	0.379	5.502	5.775
K 5	81.19	9.650	0.359	6.930	1.871
K 7.5	79.96	9.163	0.385	6.152	4.340
G 1.25	78.85	9.726	0.371	6.319	4.734
G 2.5	78.60	8.988	0.390	6.300	5.722
G 5	78.92	8.628	0.433	5.458	6.561
G 7.5	77.51	8.835	0.342	5.457	7.856

%O\*: 100'den çıkartılarak hesaplanmıştır.

Çizelge 5.26 incelendiğinde PAV işlemi sonucu tüm bağlayıcıların karbon, hidrojen, kükürt ve oksijen içeriklerinde düzenli bir değişim gözlenmemiştir. Bunun sebebi ortam kimyası yanında PAV işleminde sıcaklık ve basıncın etkisi olabilmektedir.

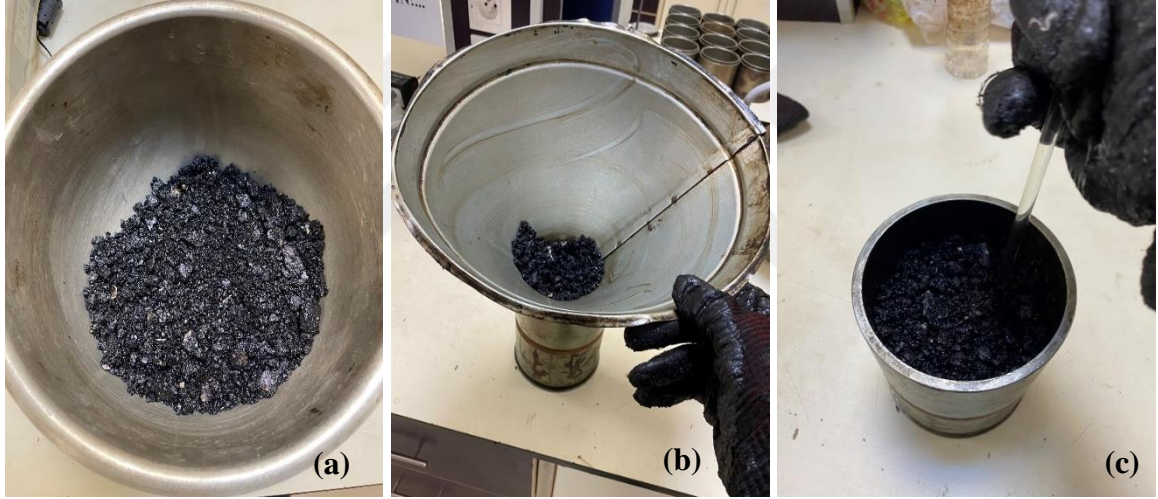
#### 5.6 Sıcak Karışım Numunelerinin Hazırlanması

Çalışmada, sıcak karışım numuneleri Marshall karışım tasarım yöntemi esas alınarak hazırlanmıştır. Marshall yöntemine göre, ilk olarak karışıma girecek agrega ağırlığı ve gradasyonu belirlendi. Kuru agrega ağırlığının 1200gr alındığı çalışmada, asfalt bağlayıcı miktarı kuru agrega ağırlığına göre belirlendi. Belirlenmiş olan agrega gradasyonuna göre tartımları yapılan agregalar yaklaşık 165 °C sıcaklıktaki etüvde en az 2 saat ısıtıldı. Bununla birlikte, yine daha önceden en az 1.5 saat kadar karıştırma sıcaklığında ısıtılmış olan bağlayıcı (Şekil 5.83a), bir karıştırma kabı içerisine alınmış olan agreganın ortasında açılan çukur içerisine döküldü. Karıştırma kabı içerisindeki agregaların yüzeyi tamamen asfalt bağlayıcı ile sarılıncaya kadar karıştırma cihazında karıştırma işlemi gerçekleştirildi (Şekil

5.83b). Ortalama 1.5 dk içerisinde tamamlanan karıştırma işlemi sonunda, önceden hazırlanmış (temizlenip hafif yağlanmış) ve yaklaşık 165 °C sıcaklıkta ısıtılmış olan kalıplar içerisine numunelerin yapışmaması için aydıngeçer kağıdı koyuldu ve karıştırılmış agrega+bağlayıcı harmanı (Şekil 5.84a) kalıp içerisine daha önceden 165 °C sıcaklıkta ısıtılmış olan bir huni yardımıyla dikkatlice koyuldu (Şekil 5.84b). Ardından ısıtılmış bir cam çubuk yardımıyla, harmanın orta kısmında 10, kenarlarında ise 15 defa olmak üzere toplamda 25 şişleme işlemi yapıldı (Şekil 5.84c) ve numunenin üst yüzeyine de aydıngeçer kağıdı koyularak numune Marshall tokmağı tablasına yerleştirildi. Sıkıştırma işlemi için Marshall tokmağı, 457 mm. yükseklikten serbest bırakıldı ve numunenin ön yüzüne 75, arka yüzüne 75 olmak üzere toplamda 150 vuruş işlemi gerçekleştirilerek briket numuneleri hazırlandı (Şekil 5.85a). Kalıp içerisinde en az 24 saat bekletilen briketler (Şekil 5.85b), daha sonra bir kriko yardımı ile kalıptan çıkartıldı (Şekil 5.85c) ve alt ve üst yüzeyler bir spatula yardımı ile pürüzsüzleştirildi. Ardından, numunelerin kumpas yardımıyla en az üç farklı yerden yüksekliği ölçüldü (Şekil 5.86a) ve bunlar not edildi. Bundan sonra numunelerin çeşitli ağırlıklarını belirlemek amacıyla ilk olarak briketlerin havadaki ağırlıkları (kuru ağırlık) belirlendi (Şekil 5.86b). Sonra, Arşimet terazisine yerleştirilen numunelerin sırayla 25 °C sudaki ağırlıkları tespit edildi. Sudan çıkan numunelerin doygun ağırlıklarını belirleyebilmek amacıyla numune ortalama 4 dk. kadar 25 °C sıcaklıktaki su banyosunda bekletildi ve böylece numunenin yüzeyindeki tüm boşlukların su ile dolması sağlandı. Süre bitiminde havlu ile numune yüzeyinde parlaklık kalmayacak şekilde kurulama işlemi yapıldı ve böylece numunelerin suya doygun kuru yüzey ağırlığı tespit edilmiş oldu. Tüm bu işlemler sonunda numuneler Marshall Stabilite ve akma deneyine tabi tutulmak için hazır hale getirilmiş oldu. Marshall stabilite ve akma deneyi için briket numuneleri ortalama 35 dk kadar 60 °C sıcaklıktaki su banyosunda bekletildi (Şekil 5.87a). Ardından, süresi dolan numune Marshall Stabilite çenesine yerleştirildi ve çene üzerinde akma çubuğu yerine sabitlendi. Bu aşamadan sonra numune yüklemeye maruz bırakıldı ve en yüksek yükleme değeri ile buna tekabül eden akma değeri Marshall cihazı ekranında otomatik olarak belirlendi ve bu değerler kaydedildi (Şekil 5.87b).



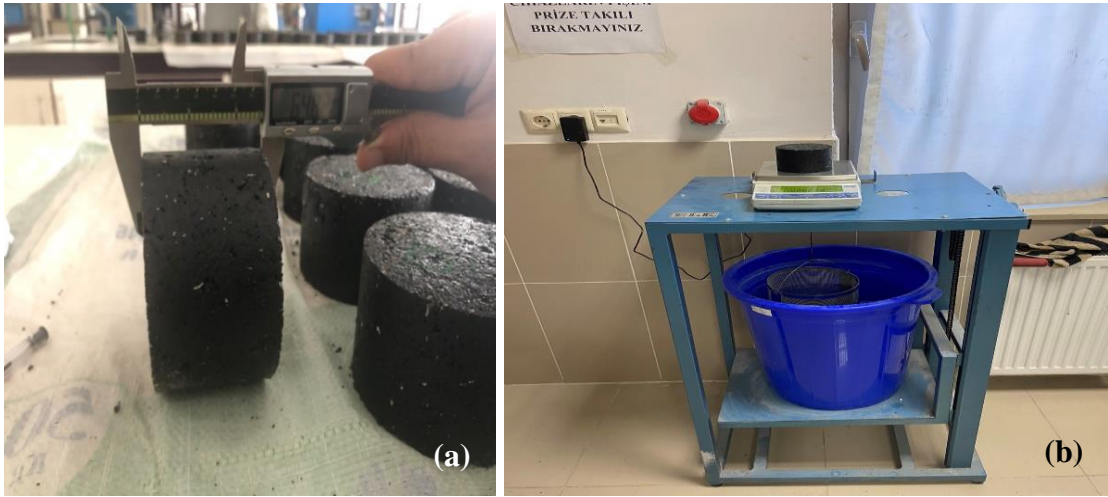
Şekil 5.83 : (a) Agreganın etüvde ısıtılması (b) karıştırma cihazı.



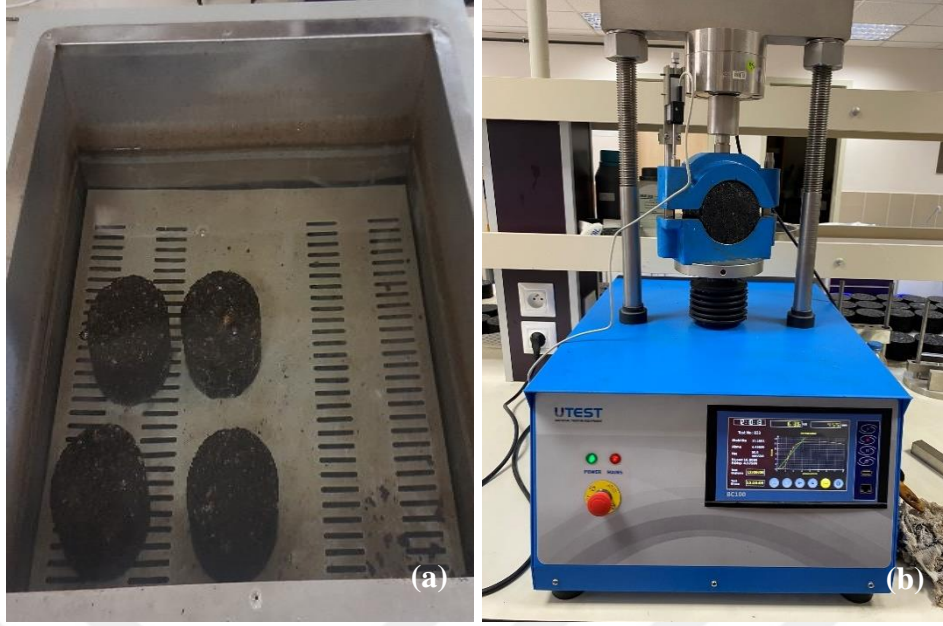
Şekil 5.84 : (a) Karışım harmanı (b) karışımın kalıba koyulması (c) şişleme işlemi.



Şekil 5.85 : (a) Numunenin Marshall tokmağında sıkıştırılması (b) kalıpta bekletilmesi (c) kriko ile kalıptan çıkarılması.



Şekil 5.86 : (a) Numunenin kumpas ile yüksekliğinin ölçülmesi (b) arşimet terazisinde ağırlığının belirlenmesi.



**Şekil 5.87 :** (a) Su banyosunda numunelerin bekletilmesi (b) stabilite ve akma deneyine tabi tutulması.

### 5.6.1 Optimum asfalt içeriğinin tespit edilmesi

Çalışmada, optimum asfalt içeriğinin tespit edilebilmesi amacıyla HMA içerisine girecek olan 1200 gr agrega miktarı sabit tutuldu. Bağlayıcı miktarı, agrega ağırlığının %4.0'ten başlamak üzere %6.0'ya kadar %0.5 artan oranlarda ve her bir oranda 3'er adet olmak üzere toplamda 15 adet briket numunesi hazırlanmıştır. Hazırlanan briketlerin gerekli yükseklik ve ağırlıkları belirlendikten sonra Denklem 5.3- 5.16 kullanılarak numunelerin çeşitli hacimsel özellikleri tespit edilmiştir. Hazırlanan deney numunelerinden %4 bitüm içeren 1. Numuneye ait gerekli ölçüm ve hesaplamalar aşağıda gösterilmiştir. Briketler sırasıyla Marshall Stabilite ve akma testine tabi tutulmuş ve elde edilen değerler not alınmıştır. Optimum bağlayıcı içeriği için hacimsel hesaplamalar ile stabilite ve akma değerlerine tüm sonuçlar Çizelge 5.27'de, bu değerlere bağlı olarak % bağlayıcı grafikleri Şekil 5.28'de verilmiştir.

$$V = B-C \quad (5.3)$$

$$D_p = A/V \quad (5.4)$$

$$D_{port} = (D_{p1} + D_{p2} + D_{p3})/3 \quad (5.5)$$

$$W_a = (W_B/W_A) \times 100 \quad (5.6)$$

$$W_b = [(W_B/W_A + W_B)] \times 100 \quad (5.7)$$

$$G_{sb} = 100 / [(\%K/G_k - h) + (\%I/G_i - h) + (\%F/G_f - z)] \quad (5.8)$$

$$G_{sa} = 100 / [(\%K/G_k - z) + (\%I/G_i - z) + (\%F/G_f - z)] \quad (5.9)$$

$$D_t = 100 / [(100 - W_b/G_{se}) + (W_b/G_b)] \quad (5.10)$$

$$G_{se} = (G_{sb} + G_{sa}) / 2 \quad (5.11)$$

$$V_h = [(D_t - D_{port}) / D_t] \times 100 \quad (5.12)$$

$$V_b = (P_{be} \times D_{port}) / G_b \quad (5.13)$$

$$V_a = 100 - (V_h + V_b) \quad (5.14)$$

$$V_{ma} = 100 - V_a = (V_h + V_b) \quad (5.15)$$

$$V_f = (V_b / V_{ma}) \times 100 \quad (5.16)$$

W<sub>a</sub>: Agregaya göre seçilen bağlayıcı %'si

W<sub>b</sub>: Karışıma göre seçilen bağlayıcı %'si

W<sub>A</sub>: Toplam agregaya ağırlığı (1200gr)

W<sub>B</sub>: Bağlayıcı ağırlığı (agregaya göre)

A: Havadaki kuru ağırlık

B: Doygun-yüzey kuru ağırlık

C: Sudaki ağırlık

V: Numunenin hacmi

D<sub>p</sub>: Numunenin pratik hacim özgül ağırlığı

D<sub>port</sub>: Numunelerin ortalama pratik hacim özgül ağırlığı

D<sub>t</sub>: Numunenin teorik maks. özgül ağırlığı

V<sub>h</sub>: Numunedeki boşluk yüzdesi

V<sub>b</sub>: Numunedeki efektif bitüm hacmi %'si

V<sub>a</sub>: Numunedeki agregaya hacmi %'si

V<sub>ma</sub>: Agregalar arasındaki boşluk %'si

V<sub>f</sub>: V<sub>ma</sub>'nın bağlayıcı dolu boşluk %'si

P<sub>be</sub>: Agregaya ağırlığına göre efektif bağlayıcı %'si

G<sub>sb</sub>: Agregaya hacim özgül ağırlığı

G<sub>sa</sub>: Agregaya zahiri özgül ağırlığı

G<sub>se</sub>: Agregaya efektif özgül ağırlığı

G<sub>b</sub>: Asfalt özgül ağırlık (gr/cm<sup>3</sup>)

%K: Karışımdaki kaba agregaya %'si

%İ: Karışımdaki ince agregaya %'si

%F: Karışımdaki filler %'si

$$\text{Kaba agrega} = \%42, G_{k-h} = 2.683 \text{ gr/cm}^3$$

$$\text{İnce agrega} = \%53, G_{i-h} = 2.635 \text{ gr/cm}^3$$

$$\text{Filler} = \%5, G_{f-z} = 2.684 \text{ gr/cm}^3$$

$$\text{Bağlayıcı oranı} = \%4, G_b = 1.035 \text{ gr/cm}^3$$

$$\text{Agrega} = 1200 \text{ gr}$$

$$W_a = (48/1200) \times 100 = 4$$

$$W_b = (48/(48+1200)) \times 100 = 3.85$$

$$V = 1238.4 - 714.73 = 523.7 \text{ cm}^3$$

$$D_p = 1230.2 / 523.7 = 2.349 \text{ gr/cm}^3$$

$$D_{p_{ort}} = (2.349 + 2.354 + 2.362) / 3 = 2.355 \text{ gr/cm}^3$$

$$G_{sb} = 100 / [(42/2.683) + (53/2.635) + (5/2.684)] = 2.657 \text{ gr/cm}^3$$

$$G_{sa} = 100 / [(42/2.755) + (53/2.829) + (5/2.684)] = 2.790 \text{ gr/cm}^3$$

$$D_t = 100 / [(100 - 3.85/2.682) + (3.85/1.035)] = 2.527 \text{ gr/cm}^3$$

$$G_{se} = (2.657 + 2.790) / 2 = 2.724 \text{ gr/cm}^3$$

$$V_h = [(2.527 - 2.355) / 2.527] \times 100 = 6.81$$

$$V_b = (3.50 \times 2.355) / 1.035 = 7.964$$

$$V_a = 100 - (6.81 + 7.964) = 85.230$$

$$V_{ma} = 100 - 85.230 = 14.770$$

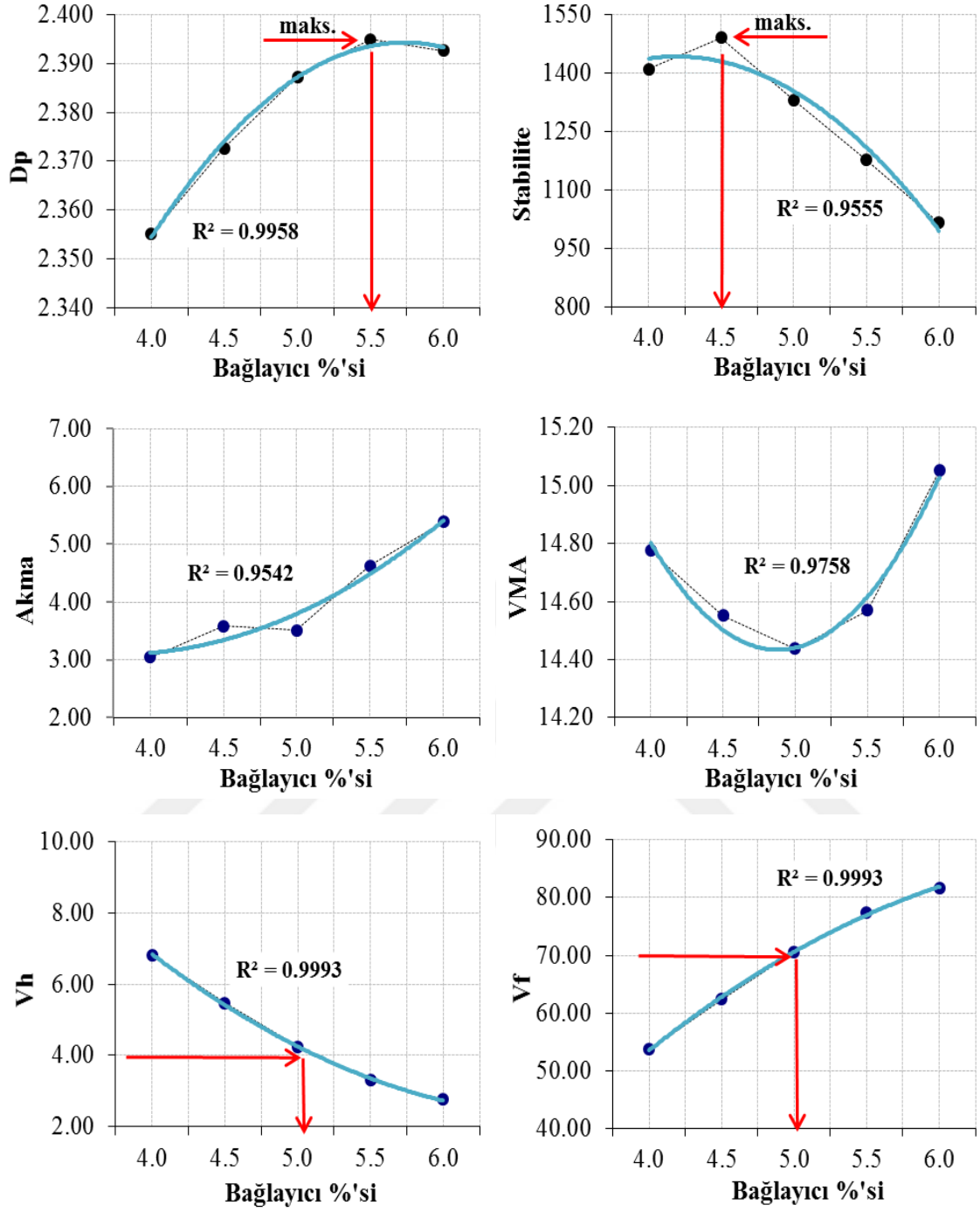
$$V_f = (7.964/14.770) \times 100 = 53.920$$

**Çizelge 5.27 : Optimum bağlayıcı içeriği için elde edilen tüm hesaplamalar.**

No	Wa (%)	Wb (%)	WB (gr)	Numune yüksekliği (mm)				A (hava) (gr)	C (su) (gr)	B (doy.) (gr)	V (cm <sup>3</sup> )	Dp (gr/cm <sup>3</sup> )	Dt (gr/cm <sup>3</sup> )	Vh (%)	Vb (%)	Va (%)	Vma (%)	Vf (%)	
				1	2	3	Ort												
1	4.0	3.85	48.00	64.1	64.7	64.1	64.30	1230.2	714.73	1238.38	523.7	2.349							
2				64.9	64.4	64.7	64.67	1232.7	716.15	1239.88	523.7	2.354							
3	3.64	3.50		64	63.7	64.1	63.93	1230.3	717.13	1237.93	520.8	2.362							
Ortalamalar											2.355	2.527	6.81	7.96	85.22	14.78	53.68		
4	4.5	4.31	54.00	64.1	63.8	64.6	64.17	1238.4	720.25	1243.82	523.6	2.365							
5				64.5	63.7	64.2	64.1	1242.9	722.81	1246.39	523.6	2.374							
6	4.14	3.96		63.7	63.8	63.3	63.6	1236.7	721.2	1241.05	519.9	2.379							
Ortalamalar											2.373	2.510	5.47	9.08	85.45	14.55	62.40		
7	5.0	4.76	60.00	63.6	64.1	63.8	63.83	1252.6	728.29	1254.92	526.6	2.378							
8				64.1	63.7	63.7	63.8	1246.1	729.04	1250.62	521.6	2.389							
9	4.64	4.42		63.4	63.1	63.0	63.17	1247.7	728.8	1249.96	521.2	2.394							
Ortalamalar											2.387	2.493	4.25	10.19	85.56	14.44	70.59		
10	5.5	5.21	66.00	63.8	64.3	64.0	64.03	1257.2	734.09	1259.5	525.4	2.393							
11				63.6	63.7	63.9	63.7	1260.8	736.91	1262.91	526	2.397							
12	5.14	4.87		63.7	64	64	63.88	1259	735.5	1261.21	525.7	2.395							
Ortalamalar											2.395	2.477	3.30	11.27	85.43	14.57	77.36		
13	6.0	5.66	72.00	64.0	63.7	63.7	63.8	1263.1	740.76	1266.31	525.6	2.403							
14				64.8	64.4	64.1	64.4	1265.4	738.33	1269.58	531.3	2.382							
15	5.64	5.32		64.4	64.1	63.9	64.12	1264.3	739.55	1267.95	528.4	2.393							
Ortalamalar											2.393	2.460	2.75	12.30	84.95	15.05	81.71		

**Çizelge 5.27 (devam) :** Optimum bağlayıcı içeriği için elde edilen tüm hesaplamalar.

No	Wa (%)	Wb (%)	WB (gr)	Akma (mm)	Stb. (kN)	Dz.Fak.	Dz.Stb (kG)
1	4.0	3.85	48.00	3.09	14.07	0.990	1393
2				3.01	13.73	0.980	1346
3	3.64	3.50		3.04	14.91	1.000	1491
Ortalamalar				3.047			1410
4	4.5	4.31	54.00	3.6	14.39	0.992	1428
5				3.67	14.49	0.995	1441
6	4.14	3.96		3.49	14.85	1.080	1604
Ortalamalar				3.587			1491
7	5.0	4.76	60.00	3.34	12.99	1.003	1303
8				3.99	13.03	1.003	1307
9	4.64	4.42		3.21	13.57	1.020	1384
Ortalamalar				3.513			1331
10	5.5	5.21	66.00	4.09	11.02	0.997	1099
11				5.16	12.51	1.001	1253
12	5.14	4.87		4.63	11.77	1.002	1179
Ortalamalar				4.625			1177
13	6.0	5.66	72.00	5.21	9.558	1.003	959
14				5.56	10.86	0.987	1072
15	5.64	5.32		5.39	10.21	0.996	1017
Ortalamalar				5.385			1016



Şekil 5.88 : Elde edilen grafikler.

Çizelge 5.27 ve Şekil 5.88’de elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, optimum asfalt içeriği için Dp ve Stabilité değerlerinde maksimum bağlayıcı içeriği (sırasıyla %5.5 ve %4.5), Vh’da %4’e karşılık gelen bağlayıcı içeriği (%5.1) ve Vf’de %70’e karşılık gelen bağlayıcı içeriği (%5.0)’nin aritmetik ortalaması alındığında optimum bağlayıcı içeriği %5.0 olarak belirlenmiştir.

Bununla birlikte elde edilen bu içerikte, yeniden 3 adet kontrol numunesi hazırlanarak bu numunelere ait değerler Karayolları Teknik Şartnamesi (KTŞ)'nde belirtilen sınır değerlerle kıyaslama yapılmıştır. Elde edilen sonuçlarda, limitler içerisinde kaldığı görülmektedir (Çizelge 5.28).

**Çizelge 5.28 : Kontrol karışımına ait sonuçlar.**

No	Wa (%)	Wb (%)	WB (gr)	Ort. yükseklik (mm)	A (hava) (gr)	B (su) (gr)	C (doy) (gr)	V (cm <sup>3</sup> )	Dp (gr/cm <sup>3</sup> )
1	5.0	4.76	60.00	63.73	1251.2	726.31	1251.02	524.71	2.385
2				63.57	1245.3	728.52	1252.19	523.67	2.378
3	4.64	4.42		63.43	1246.7	727.18	1251.23	524.05	2.379
<b>Ortalama</b>									<b>2.381</b>

**Çizelge 5.28 (devam) : Kontrol karışımına ait sonuçlar.**

No	Dt (gr/cm <sup>3</sup> )	Vh (%)	Vb (%)	Va (%)	Vma (%)	Vf (%)	Akma (mm)	Stb. (kN)	Dz. Fak.	Dz. Stb. (kN)
1							3.48	12.55	1.001	1256
2							3.70	12.71	1.080	1373
3							3.88	12.47	1.020	1272
<b>Ort</b>	2.493	4.52	10.16	85.32	14.68	69.24	<b>3.69</b>			<b>1300</b>
<b>KTŞ</b>		<b>3-5</b>			<b>&gt;14</b>	<b>65-75</b>	<b>2-4</b>			<b>&gt;900</b>

Belirlenen %5.0 esas alınarak, kül ve geopolimer katkı HMA numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan bütün katkı numunelerin saf karışım (S) ile karşılaştırabilmesi amacıyla %5.0 oranı sabit alınmıştır.

### 5.7 HMA'lar Üzerinde Uygulanan Performans Deneyleri

Bu çalışmada, geopolimer katkı asfalt bağlayıcıların sıcak karışım asfalt (HMA) kaplamaların performansı üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla, saf, kül ve geopolimer katkı bağlayıcılar ile hazırlanmış olan sıcak karışım numuneleri (Şekil 5.89) üzerinde çeşitli mekanik deneyleri yapılmıştır. Briket numuneleri üzerinde uygulanan deneyler ve

numune sayıları Çizelge 5.29’da, bu deneylerden elde edilen sonuçlar ve değerlendirmeler sırasıyla alt başlıklar halinde verilmiştir.



Şekil 5.89 : Hazırlanan HMA numuneleri.

Çizelge 5.29 : Performans deneylerinde kullanılan numune sayıları.

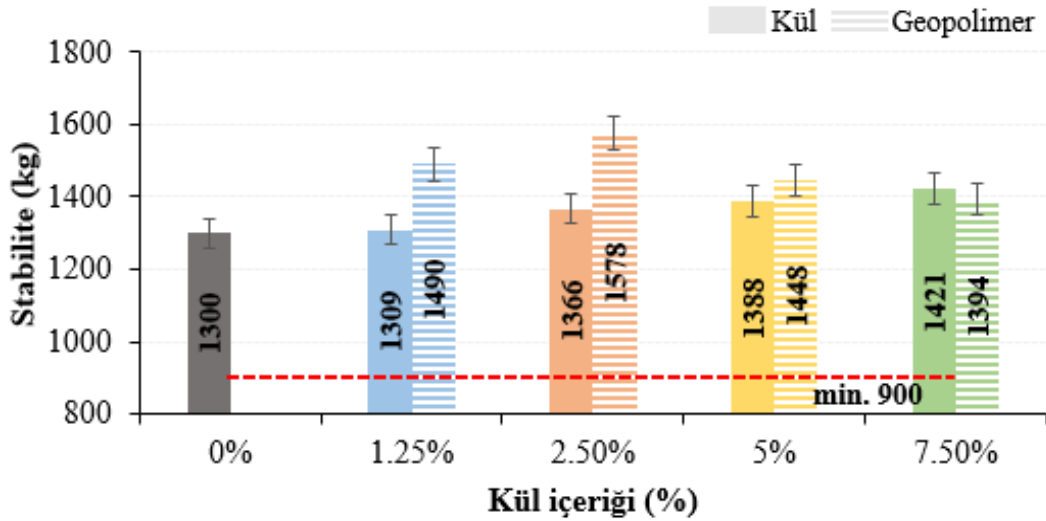
Karışım türü	Marshall stabilite ve akma	RMS	ITS ve Modifiye Lottman	ITSM	Statik sünme	Dinamik sünme	Yorulma
S	3	3	6	3	6	3	6
K 1.25	3	3	6	3	6	3	6
K 2.5	3	3	6	3	6	3	6
K 5	3	3	6	3	6	3	6
K 7.5	3	3	6	3	6	3	6
G 1.25	3	3	6	3	6	3	6
G 2.5	3	3	6	3	6	3	6
G 5	3	3	6	3	6	3	6
G 7.5	3	3	6	3	6	3	6
<b>TOPLAM : 270 ADET</b>							

### 5.7.1 Marshall stabilite ve akma test sonuçları

Çalışmada, saf, kül ve geopolimer katkıli bağlayıcılar kullanılarak hazırlanan HMA briket numunelerinin çeşitli fiziksel ve hacimsel özellikleri Çizelge 5.30'da, numuneler üzerinde uygulanan Marshall Stabilite ve akma sonuçları Şekil 5.90 ve Şekil 5.91'de, MQ değerlerinin kül içeriğine göre değişimi ise Şekil 5.92'de verilmiştir.

Çizelge 5.30 : Numunelerin özellikleri.

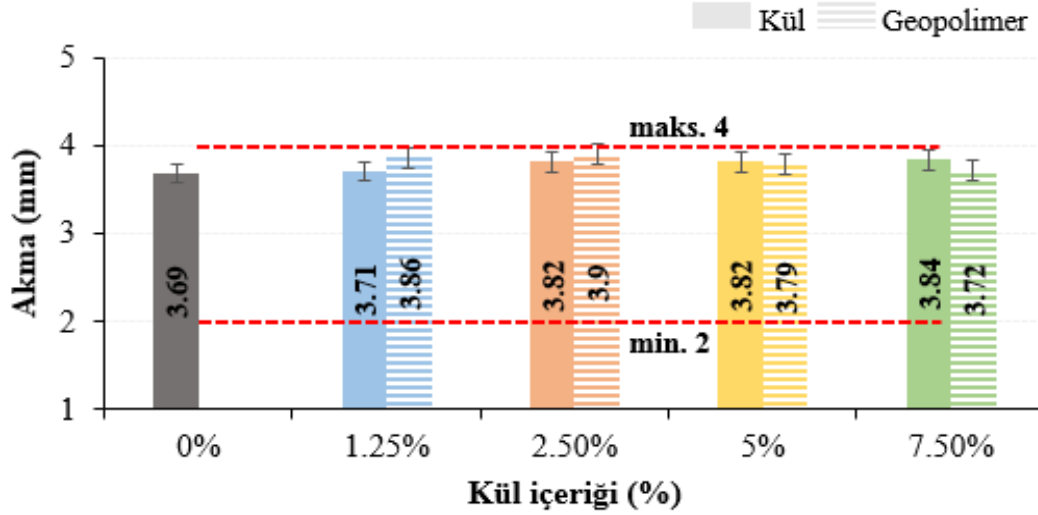
Karışım türü	Ortalama yükseklik	A (hava) (gr)	B (su) (gr)	C (doy) (gr)	Dp (gr/cm <sup>3</sup> )	Dt (gr/cm <sup>3</sup> )	Vh (%)
S	63.50	1244.63	723.96	1245.17	2.388	2.49	4.22
K 1.25	63.30	1241.91	729.32	1242.51	2.376	2.49	4.68
K 2.5	63.30	1248.38	727.60	1248.88	2.395	2.49	3.94
K 5	63.20	1251.47	725.55	1253.32	2.371	2.49	4.89
K 7.5	63.00	1240.39	725.92	1243.15	2.398	2.49	3.81
G 1.25	63.30	1245.93	726.42	1246.20	2.397	2.49	3.85
G 2.5	63.50	1246.45	727.15	1246.78	2.399	2.49	3.78
G 5	63.40	1248.30	728.09	1248.79	2.397	2.49	3.84
G 7.5	64.40	1247.20	727.83	1248.14	2.397	2.49	3.85



Şekil 5.90 : Numunelere ait stabilite değişimleri.

Şekil 5.90 incelendiğinde, kül katkısıyla karışımların stabilite değerlerinin saf karışıma göre sırasıyla %1.0, %5.1, %6.8 ve %9.3 arttığı, geopolimer katkıli karışımların ise sırasıyla %14.7, %21.3, %11.4 ve %7.2 arttığı görülmektedir. Stabilitenin artması, HMA karışımların yük altında kalıcı deformasyonlara karşı direncin arttığını göstermektedir.

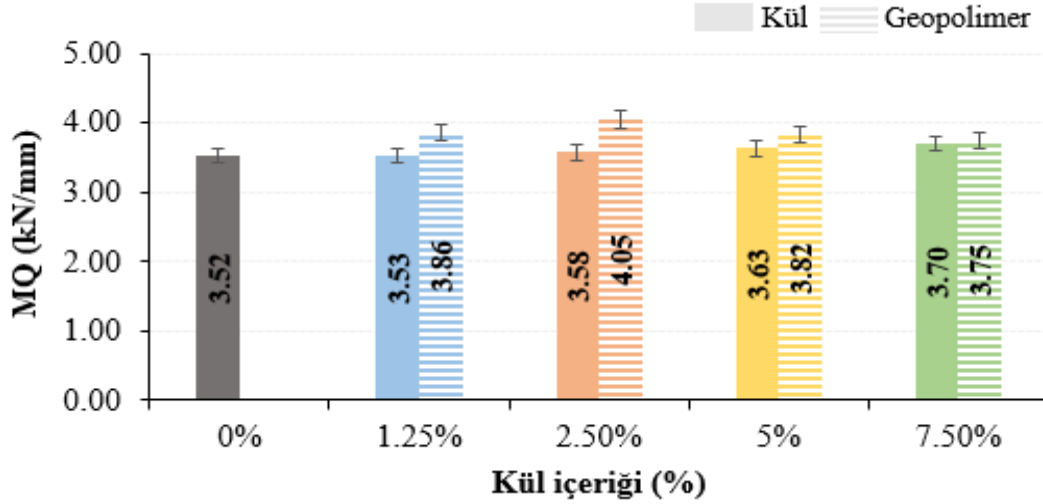
Sonuçlar değerlendirildiğinde, geopolimer katkıli karışımların kül katkıli karışımlara kıyasla Stabilite değerlerinin daha yüksek olduğu, en yüksek değer ise %2.5 geopolimer katkıli karışımlar olduğu görülmektedir. Bu durumda, geopolimer katkıli karışımların kalıcı deformasyonlara karşı daha dirençli olduğunu, hatta direnç bakımından en etkili karışımın %2.5 geopolimer katkıli karışımlar olduğu ifade edilebilir.



Şekil 5.91 : Numunelere ait akma değişimleri.

Numunelere ait akma değerleri incelendiğinde, hem kül hem de geopolimer katkıli karışımların akma değerleri saf karışıma göre kısmen artış göstermiştir. Bu kısmi artışlar kül katkıli karışımlar için sırasıyla %1.0, %3.5, %3.5 ve 4.1; geopolimer katkıli karışımlar için ise yine sırasıyla %4.6, %5.7, %2.7 ve %1.1 oranlarındadır. Akma, karışımların kırılma anındaki davranışı hakkında bilgi vermektedir. Bu sonuçlara göre, hem kül hem de geopolimer katkıli karışımların kırılma anında saf karışım ile benzer davranış göstereceği söylenebilir.

Karışımların stabilite ve akma değerlerinin oranlamasıyla belirlenen MQ değerleri incelendiğinde, kül içeriği artışıyla her iki karışım grubunun da MQ değerlerinin arttığı görülmektedir. Saf karışıma göre kül katkıli karışımların MQ değerleri %0.3, %1.7, %3.1 ve %5.1 oranlarında, geopolimer katkıli karışımların ise %9.7, %15.1, %8.5 ve %6.5 oranlarında artış göstermiştir. MQ, kayma gerilmelerine karşı direncin bir göstergesidir. Bu durumda, kül içeriği artışı ile kayma gerilmelerine karşı direncin arttığını, geopolimer katkıli karışımların kül katkıli karışımlara kıyasla daha dirençli olduğunu ve %2.5 geopolimer oranındaki karışımların kayma gerilmelerine karşı en dirençli karışımlar olduğunu söylemek mümkündür.



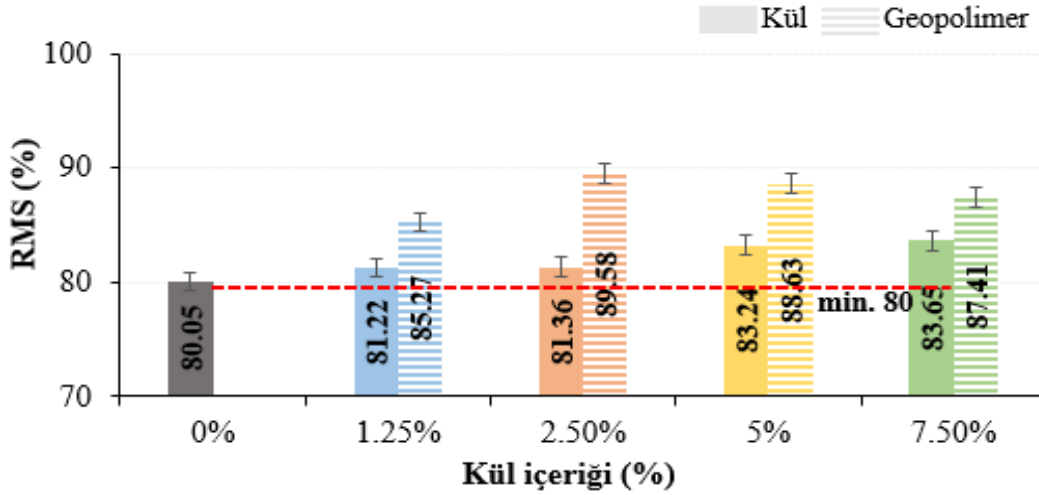
Şekil 5.92 : Numunelere ait MQ değişimleri.

### 5.7.2 RMS test sonuçları

Kül ve geopolimer katkılı HMA'lar üzerinde nem hasarına karşı direnci belirleyebilmek amacıyla saf ve tüm katkılı numuneler RMS deneyine tabi tutulmuştur. Numunelere ait çeşitli özellikler Çizelge 5.31'de, deneyden elde edilen sonuçlar Şekil 5.93'de verilmiştir.

Çizelge 5.31 : Numunelerin özellikleri.

Karışım türü	Ortalama yükseklik	A (hava) (gr)	B (su) (gr)	C (doy) (gr)	Dp (gr/cm <sup>3</sup> )	Dt (gr/cm <sup>3</sup> )	Vh (%)
S	63.50	1246.16	727.30	1246.77	2.399	2.49	3.78
K 1.25	63.50	1250.95	728.17	1252.33	2.387	2.49	4.27
K 2.5	63.10	1245.92	726.73	1246.27	2.398	2.49	3.81
K 5	63.20	1248.66	727.78	1249.29	2.394	2.49	3.96
K 7.5	63.50	1250.38	728.69	1251.40	2.392	2.49	4.05
G 1.25	63.70	1245.29	726.85	1246.07	2.398	2.49	3.80
G 2.5	63.80	1250.62	728.33	1251.42	2.391	2.49	4.10
G 5	63.60	1240.19	724.18	1241.49	2.397	2.49	3.84
G 7.5	64.70	1247.48	728.24	1249.08	2.395	2.49	3.93



**Şekil 5.93 :** Numunelere ait RMS değişimleri.

Şekil 5.93 incelendiğinde kül içeriği artışı ile karışımların RMS değerlerinin arttığı görülmektedir. RMS değeri, karışımların nem hasarına karşı dayanımını göstermektedir. Sonuçlar incelendiğinde, kül katkıli karışımların RMS değerleri saf karışıma göre %1.5, %1.6, %4.0 ve %4.5 oranlarında, geopolimer katkıli karışımların ise %6.5, %11.9, %10.7 ve %9.2 oranlarında artmıştır. Bu durumda, geopolimer katkıli karışımların kül katkılılara kıyasla nem hasarına karşı daha dirençli olduğu ve direnç bakımından en etkili karışımın %2.5 geopolimer katkıli karışımlar olduğu söylenebilir.

### 5.7.3 ITS ve Modifiye Lottman test sonuçları

Saf, kül ve geopolimer katkıli HMA numuneleri üzerinde ilk olarak ITS, daha sonra Modifiye Lottman deneyi uygulanmıştır. AASHTO T283 standardına göre gerçekleştirilen nem hasarı deneyinde, briketler optimum bağlayıcı oranında (%5.0) ve %7±0.5 boşluğa sahip olacak şekilde hazırlanmıştır. Ardından numuneler, iki şekilde gruplandırılmıştır. İlk grup numuneler, 2 saat boyunca 25°C sıcaklıktaki su banyosunda bekletilmiş ve süre bitiminde dakikada 50.8 mm'lik hızla yüklemeye maruz bırakılmış ve numune kırılmıştır. Bu numuneler, “koşullandırılmamış” olarak ifade edilmekte olup bu numunelerden elde edilen değerler “ITS<sub>kuru</sub>” olarak hesap edilmiştir. İkinci grup numuneler ise, önce vakum işlemine tabi tutulmuş ve numunedeki boşlukların %70-80 oranında su ile doldurulmuştur. Ardından numuneler streç film ile sarılmış ve boşluklara doldurulmuş suyun sabit kalması sağlanmıştır. Bundan sonra numuneler, önce 16 saat boyunca -18°C sıcaklıkta dondurucuda, sonra 24 saat boyunca 60°C sıcaklıktaki su banyosunda bekletilmiştir. Son olarak, numuneler 2 saat boyunca 25°C sıcaklıkta su banyosunda da bekletilmiş ve hemen dakikada

50.8 mm'lik yüklemeye maruz bırakılarak kırılmıştır. Bu numuneler de “koşullandırılmış” olarak ifade edilmekte olup elde edilen değerler de “ITS<sub>yaş</sub>” olarak hesap edilmiştir.

Şartlandırılmamış ve şartlandırılmış numunelere ait özellikler Çizelge 5.32 - Çizelge 5.34’de, ITS değerlerinin kül içeriğine göre değişimi Şekil 5.94 ve Şekil 5.95’de, ITSR değerlerinde meydana gelen değişimler ise Şekil 5.96’da verilmiştir.

**Çizelge 5.32 : Şartlandırılmamış numunelere ait özellikler.**

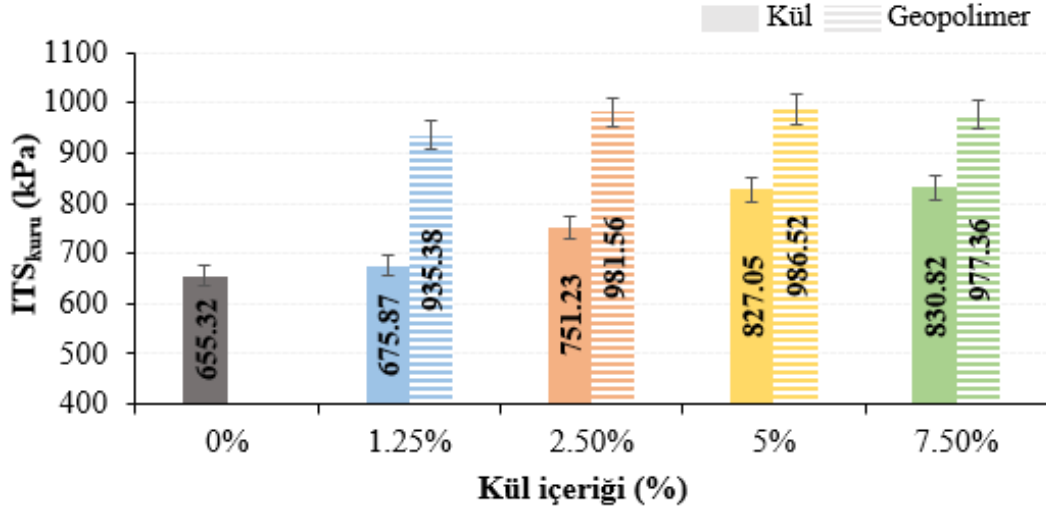
Karışım türü	Ortalama yükseklik	A (hava) (gr)	B (su) (gr)	C (doy) (gr)	Dp (gr/cm <sup>3</sup> )	Dt (gr/cm <sup>3</sup> )	Vh (%)
S	63.50	1242.66	728.99	1247.28	2.398	2.49	3.83
K 1.25	63.60	1243.14	729.93	1249.77	2.391	2.49	4.08
K 2.5	63.60	1245.24	727.85	1251.19	2.379	2.49	4.56
K 5	63.30	1247.47	728.46	1248.77	2.398	2.49	3.83
K 7.5	63.40	1246.53	729.05	1248.71	2.399	2.49	3.78
G 1.25	63.70	1245.08	725.66	1246.57	2.390	2.49	4.13
G 2.5	63.70	1245.04	727.79	1246.88	2.399	2.49	3.79
G 5	63.90	1244.75	726.8	1245.50	2.400	2.49	3.74
G 7.5	64.50	1248.84	728.09	1250.38	2.391	2.49	4.09

**Çizelge 5.33 : Şartlandırılmış kül katkılı numunelere ait özellikler.**

Karışım türü	No	Numune yüksekliği (mm)				A (hava) (gr)	C (su) (gr)	B (doy) (gr)	Vakum sonrası		V (cm <sup>3</sup> )	Dp (gr/cm <sup>3</sup> )	Dt (gr/cm <sup>3</sup> )	Vh (%)	Vsu (cm <sup>3</sup> )	Doygunluk (%)	Maks. yük (kg)	ITS <sub>yaş</sub> (kPa)
		1	2	3	Ort				B (gr)									
S	1	64.18	63.35	63.40	63.64	1245.24	725.26	1255.03	1269.26	529.77	2.351			24.02	72.00	6.24	584.15	
	2	64.48	63.57	63.94	64.00	1246.19	721.88	1257.28	1271.98	535.40	2.328			25.79	76.50	5.65	522.09	
	3	63.55	63.55	63.40	63.50	1247.87	724.10	1257.24	1272.85	516.14	2.418	2.524	6.30	24.98	76.86	5.64	520.60	
	Ortalamalar										2.365			75.12	5.84	542.28		
K 1.25	1	63.26	63.58	63.15	63.33	1247.85	729.16	1257.05	1272.71	527.89	2.364			24.86	70.06	6.29	600.05	
	2	63.09	63.17	63.49	63.25	1248.19	728.41	1258.69	1274.15	530.28	2.354			25.96	72.83	5.81	540.47	
	3	64.01	63.94	63.86	63.94	1249.24	728.35	1260.85	1276.24	532.50	2.346	2.524	6.72	27.00	75.44	5.79	540.24	
	Ortalamalar										2.355			72.78	5.96	560.25		
K 2.5	1	64.18	64.26	64.27	64.24	1243.60	730.10	1253.40	1268.30	523.30	2.376			24.70	77.22	6.20	596.84	
	2	63.95	63.51	63.44	63.63	1245.40	729.70	1256.50	1270.18	526.80	2.364			24.78	76.95	6.70	644.21	
	3	63.06	63.27	63.62	63.32	1244.10	729.05	1254.16	1269.06	525.11	2.369	2.524	6.11	24.96	77.76	6.95	650.30	
	Ortalamalar										2.370			77.31	6.62	630.45		
K 5	1	63.25	63.44	63.59	63.43	1248.24	732.25	1258.19	1273.02	525.94	2.373			24.78	76.53	7.60	730.18	
	2	63.22	63.28	63.45	63.32	1249.01	731.84	1260.05	1273.86	528.21	2.365			24.85	76.42	6.84	631.29	
	3	63.81	63.50	63.66	63.66	1249.57	732.16	1259.74	1274.53	527.58	2.368	2.524	6.16	24.96	76.85	7.40	724.28	
	Ortalamalar										2.369			76.60	7.28	695.25		
K 7.5	1	64.12	64.06	63.88	64.02	1250.05	733.25	1260.14	1274.85	526.89	2.373			24.80	76.54	7.65	723.06	
	2	63.54	63.47	63.88	63.63	1251.46	732.94	1262.27	1276.49	529.33	2.364			25.03	76.89	7.42	698.80	
	3	63.43	63.44	63.57	63.48	1252.87	733.85	1262.44	1277.05	528.59	2.370	2.524	6.15	24.18	74.38	7.35	694.23	
	Ortalamalar										2.369			75.94	7.47	705.36		

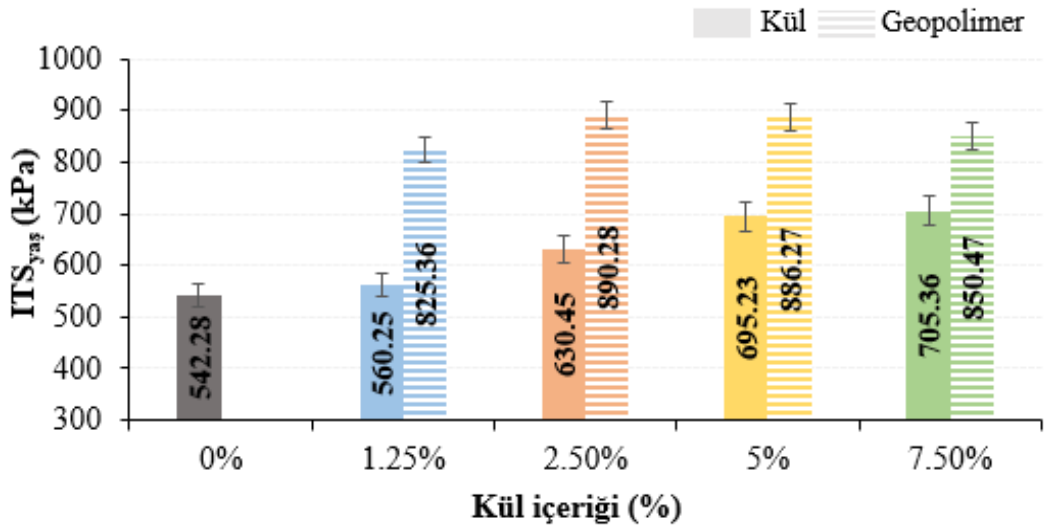
Çizelge 5.34 : Şartlandırılmış geopolimer katkıli numunelere ait özellikler.

Karışım türü	No	Numune yüksekliği (mm)				A (hava) (gr)	C (su) (gr)	B (doy) (gr)	Vakum sonrası B (gr)	V (cm <sup>3</sup> )	Dp (gr/cm <sup>3</sup> )	Dt (gr/cm <sup>3</sup> )	Vh (%)	Vsu (cm <sup>3</sup> )	Doygunluk (%)	Maks. yük (kg)	ITS <sub>yaş</sub> (kPa)
		1	2	3	Ort												
S	1	64.18	63.35	63.40	63.64	1245.24	725.26	1255.03	1269.26	529.77	2.351			24.02	72.00	6.24	584.15
	2	64.48	63.57	63.94	64.00	1246.19	721.88	1257.28	1271.98	535.40	2.328			25.79	76.50	5.65	522.09
	3	63.55	63.55	63.40	63.50	1247.87	724.10	1257.24	1272.85	516.14	2.418	2.524	6.30	24.98	76.86	5.64	520.60
	Ortalamalar										2.365			75.12	5.84	542.28	
G 1.25	1	63.18	63.52	63.47	63.39	1248.82	730.26	1258.14	1273.51	527.88	2.366			24.69	73.19	8.95	820.14
	2	63.26	63.19	63.85	63.43	1249.51	731.16	1259.84	1274.28	528.68	2.363			24.77	73.32	8.62	829.74
	3	63.44	63.27	63.69	63.47	1249.18	730.31	1259.72	1275.06	529.41	2.360	2.524	6.39	25.88	76.50	8.74	826.20
	Ortalamalar										2.363			74.34	8.77	825.36	
G 2.5	1	64.15	64.06	63.98	64.06	1249.64	729.05	1259.30	1274.58	530.25	2.357			24.94	73.55	9.31	902.86
	2	64.01	64.08	64.12	64.07	1248.53	730.73	1258.24	1273.26	527.51	2.367			24.73	73.31	8.96	866.68
	3	63.82	63.55	63.76	63.71	1249.00	730.81	1258.96	1274.01	528.15	2.365	2.524	6.39	25.01	74.05	9.24	901.30
	Ortalamalar										2.363			73.64	9.17	890.28	
G 5	1	64.03	64.16	64.12	64.10	1249.34	731.01	1259.89	1274.11	528.88	2.362			24.77	74.21	9.24	891.25
	2	63.95	63.86	63.88	63.90	1248.97	731.15	1258.99	1273.15	527.84	2.366			24.18	72.58	8.95	869.38
	3	63.80	63.54	63.75	63.70	1249.17	731.54	1259.44	1274.29	527.90	2.366	2.524	6.31	25.12	75.40	9.42	898.17
	Ortalamalar										2.365			74.06	9.20	886.27	
G 7.5	1	63.20	63.28	63.87	63.45	1251.85	732.75	1261.26	1276.05	528.51	2.369			24.20	73.33	9.04	881.77
	2	63.55	63.54	63.49	63.53	1251.97	732.63	1262.85	1277.91	530.22	2.361			25.94	78.35	9.00	865.30
	3	63.37	63.44	63.56	63.46	1252.16	733.05	1261.40	1277.52	528.35	2.370	2.524	6.24	25.36	76.87	8.59	804.33
	Ortalamalar										2.367			76.18	8.88	850.47	



Şekil 5.94 : Numunelere ait ITS<sub>kuru</sub> değişimleri.

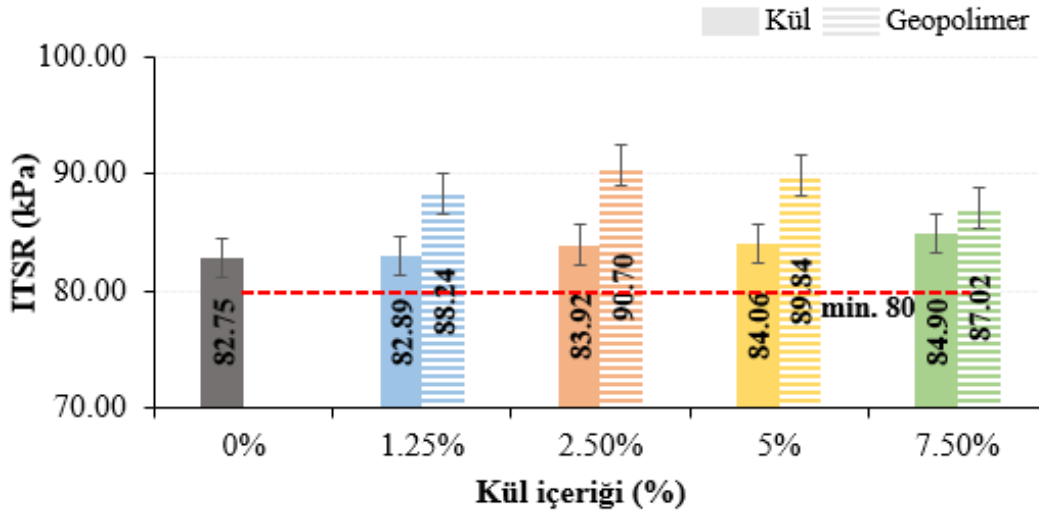
Tüm karışım numunelerine ait ITS<sub>kuru</sub> değerleri incelendiğinde, saf karışıma kıyasla kül ve geopolimer katkıli karışımların ITS değerlerinin arttığı, hatta geopolimer katkıli karışımların ITS<sub>kuru</sub> değerlerinin çok daha yüksek olduğu görülmektedir. Kül katkıli karışımların ITS<sub>kuru</sub> değerleri saf karışıma göre sırayla %3.1, %14.6, %26.2 ve %26.8 oranlarında artarken geopolimer katkıli karışımların ise %42.7, %49.8, %50.5 ve %49.1 oranlarında artış gösterdiği görülmüştür.



Şekil 5.95 : Numunelere ait ITS<sub>yaş</sub> değişimleri.

Şekil 5.95 incelendiğinde, genel olarak kül ve geopolimer katkıli karışımların saf karışıma kıyasla ITS<sub>yaş</sub> değerlerinin arttığı görülmektedir. Kül katkıli karışımlarda ITS<sub>yaş</sub> değerlerinde meydana gelen artışlar %3.3, %16.3, %28.2 ve %30.1 oranlarında, geopolimer katkıli karışımlarda ise %52.2, %64.2, %63.4 ve %56.8 oranlarında oluşmuştur. Şekil 5.94

ve Şekil 5.95 sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, geopolimer katkıli karışımların saf ve kül katkıli karışımlara kıyasla daha yüksek ITS değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Bu sonuçlara göre, bazik yapıdaki kül katkısının, asidik yapıdaki asfalt bağlayıcı ve agrega arasında iyi bir bağlanma özelliği sağlayarak ITS değerlerini önemli ölçüde iyileştirdiği sonucuna varılmıştır. Diğer bir deyişle, geopolimer oluşumunun karışımların kohezyonunu arttırdığı ifade edilebilir.



Şekil 5.96 : Numunelere ait ITS değerleri.

Şekil 5.96 incelendiğinde, kül içeriği artışıyla numunelerin ITS değerlerinin artış gösterdiği görülmektedir. Kül katkıli karışımların ITS değerlerinin saf karışıma göre sırasıyla %0.2, %1.4, %1.6 ve %2.6 oranlarında, geopolimer katkıli karışımların ise %6.6, %9.6, %8.6 ve 5.2 oranlarında artışlar görülmüştür. ITS değerinin yüksek olması, karışımların sudan kaynaklı bozulmalara karşı göstermiş olduğu direncin yüksek olduğunu göstermektedir. Bu sonuçlara göre, geopolimer katkıli karışımların ITS değerlerinin daha yüksek olduğu ve en yüksek değer %2.5 geopolimer katkıli karışımlardan elde edildiği görülmektedir. Bu durumda, %2.5 geopolimer katkıli karışımların sudan kaynaklı bozulmalara karşı daha dirençli olduğunu ifade etmek mümkündür. Bu sonucun, geopolimer katkıli karışımlarda asfalt+kül+AA'nın iyi bir kimyasal reaksiyon sağlaması ve bağlayıcının agrega ile birleşmesi sonucu iyi bir adezyon ve kohezyon sağlaması sebebiyle meydana geldiği değerlendirilmektedir.

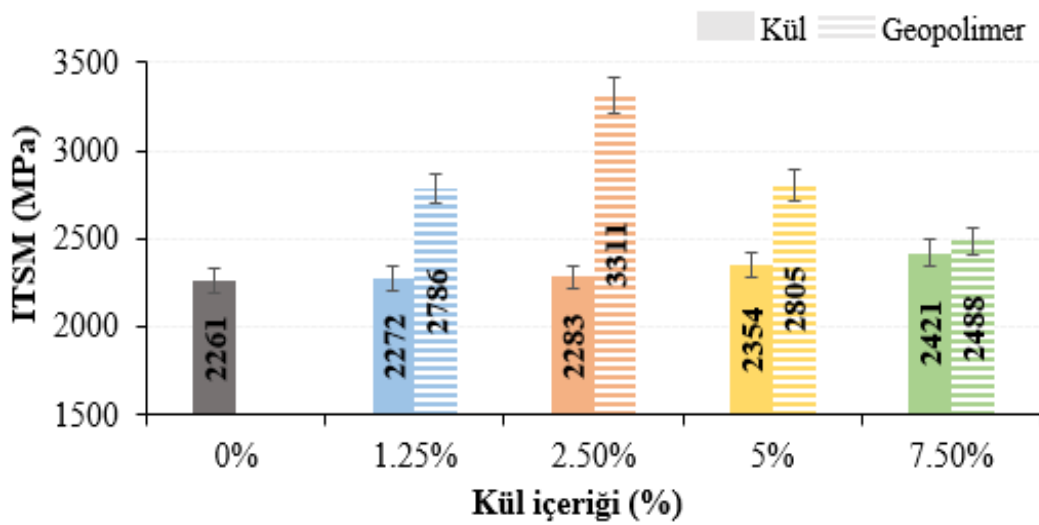
#### 5.7.4 ITSM test sonuçları

Saf, kül ve geopolimer katkıli karışımlar üzerinde BS DD 213 standardına uygun olarak IPC test cihazında 25°C sıcaklıkta ITSM deneyi uygulanmıştır. Deneyde numuneler

üzerinde ilk olarak 5 adet ön yükleme, daha sonra 5 defa deney asıl yüklemesi yapılarak karışımların dinamik yükler karşısındaki rijitlikleri belirlenmiştir. Deneyde yük periyodu 3000 ms, yük artış süresi 124 ms, poisson oranı 0.35 ve hedef deformasyon ise 5  $\mu\text{m}$  olarak seçilmiştir. Cihazda yatay ekseninde 5  $\mu\text{m}$  deformasyon meydana getirecek yük otomatik olarak belirlenmektedir. Numuneye uygulanan 5 darbe sonucunda ITSM değerleri bilgisayarda otomatik verilerek elde edilen değerlerin ortalamasından numunenin ITSM değeri belirlenmektedir. Numunelere ait özellikler Çizelge 5.35’de, 25 °C sıcaklıktaki karışım numunelerine ait ITSM değerlerinin kül içeriğine bağlı değişimi ise Şekil 5.97’de verilmiştir.

**Çizelge 5.35 : Numunelerin özellikleri (25 °C).**

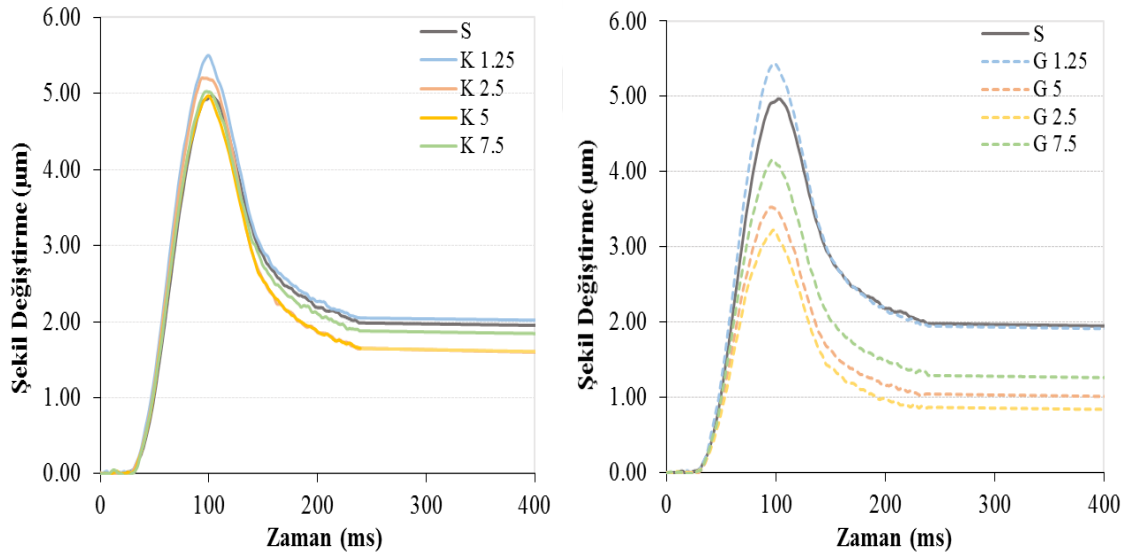
Karışım türü	Ortalama yükseklik	A (hava) (gr)	B (su) (gr)	C (doy) (gr)	Dp (gr/cm <sup>3</sup> )	Dt (gr/cm <sup>3</sup> )	Vh (%)
S	63.10	1239.85	725.05	1240.33	2.406	2.49	3.49
K 1.25	63.60	1247.46	727.62	1248.21	2.396	2.49	3.88
K 2.5	63.90	1248.33	727.82	1249.30	2.394	2.49	3.98
K 5	63.10	1244.17	726.08	1245.43	2.396	2.49	3.91
K 7.5	63.30	1250.36	729.36	1251.44	2.395	2.49	3.94
G 1.25	63.80	1247.77	727.88	1248.39	2.397	2.49	3.85
G 2.5	64.00	1247.86	728.53	1248.71	2.399	2.49	3.78
G 5	63.70	1248.77	728.1	1248.85	2.398	2.49	3.81
G 7.5	64.10	1247.87	728.31	1248.75	2.398	2.49	3.83



**Şekil 5.97 : Numunelere ait 25 °C sıcaklıktaki ITSM değişimleri.**

Şekil 5.97 incelendiğinde, kül içeriği artışıyla karışımların rijitlik modülü değerlerinde önemli değişimler meydana geldiği görülmektedir. Bu değişimler, kül katkıli karışımlar için sırasıyla %1.0, %1.2, %4.1 ve %7.1 oranlarında kısmi artış şeklinde iken geopolimer katkıli karışımlar için ise sırasıyla %23.2, %46.4, %24.1 ve %10.0 gibi önemli oranlarında artış şeklindedir. Bu sonuçlara göre, geopolimer katkıli karışımların kül katkıli karışımlara kıyasla ITSM değerlerinin daha yüksek, en yüksek değer ise %2.5 geopolimer katkıli karışımlardan elde edildiği görülmektedir. ITSM değeri, dinamik yükler (trafik) etkisiyle kaplamanın altında meydana gelen ve yorulma çatlaklarına neden olan çekme ve basınç gerilmelerinin neden olduğu kalıcı deformasyonlara karşı direnci ifade etmektedir. Bu durumda, %2.5 geopolimer katkıli karışımlarla hazırlanan kaplamaların tekrarlı yüklerle kaplama altında meydana gelen kalıcı deformasyonlara karşı dirençlerinin saf karışımlara kıyasla %46.4, en yüksek kül katkıli karışımlara kıyasla %36.8 oranında daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

25 °C sıcaklıktaki tüm karışım numunelerine ait şekil değiştirme-zaman grafiği Şekil 5.98’de verilmiştir.



**Şekil 5.98 :** Numunelere ait şekil değiştirme-zaman grafikleri (25°C).

Şekil 5.98 incelendiğinde, kül katkısıyla saf karışıma göre şekil değiştirmenin kısmen arttığı, ancak geopolimer katkısıyla saf karışıma kıyasla şekil değiştirmenin azaldığı görülmektedir. Şekil değiştirmenin azalması, karışımın rijitliğinin artması sebebiyle geopolimer katkıli karışımlar için beklenen bir sonuçtur. Sonuçlar incelendiğinde, %2.5 geopolimer katkıli karışımın diğer oranlara nazaran şekil değiştirme değerinin daha az olduğu görülmektedir. Bu durumda, %2.5 geopolimer oranındaki karışımın rijitliğinin daha

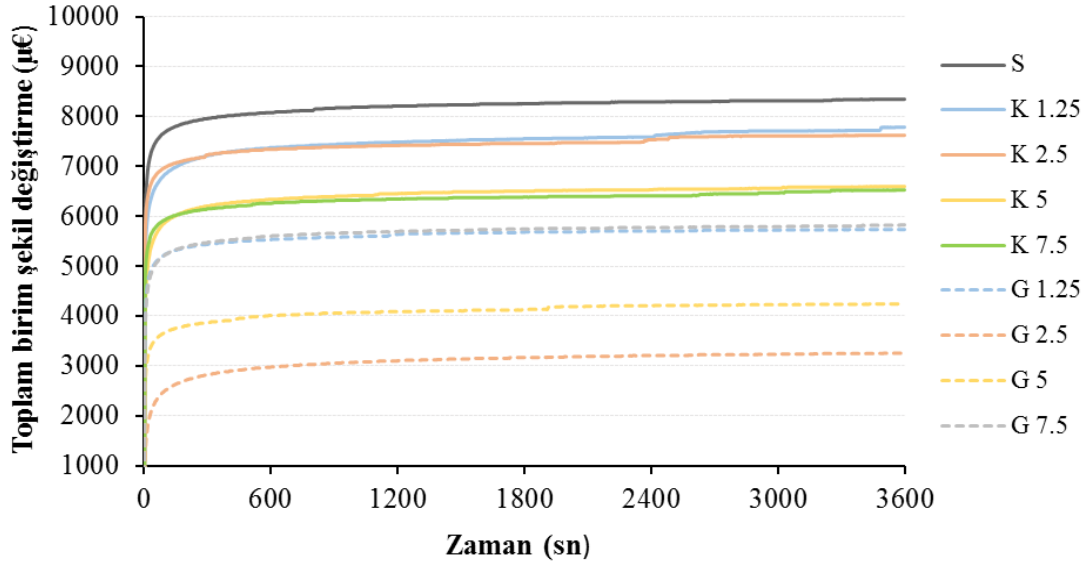
yüksek olduğunu dolayısıyla dinamik yükler altında daha rijit davranış sergilediğini söylemek mümkündür.

### 5.7.5 Statik sünme test sonuçları

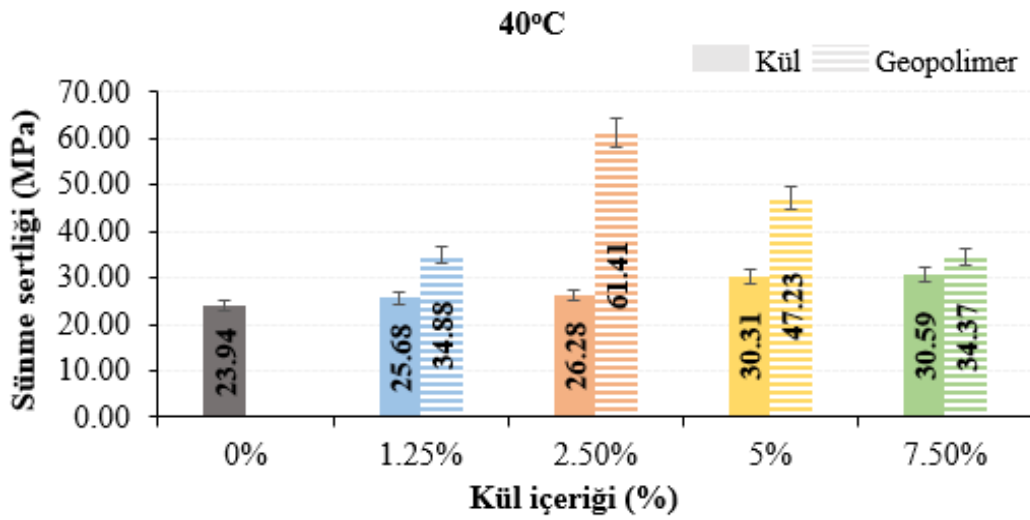
Saf, kül ve geopolimer katkılı numuneler üzerinde uygulanan statik sünme deneyi IPC test cihazında 40°C ve 50 °C sıcaklıklarda uygulanmıştır. Numuneler deneye tabi tutulmadan önce 3 saat boyunca deney sıcaklığında iklimlendirme kabini içinde şartlandırmaya maruz bırakılmıştır. Süre sonunda, numune üzerinde ilk olarak 10 dk. 20 kPa'lık ön yükleme uygulanmıştır. Ardından LVDT'lerdeki değişimler sıfırlanarak 200 kPa'lık asıl yükleme yapılmaya başlanmış ve bu yükleme 1 saat boyunca sürdürülmüştür. Deney sırasında bilgisayar her 4 sn.'de bir düşey deformasyonları kaydetmiş ve sünme sertliği değerini otomatik olarak hesaplamıştır. 40°C sıcaklıkta statik sünme deneyine tabi tutulan numunelerin özellikleri Çizelge 5.36'da, numunelerin ait toplam birim şekil değiştirme – zaman grafiği Şekil 5.99'da, sünme sertliği değerlerinin kül içeriğine göre değişimi ise Şekil 5.100'de verilmiştir.

**Çizelge 5.36 : Numunelerin özellikleri (40°C).**

Karışım türü	Ortalama yükseklik	A (hava) (gr)	B (su) (gr)	C (doy) (gr)	Dp (gr/cm <sup>3</sup> )	Dt (gr/cm <sup>3</sup> )	Vh (%)
S	63.70	1246.41	726.13	1246.98	2.393	2.49	4.01
K 1.25	62.90	1249.67	727.65	1250.62	2.390	2.49	4.15
K 2.5	63.70	1249.02	727.08	1249.67	2.390	2.49	4.13
K 5	63.40	1253.47	728.46	1254.16	2.384	2.49	4.36
K 7.5	63.80	1249.47	728.70	1250.43	2.395	2.49	3.94
G 1.25	63.80	1247.44	727.53	1248.09	2.396	2.49	3.88
G 2.5	63.90	1247.62	727.60	1248.17	2.397	2.49	3.87
G 5	63.80	1247.09	727.66	1247.46	2.399	2.49	3.77
G 7.5	64.00	1246.82	727.34	1247.89	2.395	2.49	3.93



Şekil 5.99 : Toplam birim şekil değiştirme – zaman grafiği (40°C).



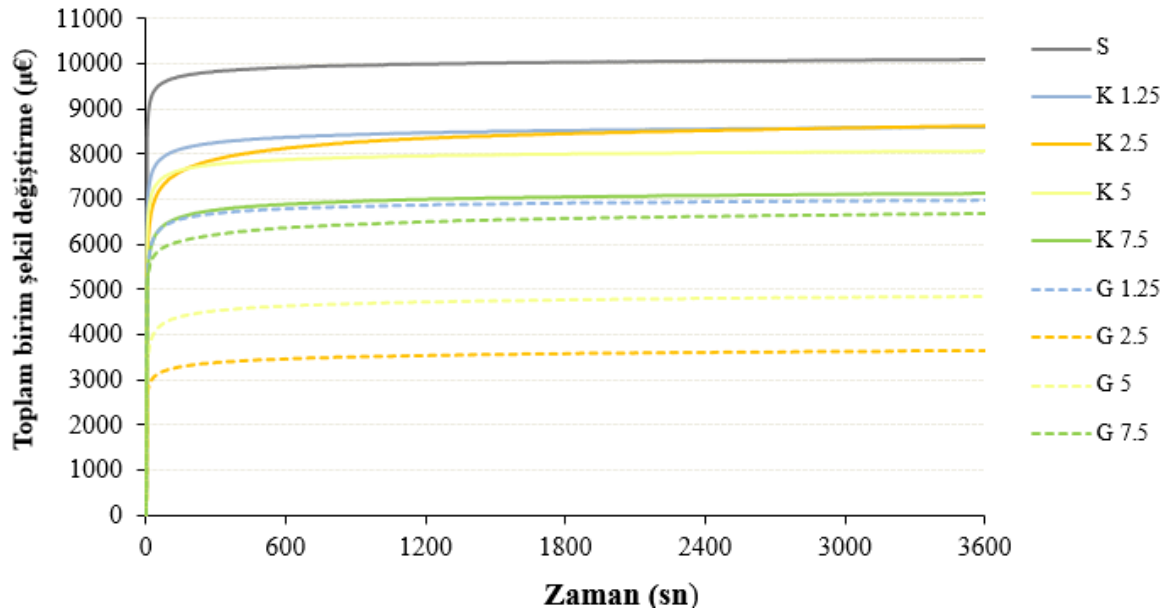
Şekil 5.100 : Numunelere ait 40 °C sıcaklıktaki sünme sertliği değişimleri.

Şekil 5.100'de yer alan sonuçlar incelendiğinde, kül ve geopolimer katkı karışımların saf karışıma kıyasla, 40°C sıcaklıkta daha yüksek sünme sertliği değerine sahip olduğu görülmektedir. Kül katkıli karışım numunelerinin sünme sertliği değerlerinde meydana gelen artışlar saf karışıma kıyasla sırasıyla %7.3, %9.8, %26.6 ve %27.8 oranlarında meydana gelirken geopolimer katkıli karışımların ise sırasıyla %45.7, %156.5, %97.3 ve %43.6 gibi yüksek oranlarda meydana geldiği tespit edilmiştir. Bununla birlikte, geopolimer katkıli karışımların kül katkıli karışımlara kıyasla daha yüksek sünme sertliği değerlerine sahip olduğu görülmektedir.

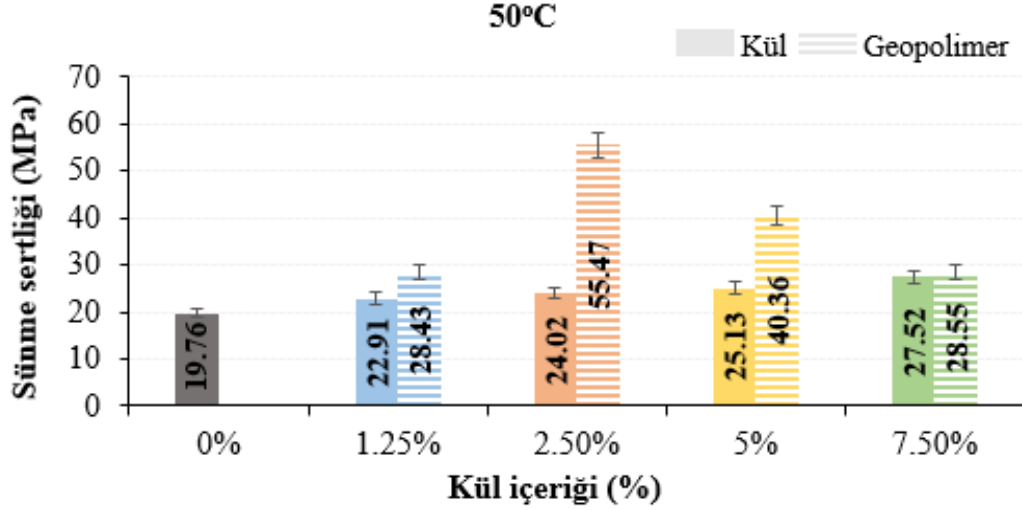
Tüm karışımlara ait 50°C sıcaklıkta gerçekleştirilen statik sünme deneyine tabi tutulan numunelerin özellikleri Çizelge 5.37’de, numunelerin ait toplam birim şekil değiştirme – zaman grafiği Şekil 5.101’de, sünme sertliği değerlerinin kül içeriğine göre değişimi ise Şekil 5.102’de verilmiştir.

**Çizelge 5.37 : Numunelerin özellikleri (50°C).**

Karışım türü	Ortalama yükseklik	A (hava) (gr)	B (su) (gr)	C (doy) (gr)	Dp (gr/cm <sup>3</sup> )	Dt (gr/cm <sup>3</sup> )	Vh (%)
S	63.70	1249.16	728.53	1250.08	2.395	2.49	3.93
K 1.25	64.00	1249.64	728.64	1250.68	2.394	2.49	3.98
K 2.5	63.60	1248.49	728.99	1249.68	2.398	2.49	3.82
K 5	63.50	1251.30	727.68	1251.95	2.387	2.49	4.27
K 7.5	63.60	1249.97	728.27	1250.61	2.393	2.49	4.01
G 1.25	63.90	1248.31	727.92	1248.82	2.396	2.49	3.88
G 2.5	63.60	1245.17	727.08	1245.81	2.400	2.49	3.72
G 5	64.40	1250.49	728.22	1251.28	2.391	2.49	4.11
G 7.5	64.30	1247.18	728.07	1248.37	2.397	2.49	3.85



**Şekil 5.101 : Toplam birim şekil değiştirme – zaman grafiği (50°C).**



**Şekil 5.102 :** Numunelere ait 50 °C sıcaklıktaki sünme sertliği değişimleri.

Şekil 5.101 ve 5.102'deki sonuçlar incelendiğinde, kül ve geopolimer katkıli karışımların saf karışıma kıyasla, 50°C sıcaklıkta daha yüksek sünme sertliği değerine sahip olduğu ancak doğal olarak 40 °C sıcaklık değerine göre daha düşük sünme sertliklerinin elde edildiği görülmektedir. Kül katkıli karışım numunelerinin 50°C sıcaklıktaki sünme sertliği değerlerinde meydana gelen artışlar saf karışıma kıyasla sırasıyla %15.9, %21.6, %27.2 ve %39.3 oranlarında, geopolimer katkıli karışımların ise yine sırasıyla %43.9, %180.7, %104.3 ve %44.5 oranlarında oluşmuştur.

Her iki sıcaklıkta da, geopolimer katkıli karışımların kül katkıli karışımlara kıyasla daha yüksek sünme sertliği değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Bu sonuç, geopolimer (asfalt+kül+AA) katkısının agrega ile iyi bir yapışma yeteneği göstermesi ve böylece geopolimer katkıli HMA'ların kalıcı deformasyonlara karşı direncini arttırdığı şeklinde değerlendirilmektedir. Bu durumda, yüksek sıcaklıklar altında %2.5 geopolimer katkıli karışımların tekerlek izi deformasyonuna karşı direncinin, diğer karışımlara kıyasla, daha yüksek olduğunu ifade etmek mümkündür.

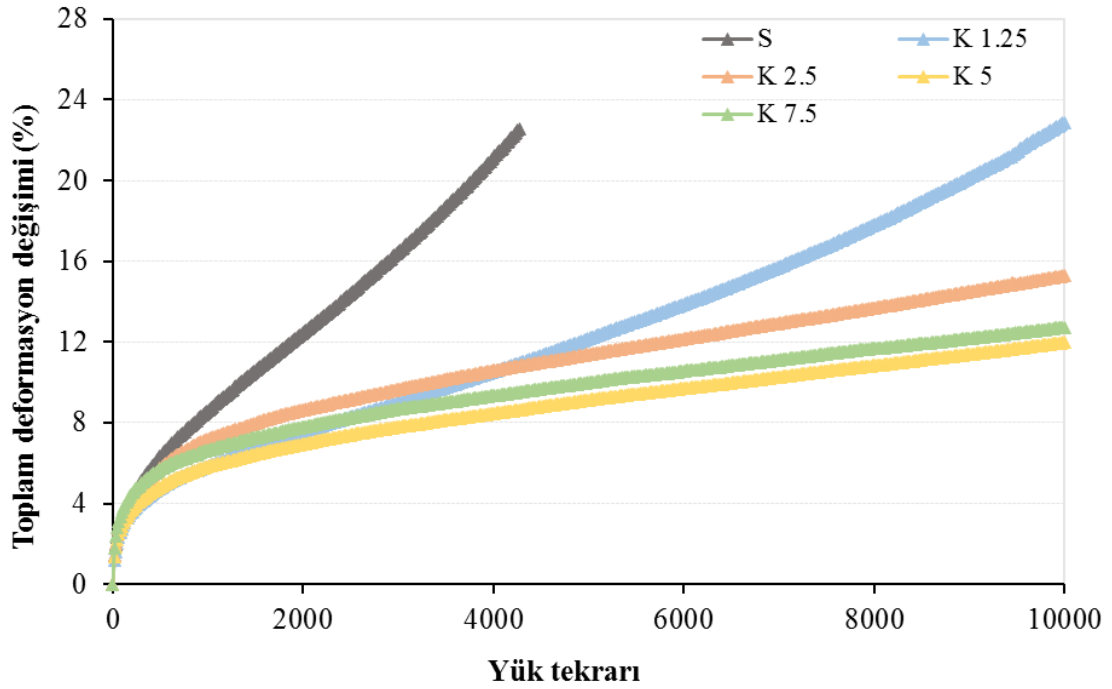
### 5.7.6 Dinamik sünme test sonuçları

Çalışmada saf, kül ve geopolimer katkıli karışımlar 50 °C sıcaklıkta IPC test cihazında haversine yükleme koşulunda dinamik sünme deneyine tabi tutuldu. Deneyde, ana yüklemmeden önce numuneler 10 dakika boyunca 10 kPa ön yüklemeye maruz bırakıldı. Ardından ana yük olarak, 10 kPa'lık bir temas gerilimi ve 500 kPa'lık bir saptırıcı gerilimi olan sinüzoidal bir yüklemeye tabi tutuldu. Deneyde yükleme periyodu 1000 ms, dinlenme süresi ise 500ms olarak seçilirken numuneler üzerinde 10.000 darbe uygulandıktan sonra

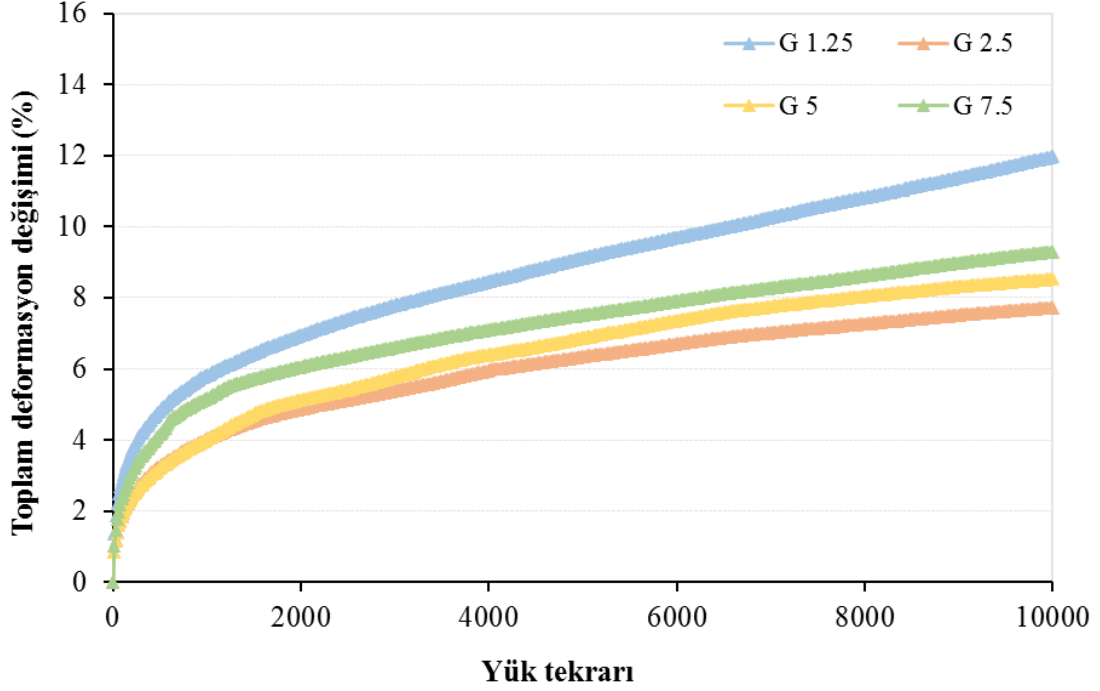
deney sonlandırılmıştır. Deneye tabi tutulan numunelere ait özellikler Çizelge 5.38’de, numunelerde meydana gelen toplam deformasyon değişimi – yük tekrarı sonuçları Şekil 5.103 ve Şekil 5.104’de verilmiştir.

**Çizelge 5.38 : Numunelerin özellikleri.**

Karışım türü	Ortalama yükseklik	A (hava) (gr)	B (su) (gr)	C (doy) (gr)	Dp (gr/cm <sup>3</sup> )	Dt (gr/cm <sup>3</sup> )	Vh (%)
S	63.20	1244.47	726.53	1245.18	2.399	2.49	3.76
K 1.25	63.60	1246.30	727.34	1246.94	2.399	2.49	3.79
K 2.5	63.10	1244.87	726.58	1245.43	2.399	2.49	3.76
K 5	63.70	1249.02	727.08	1249.67	2.390	2.49	4.13
K 7.5	63.60	1248.23	728.39	1248.81	2.399	2.49	3.79
G 1.25	64.10	1252.74	727.11	1253.26	2.381	2.49	4.50
G 2.5	63.70	1248.47	728.00	1248.85	2.397	2.49	3.85
G 5	63.90	1247.62	727.60	1248.17	2.397	2.49	3.87
G 7.5	64.20	1247.35	727.12	1248.46	2.393	2.49	4.03

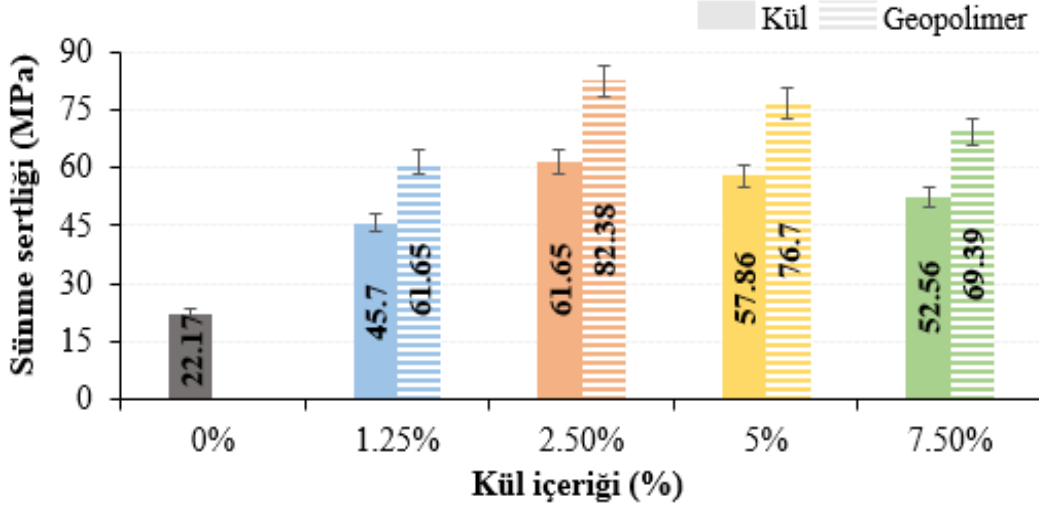


**Şekil 5.103 : Saf ve kül katkıli karışımların toplam deformasyon ilişkisi-yük tekrarı.**



**Şekil 5.104 :** Geopolimer katkılı karışımların toplam deformasyon ilişkisi-yük tekrarı.

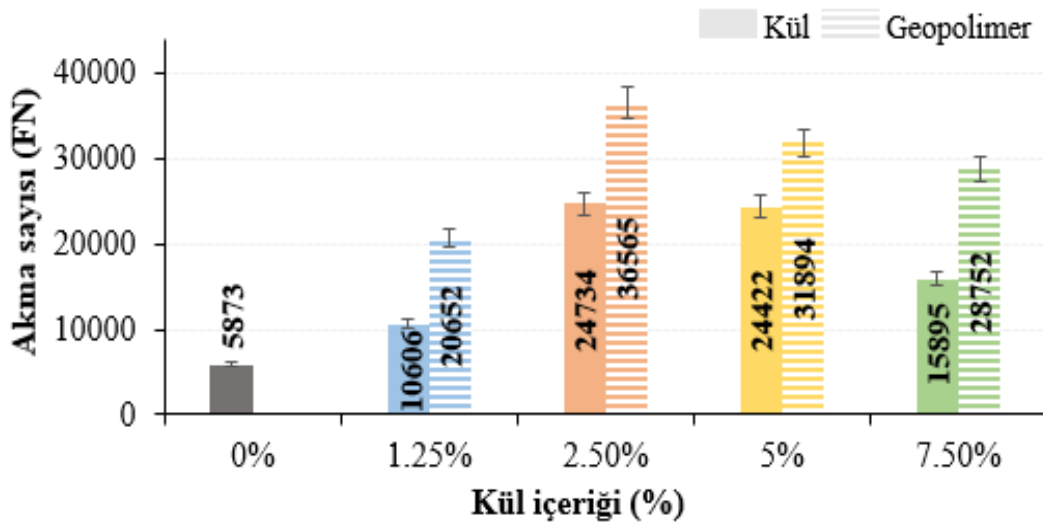
Şekil 5.103 ve Şekil 5.104 birlikte incelendiğinde, saf ve kül katkılı karışımlarda deformasyonun başlangıçta hızlı şekilde arttığı ve bu artışın doğrusal olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, geopolimer katkılı karışımların deformasyonu ise saf ve kül katkılılara nazaran daha yavaş artış göstermiştir. Ayrıca, saf karışımda görüldüğü üzere, bu artışla beraber numune üçüncü bölgede bozulmaya başlamış ve daha sonra tekrar hızlı bir şekilde artma eğilimindedir. Kül ve geopolimer katkılı karışımlarda ise numuneler üçüncü bölgeye geçince teste son verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, kül ve geopolimer katkılı numunelerin saf karışım ile herhangi bir yük tekrarına kadar benzer davranış göstermediği görülmektedir. Saf karışımda deneye 4200 yük tekrarına kadar devam edilmiştir. Bu sebeple, saf numune ile doğru bir şekilde kıyaslama yapılabilmesi amacıyla kül ve geopolimer katkılı karışımların 4200 yük tekrarındaki sünme sertliği değerleri dikkate alınmıştır. Elde edilen sünme sertliği değerlerinin katkı içeriğine göre değişimi Şekil 5.105’de verilmiştir.



Şekil 5.105 : Karışımların sünme sertliği değerleri.

Şekil 5.105 incelendiğinde, katkı oranı artışı ile saf karışıma kıyasla sünme sertliği değerlerinde önemli artışlar meydana geldiği görülmektedir. Bu artışlar kül katkıli numunelerde saf numuneye göre, %106.1, %178.1, %161.0 ve %137.1 gibi önemli oranlarda oluşurken, geopolimer katkıli numunelerin ise %178.1, %271.6, %246.0 ve %213.0 gibi oldukça büyük oranlarda meydana gelmiştir. Bu sonuca göre, geopolimer katkıli karışımların (özellikle %2.5 oranında) saf karışıma göre yüksek sıcaklıklarda tekrarlı yüklerin neden olduğu kalıcı deformasyonlara karşı direnci çok daha yüksektir.

Çalışmada, sıcak karışımların akma sayısı (FN) değerleri de, yük tekrarı ve sünme sertliği değerleri kullanılarak elde edilmiştir. Elde edilen FN değerleri Şekil 5.106'da verilmiştir.



Şekil 5.106 : Karışımların FN değerleri.

HMA'ların tekerlek izi direnci ile ilişkili olan FN, yük tekrarı ile sünme sertliği değerinin çarpımı ile yük tekrar sayısının grafiğinden elde edilmektedir. Elde edilen sonuçlara göre, saf karışıma göre kül katkılı numunelerin akma değerleri sırasıyla %80.6, %321.1, %315.8 ve %170.6 oranlarında artış gösterirken, geopolimer katkılı numunelerde ise bu artışlar %251.6, %522.6, %443.1 ve %389.6 gibi büyük oranlarda oluşmuştur. Bu sonuca göre, tekerlek izi deformasyonuna karşı en yüksek direncin %2.5 geopolimer katkılı karışımlar olduğu ifade edilebilir. Bunun sebebinin ise, geopolimer (asfalt+kül+AA) oluşumunun agrega ile iyi bir yapışma yeteneği göstermesi ve böylece karışımda iyi bir adezyon kuvvetinin oluşması ve ayrıca bağlayıcının yüksek sıcaklık direncini arttırması sebebiyle geopolimer katkılı kaplamanın deformasyon direncinin arttığı şeklinde değerlendirilmektedir.

### 5.7.7 Yorulma test sonuçları

Saf, kül ve geopolimer katkılı karışım numunelerinin orta sıcaklıklardaki yorulma dayanımını belirleyebilmek amacıyla tüm numuneler 25°C sıcaklıkta, 3500N ve 4000N gerilme seviyelerinde yorulma testine tabi tutulmuştur. Teste başlamadan önce tüm numuneler IPC cihazının iklimlendirme kabiniinde 25°C sıcaklıkta 3 saat boyunca koşullandırılmaya maruz bırakılmıştır. 3 saatin sonunda, cihaz aparatına yerleştirilen numuneye paralel olarak düşey deformasyonu belirleyebilmek amacıyla LVDT'ler bağlanıp ayarlanmıştır. Testte, yükleme periyodu 1.5 sn olarak alınmış, bu da 1.376 sn. dinlenme süresi, 0.124 sn. yük etki süresi olarak ayarlanmıştır. Deney bitiminde, numunelerin yük tekrar sayıları ile bu tekrara tekabül eden düşey deformasyonlar belirlenmiştir. Bu esnada numunenin kırıldığı maksimum yük tekrar sayısı " $N_{maks}$ ", maksimum yük tekerrür sayısındaki deformasyonları ise " $\delta_{maks}$ " sembolize etmektedir. Deney bitiminde elde edilen sonuçlar kullanılarak her numune için yük tekrar sayısı – deformasyon grafikleri çizilmiş ve buradan II. ve III. bölgeler tespit edilmiştir. Ardından, bu bölgelere teğetler çizilerek doğru denklemleri elde edilmiş ve bu iki denklem birbirine eşitlenerek kesişim noktasından yorulma değerleri " $N_f$ " belirlenmiştir. Daha sonra, numunelerin elde edilen " $N_f$ " değerine karşılık gelen deformasyon miktarları " $\delta_f$ " tespit edilmiştir. Bununla birlikte, elde edilen grafiklerden II. bölgede yük deformasyon eğrisinde eğimin artmaya başladığı nokta olan çatlak başlangıcı yük tekrar sayıları " $N_i$ " ve buna denk gelen deformasyon miktarı " $\delta_i$ " belirlenmiştir. Ayrıca, " $N_f$ " değerleri ile I. bölgenin sonu olan çatlak başlangıcı yük tekrar sayısı arasındaki farktan çatlak ilerlemesi yük tekrar sayısı " $N_p$ " değerleri elde edilmiştir.

“N<sub>i</sub>-N<sub>f</sub>” aralığında çatlağın her bir mm ilerlemesi için gerekli olan yük tekrar sayıları “r<sub>p</sub>” değerleri Denklem (2.32) yardımı ile hesaplanmıştır.

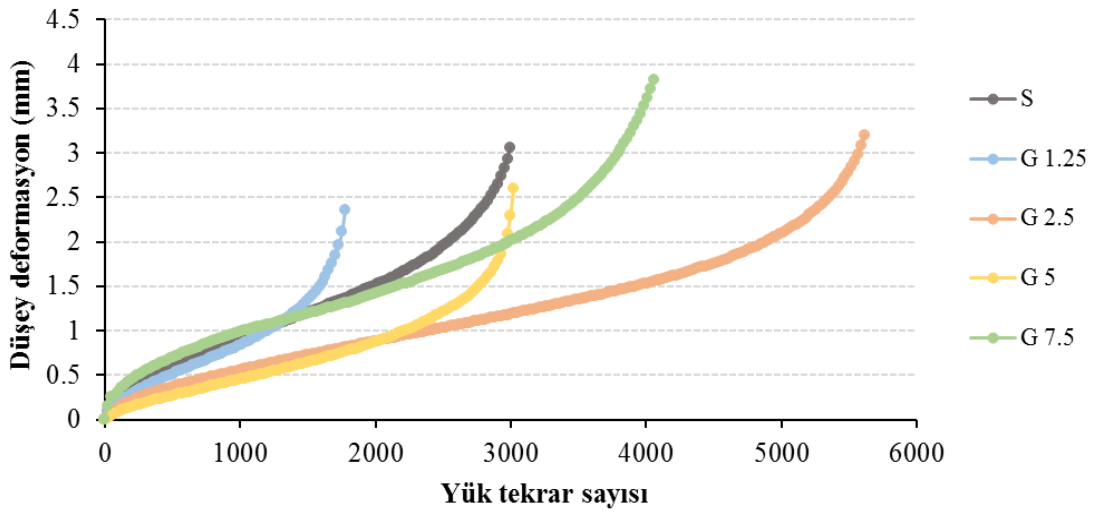
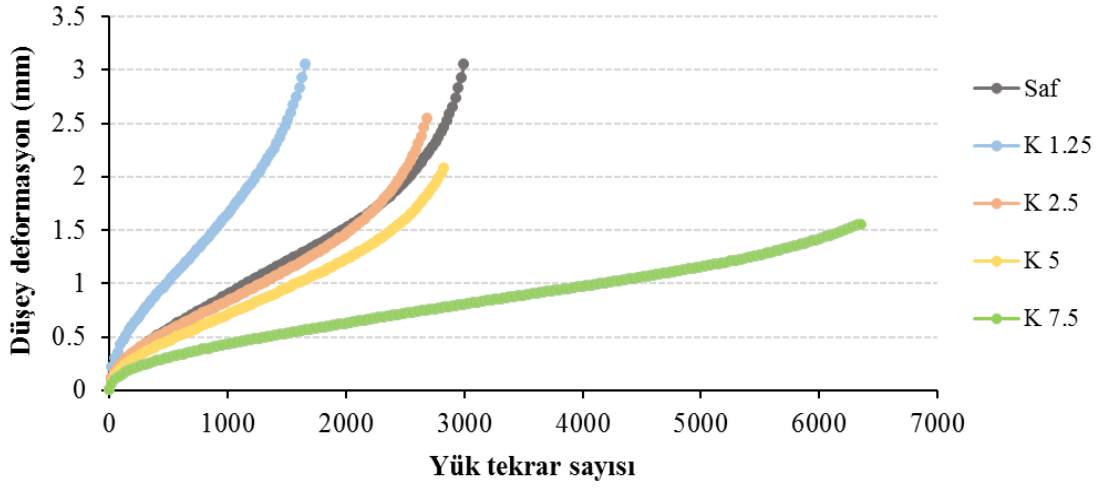
Saf, kül ve geopolimer katkılı karışım numunelerinin özellikleri Çizelge 5.39 ve Çizelge 5.40’da, 3500N ve 4000N gerilme seviyelerindeki yük tekrar sayısı-deformasyon ilişkisi sırasıyla Şekil 5.107 ve Şekil 5.108’de, bu numunelerin 3500N ve 4000N gerilme seviyelerindeki elde edilen sonuçlar Çizelge 5.41’de verilmiştir.

**Çizelge 5.39 : Numunelerin özellikleri (3500N).**

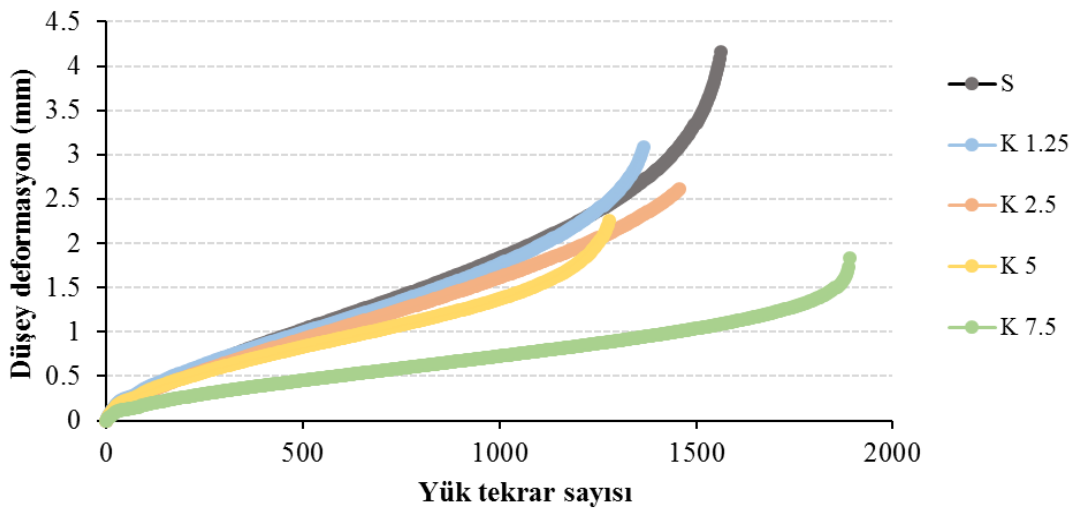
Karışım türü	Ortalama yükseklik	A (hava) (gr)	B (su) (gr)	C (doy) (gr)	Dp (gr/cm <sup>3</sup> )	Dt (gr/cm <sup>3</sup> )	Vh (%)
S	63.30	1242.58	726.53	1244.26	2.400	2.49	3.73
K 1.25	63.40	1245.00	728.18	1247.05	2.399	2.49	3.76
K 2.5	63.50	1247.18	727.15	1246.88	2.400	2.49	3.75
K 5	63.90	1248.20	728.26	1248.54	2.399	2.49	3.77
K 7.5	63.50	1248.34	728.51	1249.01	2.398	2.49	3.80
G 1.25	64.70	1249.45	727.43	1251.17	2.386	2.49	4.31
G 2.5	63.60	1248.97	728.24	1250.34	2.392	2.49	4.05
G 5	63.30	1248.18	728.57	1249.85	2.394	2.49	3.96
G 7.5	64.50	1248.55	728.22	1249.56	2.395	2.49	3.94

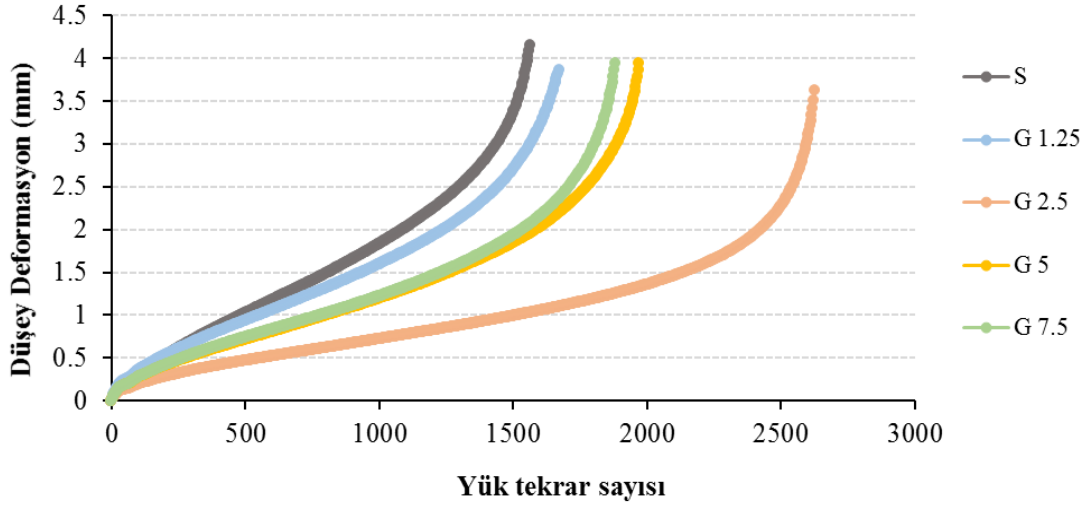
**Çizelge 5.40 : Numunelerin özellikleri (4000N).**

Karışım türü	Ortalama yükseklik	A (hava) (gr)	B (su) (gr)	C (doy) (gr)	Dp (gr/cm <sup>3</sup> )	Dt (gr/cm <sup>3</sup> )	Vh (%)
S	64.10	1245.38	727.26	1246.24	2.400	2.49	3.75
K 1.25	64.30	1246.15	727.05	1247.16	2.396	2.49	3.90
K 2.5	63.60	1245.27	727.59	1246.95	2.398	2.49	3.83
K 5	63.80	1249.02	727.27	1247.54	2.401	2.49	3.70
K 7.5	63.20	1248.66	727.56	1248.31	2.398	2.49	3.82
G 1.25	63.70	1251.25	727.8	1249.82	2.397	2.49	3.86
G 2.5	63.50	1249.09	728.06	1249.15	2.397	2.49	3.85
G 5	63.80	1249.96	728.54	1250.37	2.395	2.49	3.92
G 7.5	64.10	1250.25	727.23	1249.28	2.395	2.49	3.94



Şekil 5.107 : Numunelerin 3500N gerilme seviyesinde yük tekrar sayısı-deformasyon ilişkisi.





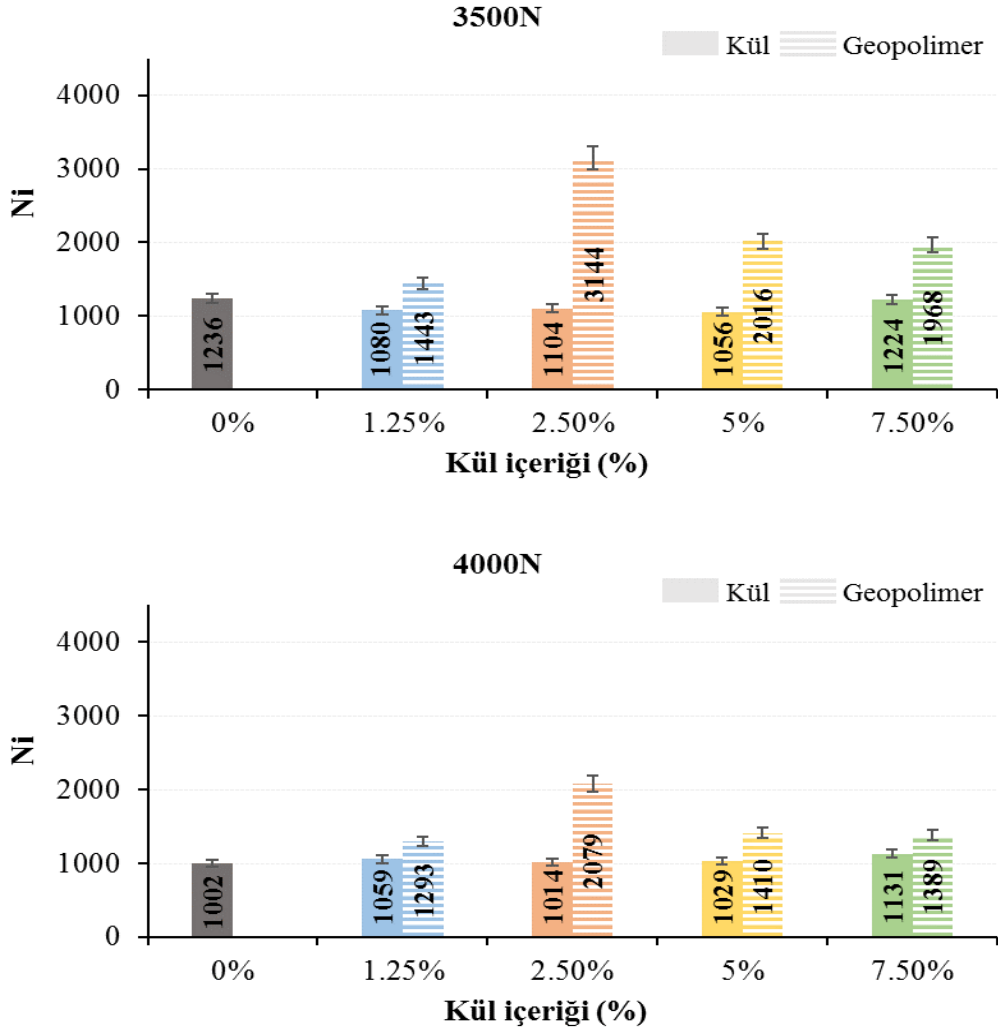
**Şekil 5.108** : Numunelerin 4000N gerilme seviyesinde yük tekrar sayısı-deformasyon ilişkisi.

Şekil 5.107 incelendiğinde, 3500N gerilme seviyesinde kül ve geopolimer katkıli karışımların kül içeriği arttıkça saf karışıma kıyasla yük tekrar sayılarının genel olarak arttığı görülmektedir. Bununla birlikte, kül içeriği arttıkça kül katkıli karışımların düşey deformasyonlarının düzenli olarak azaldığı, ancak geopolimer katkıli karışımların ise düşey deformasyonlarında düzensizliklerin meydana geldiği görülmektedir. Şekil 5.108’de ise, 4000N gerilme seviyesinde kül içeriği artışıyla kül ve geopolimer katkıli karışımların saf karışıma kıyasla yük tekrar sayılarında artış meydana geldiği, ayrıca düşey deformasyonlarının azaldığı görülmektedir.

**Çizelge 5.41** : 3500N ve 4000N gerilme seviyelerinde yorulma test sonuçları.

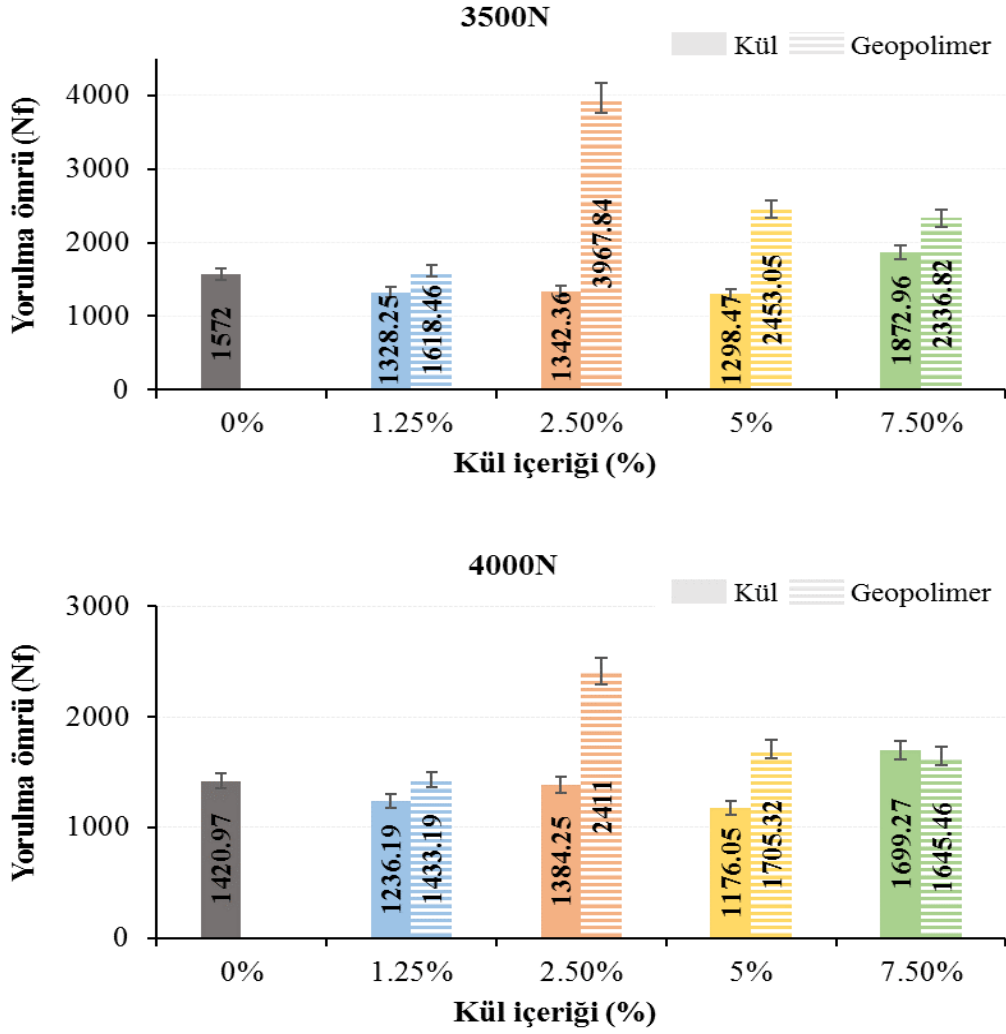
Karışım türü	Deneye tabi tutulan 3 numuneden elde edilen ortalama değerler								
	Ni	$\delta_i$	Nf	$\delta_f$	Np	Nmak	$\delta_{mak}$	rp	
S	3500N	1236	1.608	1572	1.917	336	3000	3.052	1087.38
	4000N	1002	1.837	1420.97	2.922	418.97	1563	4.158	386.15
K 1.25	3500N	1080	1.759	1328.25	2.141	248.25	1656	3.048	649.87
	4000N	1059	1.878	1236.19	2.331	177.19	1368	3.08	391.15
K 2.5	3500N	1104	0.89	1342.36	2.228	238.36	2688	2.544	178.15
	4000N	1014	1.639	1384.25	2.372	370.25	1458	2.608	505.12
K 5	3500N	1056	0.729	1298.47	0.85	242.47	2832	2.078	2003.88
	4000N	1029	1.415	1176.05	1.706	147.05	1278	2.251	505.33
K 7.5	3500N	1224	0.475	1872.96	0.56	648.96	6360	1.554	7634.82
	4000N	1131	0.801	1699.27	1.222	568.27	1890	1.832	1349.81
G 1.25	3500N	1443	1.139	1618.46	2.137	174.46	1776	2.361	174.81
	4000N	1293	2.108	1433.19	2.471	140.19	1671	3.87	386.2
G 2.5	3500N	3144	1.235	3967.84	1.516	823.84	5616	3.197	2931.81
	4000N	2079	1.436	2411	1.96	332	2625	3.621	633.59
G 5	3500N	2016	0.882	2453.05	1.17	437.05	3024	2.599	1517.53
	4000N	1410	1.703	1705.32	2.82	295.32	1971	3.943	264.39
G 7.5	3500N	1968	1.402	2336.82	1.6	368.82	4056	3.821	1862.73
	4000N	1389	1.734	1645.46	2.284	256.46	1881	3.941	466.29

3500N ve 4000N gerilme seviyelerinde üç briketten elde edilen çatlak oluştuğu yük tekrar sayılarının “Ni” ortalamasının kül içeriğine göre değişimi Şekil 5.109’da, yorulma ömrü “Nf” değerlerinin ortalamasının kül içeriğine göre değişimi Şekil 5.110’da, çatlak ilerlemesi için gerekli yük tekrar sayısı “Np” değerlerinin ortalamasının kül içeriğine göre değişimi Şekil 5.111’de, maksimum yük tekrar sayılarının “Nmak” ortalamasının kül içeriğine göre değişimi ise Şekil 5.112’de verilmiştir.



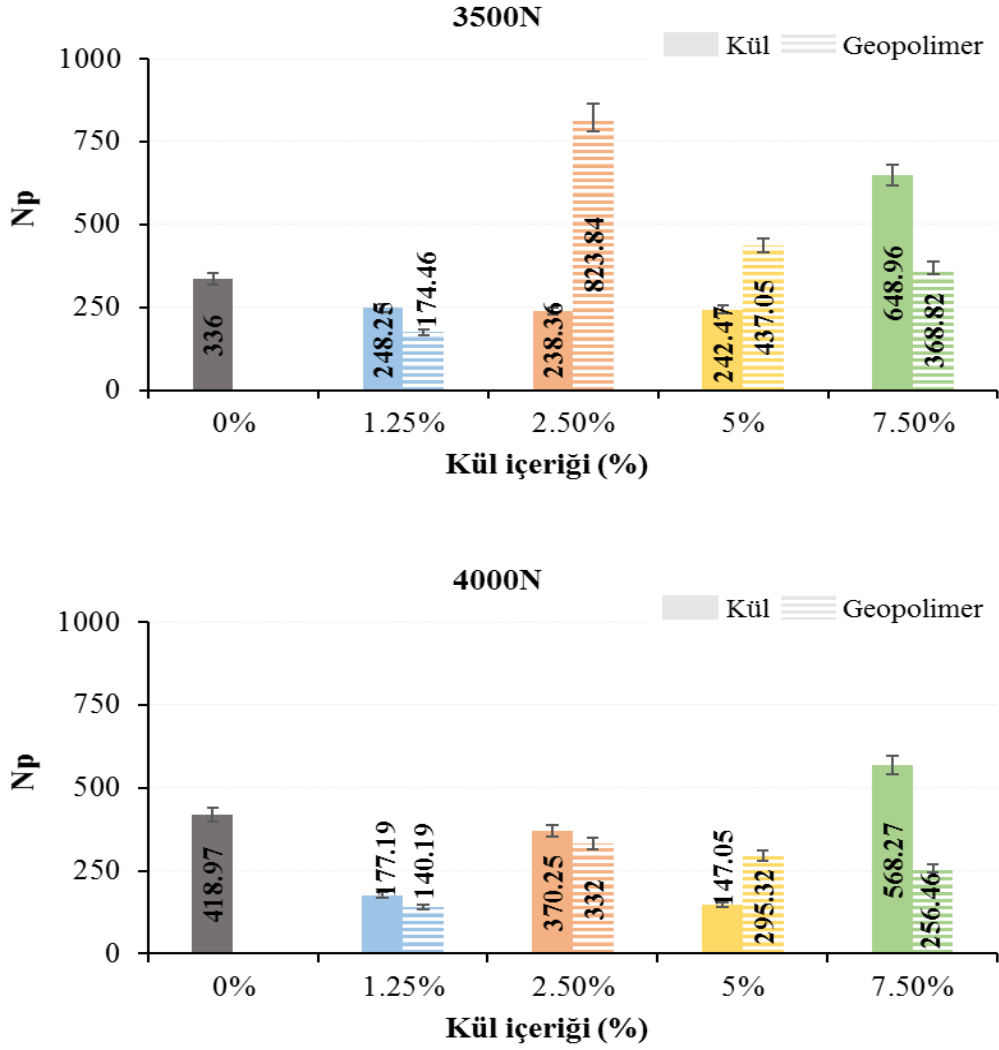
**Şekil 5.109** : Ni – kül içeriği ilişkisi.

Şekil 5.109 incelendiğinde, 3500N gerilme seviyesinde kül katkılı karışımların çatlak başlangıcı yük tekrar sayısı olan Ni değerlerinin saf karışıma göre azaldığı, ancak 4000N gerilme seviyesinde artış gösterdiği, 3500N ve 4000N gerilme seviyelerinde geopolimer katkılı karışımların Ni değerlerinin saf karışıma kıyasla arttığı görülmektedir. 3500N gerilme seviyesinde saf karışıma kıyasla kül katkılı karışımlarda meydana gelen değişimler %12.6, %10.7, %14.6 ve %1.0 oranlarında azalma, geopolimer katkılı karışımların ise %16.7, %154.4, %63.1 ve %59.2 oranlarında artma şeklindedir. 4000N gerilme seviyesinde kül katkılı karışımlardaki değişimler yine saf karışıma göre sırasıyla %5.7, %1.2, %2.7 ve %12.9 oranlarında artış, geopolimer karışımların ise sırasıyla %29.0, %107.5, %40.7 ve %38.6 oranlarında artış şeklindedir. Elde edilen bu sonuçlara göre, geopolimer katkılı karışımlarda saf ve kül katkılı karışımlara kıyasla çatlak oluşması için gereken yük tekrar sayısının daha fazla olması gerektiği (özellikle %2.5 geopolimer oranında) ifade edilebilir.



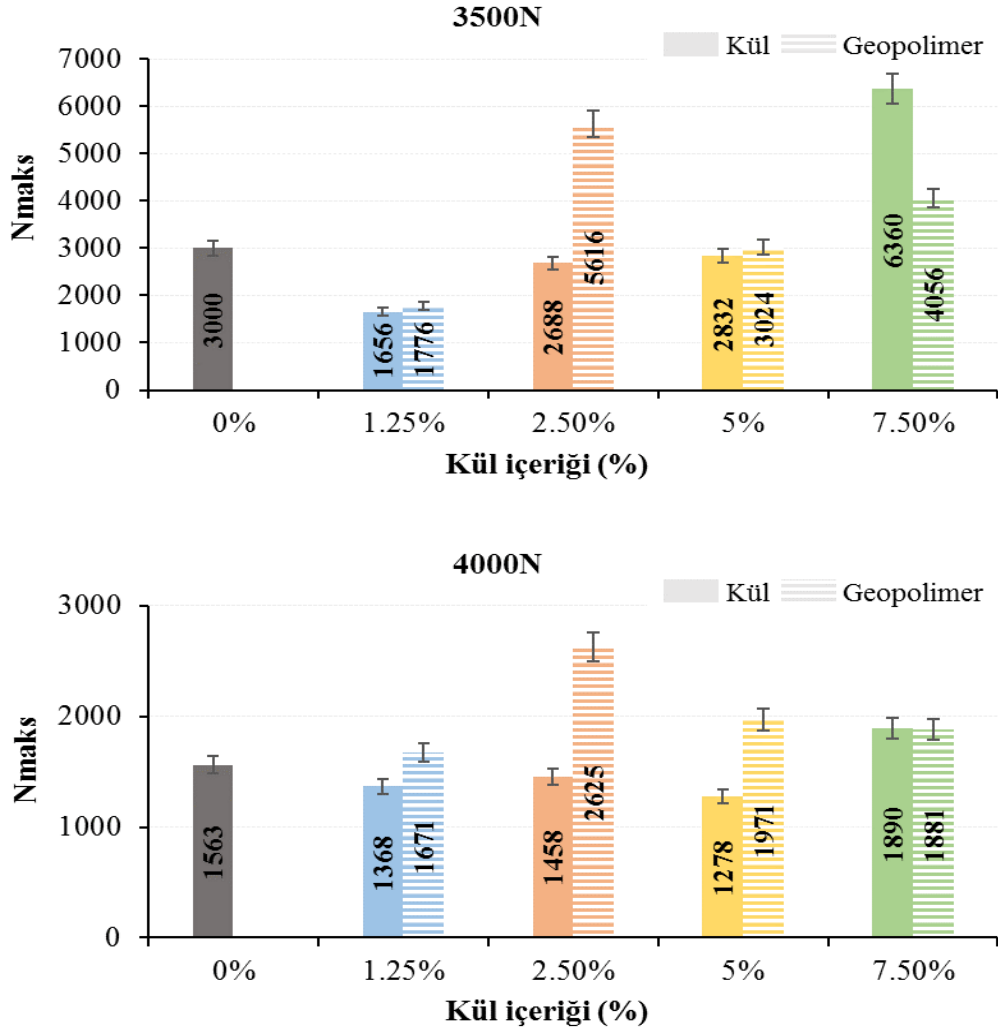
**Şekil 5.110 : Nf – kül içeriği ilişkisi.**

Şekil 5.110 incelendiğinde, gerilme seviyesi arttıkça tüm karışım numunelerinin yorulma ömrünün azaldığı görülmektedir. 3500N gerilme seviyesinde, kül katkıli karışımlarda meydana gelen değişimler saf karışıma kıyasla sırasıyla %15.5, %14.6, %17.4 oranlarında azalma ve %19.1 oranında artış, geopolimer katkıli karışımların ise %3.0, %152.4, %56.1 ve %48.7 oranlarında artma şeklindedir. 4000N gerilme seviyesinde ise kül katkıli karışımlarda sırasıyla %13.0, %2.6, %17.2 oranlarında azalma ve %19.6 oranında artış, geopolimer katkıli karışımların ise sırasıyla %1.1, %69.7, %20.0 ve %15.8 oranlarında artış şeklindedir. Her iki gerilme seviyesindeki bu sonuçlara göre, en yüksek yorulma ömrüne sahip karışımın %2.5 geopolimer katkıli karışımlardan elde edildiği görülmektedir. Elde edilen bu sonucun geopolimerin asfalt ile reaksiyona girerek bağlayıcı içerisinde iyi bir dağılım göstermesi ve geopolimer+asfaltın agrega ile birleştiğinde iyi bir yapışma yeteneği göstermesi sebebiyle meydana geldiği değerlendirilmektedir.



Şekil 5.111 : Np – kül içeriği ilişkisi.

Şekil 5.111'e bakıldığında, gerilme seviyesi arttıkça çatlak ilerleme yük tekrar sayısının değiştiği görülmektedir. Np değeri, Nf'nin Ni'den çıkarılmasıyla elde edilmektedir. 3500N gerilme seviyesinde çatlak ilerlemesi için gereken yük tekrar sayısının maksimum olduğu karışım %2.5 geopolimer katkıli karışımlardır. Benzer şekilde, 4000N gerilme seviyesinde de maksimum değer yine %2.5 geopolimer katkıli karışımlara aittir.



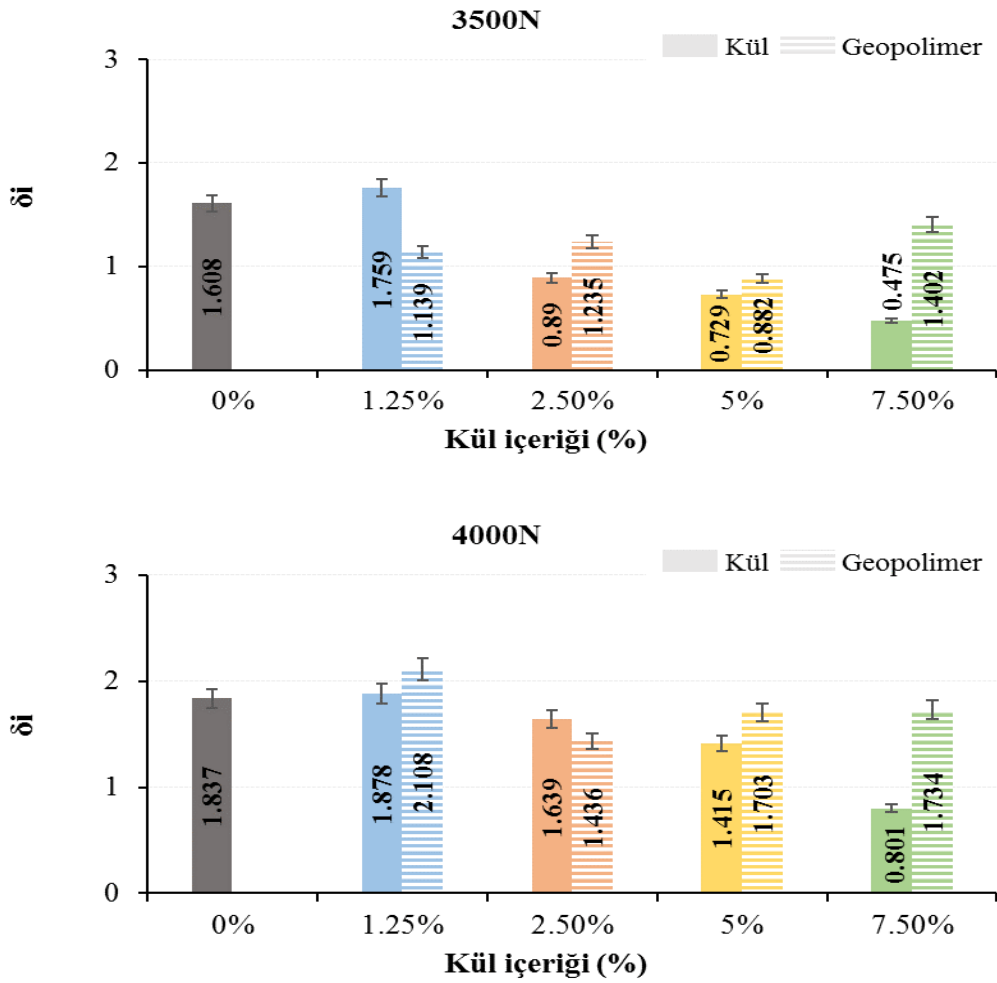
**Şekil 5.112 :** Nmaks – kül içeriği ilişkisi.

Şekil 5.112 incelendiğinde, 3500N gerilme seviyesinde kül katkıli karışımların maksimum yük tekrar sayısı yani Nmaks değerlerinde meydana gelen değişimler saf karışıma kıyasla sırayla %44.8, %10.4, %5.6 oranlarında azalma ve %112 oranında artış, geopolimer katkıli karışımlarda ise %40.8 oranında azalma, %87.2, %1.0 ve %35.2 oranlarında artış şeklindedir. 4000N gerilme seviyesinde kül katkıli karışımlarda %12.5, %6.7, %18.2 oranlarında azalma ve %20.9 oranında artış, geopolimer katkıli karışımlarda ise %6.9, %67.9, %26.1 ve %20.3 oranlarında artış şeklindedir. Elde edilen bu sonuçlara göre, geopolimer kullanımıyla  $N_f$  ile Nmaks değerlerinin birbirlerine oldukça yakın elde edildiği görülmektedir.

$N_i$ ,  $N_f$  ve Nmaks sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, geopolimer kullanımı ile karışımların yorulma ömürlerinin arttığı, 3500N ve 4000N gerilme seviyelerinin her ikisinde

de en yüksek yorulma ömrüne %2.5 geopolimer katkıli karışımların sahip olduğu tespit edilmiştir.

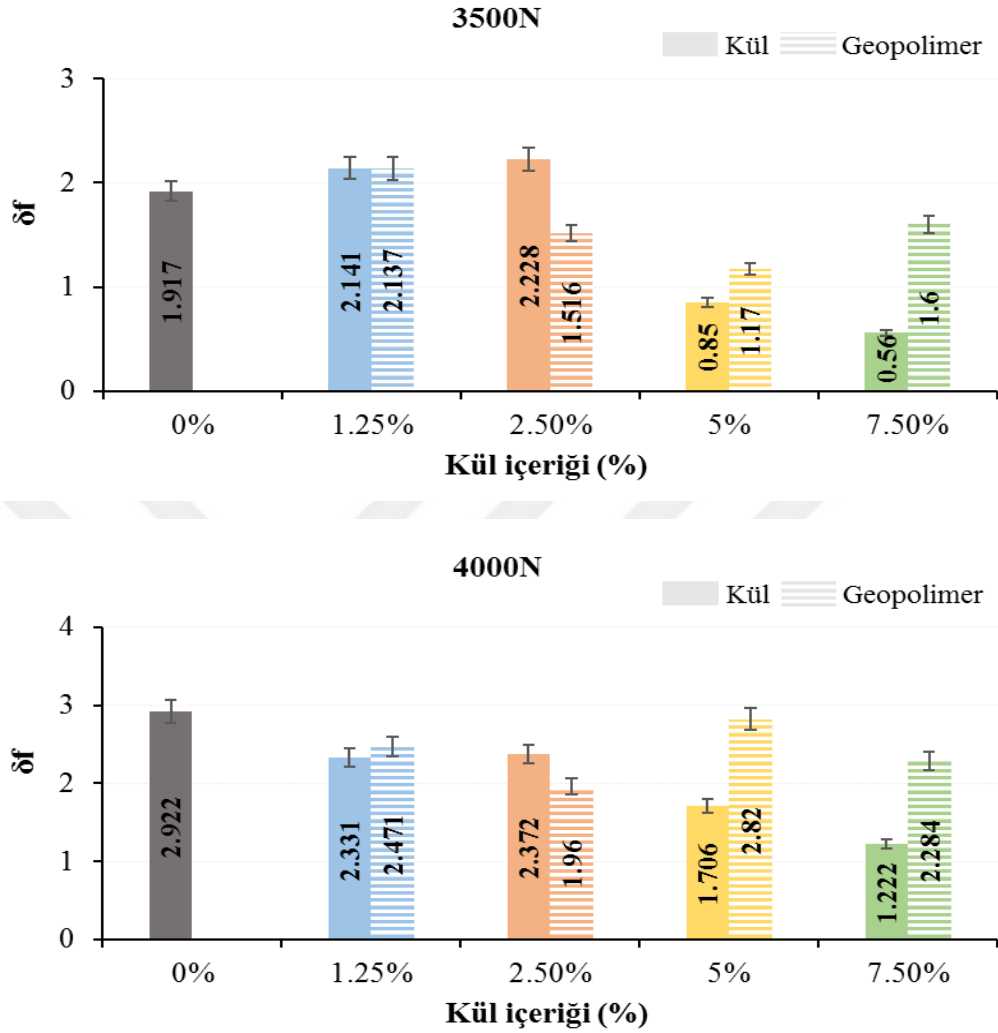
Çatlak oluşumundaki deformasyon değerleri “ $\delta_i$ ” ortalamasının kül içeriğine göre değişimi Şekil 5.113’de, yorulma ömrü “Nf” değerindeki deformasyon miktarlarının “ $\delta_f$ ” ortalamasının kül içeriğine göre değişimi Şekil 5.114’de, maksimum yük tekrar sayılarındaki deformasyon miktarlarının “ $\delta_{mak}$ ” ortalamasının kül içeriğine göre değişimi Şekil 5.115’de verilmiştir. Ayrıca, çatlak oluşuktan sonra yorulma ömrüne kadar her 1 mm deformasyon için gerekli yük tekrar sayını sembolize eden çatlak ilerleme oranı değerlerinin “rp” kül içeriğine göre değişimi ise Şekil 5.116’da verilmiştir.



Şekil 5.113 :  $\delta_i$  – kül içeriği ilişkisi.

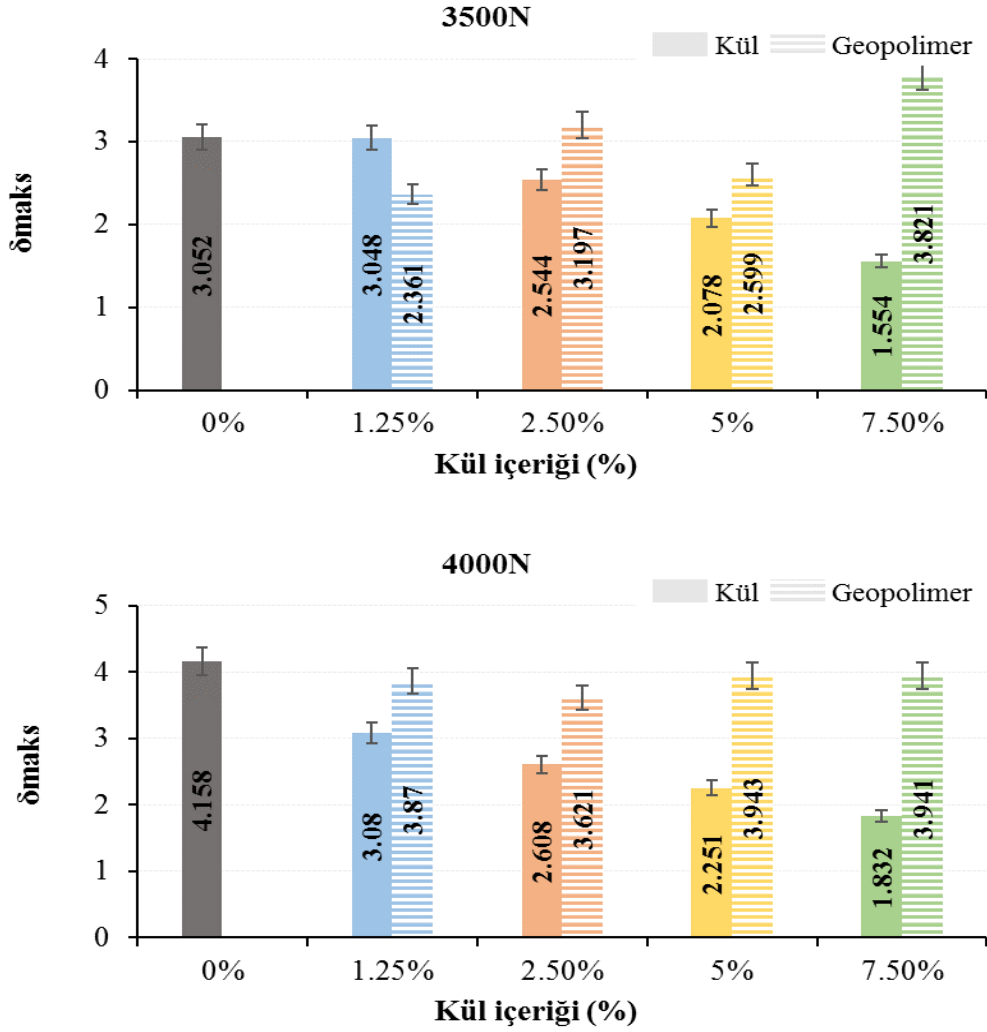
Şekil 5.113 incelendiğinde, gerilme seviyesi arttıkça tüm karışım numunelerinin  $\delta_i$  değerlerinin artış gösterdiği görülmektedir.  $\delta_i$ , çatlak başlangıcı yük tekrar sayısındaki deformasyon miktarını ifade etmektedir. Elde edilen sonuçlara göre, geopolimer katkıli

karışımların saf ve kül katkıli karışımlara kıyasla daha düşük  $\delta f$  değerlerine sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 5.114 :  $\delta f$  – kül içeriği ilişkisi.

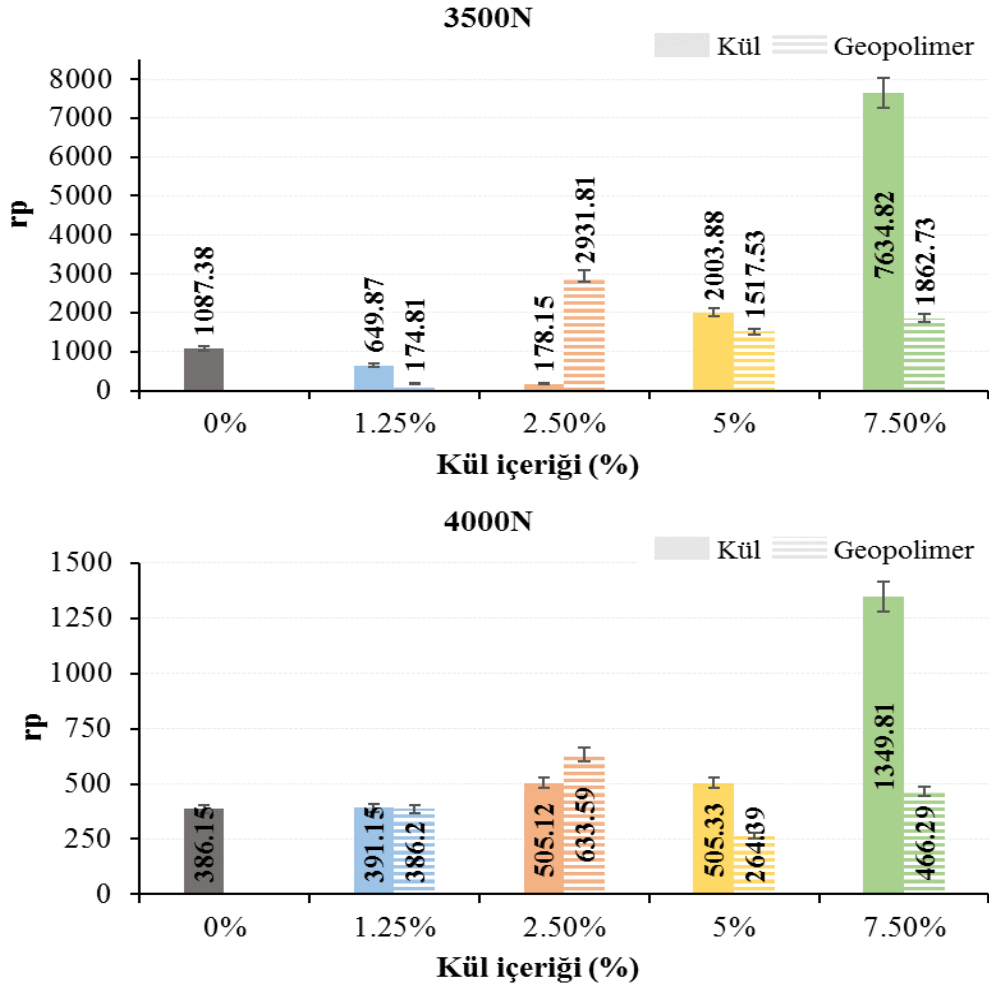
Şekil 5.114 incelendiğinde, gerilme seviyesi arttıkça kül ve geopolimer katkıli karışımların yorulma ömrüne denk gelen düşey deformasyonlarının arttığı görülmektedir. Ancak, gerilme artışıyla beraber karışımların yük tekrar sayılarının azaldığı ve buna rağmen geopolimer katkıli karışımların genel olarak saf karışıma kıyasla daha düşük miktarlarda düşey deformasyonlara sahip olduğu göz önüne alındığında, elde edilen sonuç olumlu olarak değerlendirilmektedir. Bu sonuç, geopolimerin asfalt karışım içerisinde homojen olarak karışmasından kaynaklanmakta ve böylece geopolimer katkıli HMA kaplamanın daha az deformasyon yapacağı şeklinde yorumlanmaktadır.



Şekil 5.115 : δmaks – kül içeriği ilişkisi.

Şekil 115'e bakıldığında, kül ve geopolimer katkısının kullanımı ile saf karışıma kıyasla karışımların maksimum yük tekrar sayısındaki düşey deformasyon miktarında yani δmaks değerlerinde değişimler meydana geldiği görülmektedir. 3500N gerilme seviyesinde en yüksek δmaks değeri saf karışıma göre en yüksek %2.5 ve %7.5 geopolimer oranında elde edilmiştir. 4000N gerilme seviyesinde ise en yüksek δmaks değeri saf karışımdan elde edilmiştir.

δi, δf ve δmaks değerlerinden elde edilen sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, kül ve geopolimer katkılı karışımlarda genel olarak safaya göre daha az deformasyonlar meydana geleceği, bu sebeple de bu karışımlarla elde edilen kaplamaların daha gevrek şekilde kırılma davranışı gösterebileceğini ifade etmek mümkündür.



Şekil 5.116 : rp – kül içeriği ilişkisi.

Şekil 5.116 değerlendirildiğinde, 3500N gerilme seviyesinde %2.5 kül içeriği oranından itibaren saf karışıma kıyasla çatlak ilerleme oranının (rp) arttığı, 4000N gerilme seviyesinde ise hemen hemen tüm kül içeriği oranlarında rp değerlerinin artış gösterdiği görülmektedir. Böylece, geopolimer katkısının HMA'ların yorulma çatlaklarından dolayı oluşan yeniden inşa ya da rehabilitasyon ihtiyaçlarını geciktirebileceği ifade edilebilir.

Tüm karışım numunelerinin performans sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, saf numunelere kıyasla kül katkılı numunelerin performanslarında ciddi iyileşmeler meydana geldiği ancak en yüksek performansa sahip numunelerin geopolimer katkılı karışımlar olduğu ve özellikle en yüksek değerlerin %2.5 geopolimer içerikli numunelerden elde edildiği görülmüştür. Kimyasal analiz sonuçları ile birlikte değerlendirildiğinde, bu sonuçların asfalt+kül+AA birleşimiyle oluşan geopolimer yapının karışım içerisinde iyi bir kimyasal etkileşim göstererek bağlayıcılık özelliğini arttırması ve dolayısıyla agrega ile güçlü bir adezyon sağlaması sebebiyle gerçekleştiği değerlendirilmektedir.

## 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, katı atık tesisindeki çöp atıklarının doğrudan yakılması sonucu elde edilen küllerin asfalt ve sıcak karışım modifikasyonunda geopolimer olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu amaçla, elde edilen geopolimer modifiyeli bağlayıcıların geleneksel, reolojik ve mikroyapısal karakteristikleri ile bu bağlayıcılar kullanılarak üretilen sıcak karışım asfaltların (HMA) performans özellikleri araştırılarak sonuçları ve önerilen hususlar aşağıda verilmiştir.

1. Yumuşama noktası test sonuçlarına göre, geopolimer katkısıyla bağlayıcıların sertliğinin arttığı ve yumuşama noktası değerinin %5 oranında %41.2 kadar artış gösterdiği görülmüştür.

2. Penetrasyon test sonuçlarına göre, yumuşak kıvamlı B 160/220 bağlayıcısı geopolimer ilavesiyle daha sert bir kıvama gelerek %2.5 ve %5 oranlarında B 40/60 penetrasyon sınıfı bağlayıcıya dönüşmüştür. Bu oranlarda bağlayıcıların penetrasyonundaki azalma sırasıyla %72 ve %75 kadar olmuştur. Yumuşama noktası ve penetrasyon sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, geopolimer katkısının özellikle %2.5 - %5 aralığında asfaltın yapısında sertleşme meydana getirdiği bu sebeple, geopolimer modifiyeli bağlayıcıların çok yüksek sıcaklığa sahip bölgelerde kalıcı deformasyonlara karşı kullanılabileceğini söylemek mümkündür.

3. Düktilite sonuçlarına göre, saf bağlayıcıya kıyasla geopolimer katkılı bağlayıcıların uzama yeteneğinin dolayısıyla kohezyonunun kısmen de olsa azaldığı, ancak belirlenen değerlerin KTŞ limitini sağladığı görülmüştür. Yumuşama noktası ve penetrasyon sonuçlarına göre modifiye asfaltlarda ciddi sertleşme görülmesine rağmen düktilite sonuçlarındaki değişimin az olması, geopolimer oluşumunun asfaltın elastik davranışı üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

4. Bağlayıcılar sıcaklık hassasiyetleri (PI) bakımından değerlendirildiğinde, asfalttaki geopolimer oluşumunun özellikle %2.5 geopolimer oranında bağlayıcıların sıcaklık hassasiyetini 13.0 kat kadar düşürdüğü ve dolayısıyla geopolimer modifiyeli bağlayıcıların sıcak iklimli bölgelerde kullanılabileceğini ifade etmek mümkündür.

5. RTFOT ve TFOT kütle kaybı sonuçlarına göre, geopolimerin bağlayıcıların oksidasyon ve yüksek sıcaklık direnci üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğu için geopolimer modifiyeli bağlayıcılarda uçucu madde kaybında azalma meydana gelmiştir.

6. Kısa ve uzun süreli yaşlanmaya maruz bırakılan bağlayıcıların fiziksel test sonuçları incelendiğinde, yaşlanmaya maruz kalmaları sebebiyle yumuşama noktası değerlerinde kısmi artış, penetrasyon ve PI değerlerinde ise kısmi azalma meydana gelmiştir. Burada oluşan kısmi değişimlerin geopolimerin bağlayıcıların yaşlanma dirençleri üzerindeki olumlu etkiden kaynaklandığı değerlendirilmektedir.
7. Depolama stabilitesi test sonuçlarına göre, geopolimer katkısıyla modifiye edilen bağlayıcıların yüksek sıcaklıklarda kararlı bir yapı göstererek homojen ve tek fazlı bir yapı meydana getirdiği görülmüştür. Bu sebeple, bağlayıcıdaki geopolimer yapılaşmasının tek fazlı bir yapı olarak plentteki depolama esnasında bir ayrışmaya uğramadan muhafaza edilebileceğini veya kullanılabilirliğini ifade etmek mümkündür.
8. RV test sonuçlarına göre, geopolimer katkılı bağlayıcıların 135 °C sıcaklıktaki viskozite değerleri %97.3 kadar büyük artış gösterirken 165 °C sıcaklıktaki değerlerinin ise %38.5 kadar daha az arttığı görülmüştür. Viskozitelerdeki bu artış, geopolimer katkılı bağlayıcıların plentteki karıştırma ve yoldaki sıkıştırma sıcaklıklarını da sırasıyla %5.0 ve %6.9 düzeyinde arttırmıştır. Geopolimerin bağlayıcıyı sertleştirmesi sebebiyle doğal olan bu sonuç, sık kullanılan SBS gibi çok daha yüksek uygulama sıcaklığı olan malzemeler göz önüne alındığında geopolimer katkılı bağlayıcılar için oluşabilecek enerji sarfiyatı göz ardı edilebilir.
9. DSR test sonuçlarına göre, genel olarak geopolimer katkısıyla bağlayıcıların tüm sıcaklıklarda  $G^*$  değerlerinde önemli oranda artış,  $\delta$  değerlerinde ise azalma meydana gelmiştir. Kalıcı deformasyon direnci bakımından yüksek  $G^*$  ve düşük  $\delta$  değerleri geopolimerin asfaltın yüksek sıcaklık direncini arttırdığını göstermiştir. Çünkü, yüksek  $G^*$  değeri kayma gerilmelerine karşı direncin daha yüksek olduğunu, düşük  $\delta$  değeri ise bağlayıcının daha elastik bir kıvamda olduğunu ifade etmektedir. Özellikle %2.5 geopolimer oranında bağlayıcının yüksek sıcaklık performansı saf bağlayıcıya kıyasla 12°C artarak bağlayıcının performans sınıfını PG 58-Y'den PG 70-Y'e çıkarmıştır. Bununla birlikte, bağlayıcıların orta sıcaklık performansı incelendiğinde, saf bağlayıcı 7 °C ve üstü sıcaklıklarda yorulma performansını sağlarken geopolimer katkılı bağlayıcıların 10 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda sağladığı görülmüştür.
10. BBR test sonuçlarına göre, genel olarak tüm sıcaklıklarda geopolimer katkısı bağlayıcıların sünme sertliğini arttırırken, sertlikteki değişim hızı üzerinde önemli bir etki göstermemiştir yani sıcaklık düşerken modifiye asfalt elastikiyetini koruyabilmiştir.

Geopolimer katkısı, özellikle %2.5 oranında bağlayıcının düşük sıcaklık seviyesini 6°C kadar düşürmüş ve bağlayıcı sınıfı PG X-28'den PG X-34'e düşmüştür. Bu sonuç, geopolimer katkısının bağlayıcıyı sertleştirmesine rağmen onun elastik bir katı gibi davranarak düşük sıcaklıklarda termal çatlamalara karşı gösterdiği direnci arttırdığını göstermektedir.

**11.** DSR ve BBR sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, saf ve geopolimer katkılı bağlayıcıların performans sınıflarının sırasıyla PG 58 -28, PG 64- 28, PG 70 – 34, PG 64– 34 ve PG 64 – 28 olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçlara göre, yüksek sıcaklık bakımından 12°C'lik artışla, düşük sıcaklık bakımından ise -6°C'lik düşüşle en kritik geopolimer oranının %2.5 olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuç, geopolimerin bağlayıcıların hem düşük hem de yüksek sıcaklıklarda oluşabilecek deformasyonlara karşı gösterdiği direnci arttırdığını ve geopolimer katkılı bağlayıcıların elastik bir katı gibi davrandığını göstermektedir.

**12.** LAS test sonuçlarına göre, geopolimer katkısı ile bağlayıcıların A parametresinin 1.10 kat kadar artış gösterdiği (%2.5 oranında) ve böylece geopolimer katkılı bağlayıcıların bütünlüğünün korumasının arttığı görülmüştür. Bununla birlikte, yine aynı oranda B parametresinin ise mutlak değerce daha düşük çıkması bu orandaki bağlayıcıların şekil değiştirmeye karşı daha az duyarlı olduğunu göstermiştir. İki farklı deformasyon seviyesindeki bağlayıcıların yorulma ömrü sonuçları değerlendirildiğinde ise geopolimer katkısıyla bağlayıcıların yorulma ömrünün arttığı ve geopolimerin kalın ve ince tabakalara ait yorulma ömrü üzerindeki etkisinin hemen hemen aynı seviyelerde olduğu görülmüştür.

**13.** MSCR test sonuçlarına göre, geopolimer katkı oranı artışı ile %R değerlerinde artışlar meydana geldiği, bu sebeple geopolimer kullanımı ile bağlayıcıların daha az geri kazanım deformasyonuna sahip olduğu ancak yüksek oranlardaki geopolimer kullanımının bağlayıcının performansı üzerinde daha az etkili olduğu görülmüştür. Bununla birlikte,  $J_{nr}$  değerlerine bakıldığında geopolimer katkısıyla  $J_{nr}$  değerlerinin artış gösterdiği ve böylece geopolimer katkılı bağlayıcıların diğer bağlayıcılara kıyasla kalıcı deformasyonlarının daha az olacağı görülmüştür. Geopolimer katkısıyla bağlayıcıların elde edilen PG Plus değerleri incelendiğinde ise %2.5 geopolimer oranında 58H-Y'den 70 H-Y'ye yükseldiği tespit edilmiştir. Ayrıca,  $J_{nr\_diff}$  ve  $\%R_{diff}$  sonuçlarına bakıldığında, artan sıcaklık ve geopolimer artışı ile yüksek  $J_{nr\_diff}$  ve düşük  $\%R_{diff}$  değerleri elde edilmiştir. Bu durumda, geopolimer katkısıyla bağlayıcıların kalıcı deformasyonlara karşı direncinin arttığı söylenebilir.

**14.** Karakterizasyon test sonuçlarına göre, asfalt modifikasyonunda geopolimer kullanımının asfalt+kül+AA arasında iyi bir kimyasal etkileşim meydana getirdiği, oluşan geopolimer

bağlayıcısının asfalt bağlayıcı içerisinde homojen olarak dağıldığı ve sonuçta elde edilen ürünün tek fazlı bir yapı olarak davrandığı tespit edilmiştir. Meydana gelen bu ürün içerisindeki bileşenlerin asfaltın yapısında sertleşme meydana getirmesine rağmen aynı zamanda elastik bir yapıya da büründürdüğü görülmüştür.

**15.** Marshall stabilite ve akma test sonuçlarına göre, geopolimer katkısı ile karışımların kalıcı deformasyonlara karşı direncinin arttığını, özellikle %2.5 oranında stabilitenin %21.3 kadar artış gösterdiği görülmüştür. Bu sonuç, geopolimer katkılı kaplamaların trafik yükleri altında kalıcı deformasyonlara karşı direncinin arttığını göstermektedir.

**16.** RMS test sonuçlarına göre, geopolimer katkısıyla karışımların su etkilerine karşı göstereceği direncinin arttığı, en yüksek direncin ise %11.9 artışla %2.5 geopolimer katkılı karışımlardan elde edildiği, dolayısıyla geopolimer katkısının kaplamaların nem direnci üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir.

**17.** ITS ve Modifiye lottman test sonuçlarına göre, geopolimer katkısıyla karışımların sudan kaynaklı bozulmalara karşı direncinin %9.6 kadar arttığı ve en yüksek direncin %2.5 geopolimer katkılı karışımlardan elde edildiği görülmüştür. Bu sonuç, geopolimer katkısının bağlayıcı ve agrega arasındaki bağı güçlendirerek karışımın kohezyonu ve adezyonu üzerinde olumlu bir etki oluşturduğunu ve suyun zararlı etkilerine karşı karışımın direncini arttırdığını göstermektedir.

**18.** ITSM test sonuçlarına göre, geopolimer katkısıyla karışımların rijit davranışında genel olarak artış meydana geldiği ancak en yüksek artışın %2.5 geopolimer oranında %46.4 kadar olduğu görülmüştür. Karışım rijitliğinin artması sebebiyle, trafik yükleri altında geopolimer katkılı kaplamaların kalıcı deformasyonlara karşı daha dirençli davranabileceği ifade edilebilir.

**19.** Statik sünme test sonuçlarına göre, 40°C ve 50°C sıcaklıklardaki geopolimer katkılı karışımların sabit yükler altında deformasyonlara karşı gösterdiği direncin %2.5 geopolimer oranında saf karışıma kıyasla sırasıyla %156.5 ve %180.7 kadar büyük oranda arttığı görülmüştür. Bu sonuç, yüksek sıcaklıklara haiz bölgelerde geopolimer katkılı karışımların tekerlek izi direncinin arttırmak için kullanılabileceğini göstermektedir.

**20.** Dinamik sünme test sonuçlarına göre, geopolimer katkılı sıcak karışımların hareketli yükler altında kalıcı deformasyonlara karşı direncinin saf karışıma kıyasla daha yüksek olduğu, bu direncin özellikle %2.5 oranında %271.6 kadar artış gösterdiği görülmüştür. Ayrıca, akma sayısı (FN) hesaplamalarına göre, tekerlek izi deformasyonuna karşı en yüksek direnç de yine %2.5 geopolimer katkılı karışımlardan elde edilmiştir.

**21.** Yorulma test sonuçlarına göre, geopolimer katkısıyla karışımların yorulma ömrünün arttığı ve tekrarlı yükler altında yorulma ömrü en uzun karışımın %2.5 geopolimer katkılı karışımlar olduğu görülmüştür. Ayrıca, geopolimer katkısının HMA'ların yorulma çatlaklarından dolayı oluşan yeniden inşa ya da rehabilitasyon ihtiyaçlarını geciktirebileceği belirlenmiştir.

**22.** Sonraki çalışmalar için geopolimer üretiminin direkt sıcak karışım içerisinde gerçekleştirilerek HMA'nın performans özelliklerine etkisi araştırılması, deneme yolları yapılarak geopolimer oluşumunun sahadaki etkisinin doğrudan tespit edilmesi ve yol mühendisliğinde kullanım için bu atıl durumdaki küllerin değerli bir ürün olarak depolanıp hizmete sunulması önerilmektedir.

Sonuç olarak, çöp atıklarından elde edilen küllerin bir katkı malzemesi olarak asfalt bağlayıcı içerisinde geopolimer üretiminde kullanılmasının hem bağlayıcıların hem de HMA'ların performansının geliştirilmesinde oldukça önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Bununla birlikte, çöp atıklarının bu şekilde kullanımı ile bu atıkların çevreye vermiş olduğu zararın büyük ölçüde azaltılabileceği, ayrıca üretilen geopolimer malzemenin karayolu mühendisliğinde yeni bir malzeme olarak literatüre girerek bundan sonra yapılacak çalışmalar için öncü niteliğinde olacağı değerlendirilmektedir.

## KAYNAKLAR

- [1] **Tunç, A.** (2004). *Esnek Kaplama Malzemeleri*. Ankara.
- [2] **Tunç, A.** (2007). *Yol Malzemeleri ve Uygulamaları*. Ankara.
- [3] **URL-1** < <https://www.sanalsantiye.com/ustyapi-projelendirmesinde-esneklik-odulunun-yeri/>>, date retrieved 25.05.2023.
- [4] **Lavin, P.** (2003). *Asphalt pavement*. London and New York.
- [5] **Geçkil, T., İnce, C. B. ve Özpınar, E. T.** (2021). Nanosilikanin bitümün kivami, viskozitesi ve mikroyapısına etkileri. *Konya Journal of Engineering Sciences*, 9(4), 845–857.
- [6] **Geçkil, T. ve İnce, C. B.** (2021). Atık LDPE'nin asfaltın fiziksel ve işlenebilirlik özelliklerine etkisi. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 11(4), 1103–1114.
- [7] **Gültekin, M., Nayır, N., Ziya, U., Çalışkan, K.K., Öztürk, A., Tutan, S.N. ve Komut, M.** (2021). *Bitümlü karışımlar laboratuvar el kitabı*. Karayolları Genel Müdürlüğü.
- [8] **URL-2** < [https://webdosya.csb.gov.tr/db/sanayihavarehberi/icerikler/02\\_asfalt-uret-m-20200103075113.pdf](https://webdosya.csb.gov.tr/db/sanayihavarehberi/icerikler/02_asfalt-uret-m-20200103075113.pdf)>, date retrieved 10.05.2023.
- [9] **İnce, C. B. ve Geçkil, T.** (2022). Effects of recycled PET and TEOA on performance characteristics of bitumen. *Gravevinar*, 74(2), 105–114.
- [10] **Geçkil, T., İnce, C. B. ve Tanyıldızı, M. M.** (2022). Physical, rheological and microstructural properties of waste LDPE and TEOA modified bitumens. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 45(6), 477–487.
- [11] **Geçkil, T. ve İnce, C. B.** (2021). Pirina'nın bitümün fiziksel ve mikroyapısal özellikleri üzerindeki etkisi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 23(69), 1015–1025.
- [12] **URL-3** < <https://saydasplastik.com.tr/atiklarin-dogaya-verdigi-zararlar-nelerdir/>>, date retrieved 10.10.2023.
- [13] **Massarra, C., Rahat, M. H. H., Wang, G. ve Sadek, H.** (2022). Evaluating the cost of collection, processing, and application of face masks in hot-mix asphalt (HMA) pavements. *Heliyon*, 8(11), e11239.
- [14] **Çeloğlu, M. M.** (2020). *Tarımsal biyokütlelerden elde edilen ürünlerin bitümlü sıcak karışımlarda kullanılabilirliğinin araştırılması* (Doktora Tezi). Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [15] **Ahmedzade, P., Fainleib, A., Günay, T. ve Grygoryeva, O.** (2014). Modification of bitumen by electron beam irradiated recycled low density polyethylene. *Construction and Building Materials*, 69, 1–9.
- [16] **Geçkil, T., Önal, Y. ve İnce, C. B.** (2020). Atık polietilen tereftalat (PET) ile modifiye edilmiş saf bitümün fiziksel, morfolojik ve ısıl özellikleri. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 32(1), 157–166.
- [17] **Günay, T., Ahmedzade, P., Hassanpour-Kasanagh, S., Fainleib, A. M. ve Starostenko, O.** (2022). Effect of maleic anhydride grafted and gamma-

irradiated waste polypropylene on rheological properties of asphalt binder. *International Journal of Pavement Engineering*, 23(13), 4819–4830.

- [18] **Hamid, A., Alfaidi, H., Baaj, H. ve El-Hakim, M.** (2020). Evaluating fly ash-based geopolymers as a modifier for asphalt binders. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020, 1–11.
- [19] **Rosyidi, S. A. P., Rahmad, S., Yusoff, N. I. M., Shahrir, A. H., Ibrahim, A. N. H., Ismail, N. F. N. ve Badri, K. H.** (2020). Investigation of the chemical, strength, adhesion and morphological properties of fly ash based geopolymer-modified bitumen. *Construction and Building Materials*, 255, 119364.
- [20] **Gürer, C.** (2005). *Atık mermer parçalarının bitümlü yol kaplamalarında değerlendirilmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon.
- [21] **Çetin, S.** (2007). *Afyonkarahisar bölgesi volkanik kayaların sıcak karışım asfalt kaplamalarında agrega olarak kullanılabilirliğinin araştırılması* (Yüksek Lisans Tezi), Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon.
- [22] **Hassanpour Kasanagh, S.** (2020). *Geri dönüştürülmüş polimer ve atık lastik tozu esaslı termoplastik dinamik vulkanizat (TDV) Katkısının bitüm ve bitümlü sıcak karışımlar üzerinde etkisinin incelenmesi* (Doktora Tezi). Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- [23] **Erkuş, Y.** (2021). *Üç farklı katkının birlikte kullanımının bitümün ve bitümlü sıcak karışımların özelliklerine olan etkisinin araştırılması* (Doktora Tezi). Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [24] **Forbes, R. J.** (1936). *Bitumen and petroleum in antiquity*, Brill Archive.
- [25] **Read, J., Whiteoak, D. ve Hunter, R. N.** (2003). *The shell bitumen handbook*, New York.
- [26] **Corbett, L. W. ve Swarbick, R. E.** (1958). Clues to asphalt composition. *Proc. Am. Asph. Paving Technol*, 27, 107–115.
- [27] **Schweyer, H. E., Chelton, H. ve H.H. Brenner.** (1955). A chromatographic study of asphalt. *roc. Assoc. Asph. Paving Technol*, 24, 3–8.
- [28] **Hofko, B., Eberhardsteiner, L., Füssl, J., Grothe, H., Handle, F., Hospodka, M. ve Scarpas, A.** (2016). Impact of maltene and asphaltene fraction on mechanical behavior and microstructure of bitumen. *Materials and Structures*, 49, 829–841.
- [29] **González, M. N.** (2010). *Rheology and engineering parameters of bitumen modified with polyolefins*. Elastomers and Reactive Polymers, Univerlagtuberlin.
- [30] **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.
- [31] **Soleimani, A.** (2009). *Use of dynamic phase angle and complex modulus for the low temperature performance grading of asphalt cements* (Master Thesis). Queen's University, Kingston.
- [32] **McNally, T.** (2011). *Introduction to polymer modified bitumen (PmB)*, Polymer Modified Bitumen, Elsevier.

- [33] **Nicholls, J.C.** (1998). *Asphalt surfacings*, CRC Press.
- [34] **Ilıcalı, M.** (2001). *Asfalt ve uygulamaları*, İstanbul.
- [35] **Morgan, P. ve Mulder, A.** (1995). *The shell bitumen industrial handbook*, Thomas Telford.
- [36] **Mezger, T.** (2020). *The rheology handbook: for users of rotational and oscillatory rheometers*, Germany.
- [37] **Günay, T.** (2016). *Nano malzemelerin bitümlü bağlayıcılarda katkı malzemesi olarak kullanılabilirliğinin incelenmesi* (Doktora Tezi). Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- [38] **Barnes, H. A., Hutton, J. F. ve Walters, K.** (1989). *An introduction to rheology*, Elsevier.
- [39] **Francken, L.** (1998). *Bituminous binders and mixes*, CRC Press.
- [40] **Partl, M. N., Bahia, H. U., Canestrari, F., De la Roche, C., Di Benedetto, H., Piber, H. ve Sybilski, D.** (2012). *Advances in interlaboratory testing and evaluation of bituminous materials*. Springer Science & Business Media.
- [41] **Geçkil, T.** (2008). *Siyah karbonun bitümlü sıcak karışımların özelliklerine etkisinin araştırılması* (Doktora Tezi). Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [42] **Ince, C. B.** (2019). *Geri kazanılmış polietilen tereftalat (PET) 'in bitüm ve bitümlü sıcak karışımların özelliklerine etkisinin araştırılması* (Yüksek Lisans Tezi). İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya.
- [43] **Küçük, E.** (2019). *Farklı agrega ve bitümle hazırlanan sıcak karışım asfalt numunelerinin kuru ve ıslak kayma dirençlerinin karşılaştırılması* (Yüksek Lisans Tezi). Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [44] **Ahmedzade, P., Yılmaz, M. ve Yılmaz, M.** (2007). Bitümlü bağlayıcıların yaşlandırılmasında kullanılan deney yöntemlerinin karşılaştırılması. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi*, 23(1), 112–126.
- [45] **Geçkil, T., Issi, S. ve Ince, C. B.** (2022). Evaluation of prina for use in asphalt modification. *Case Studies in Construction Materials*, 17, e01623.
- [46] **AASHTO T315** (2012). *Standard method of test for determining the rheological properties of asphalt binder using a dynamic shear rheometer (DSR)*, American Association of State Highway and Transportation Officials.
- [47] **McGennis, R. B., Shuler, S. ve Bahia, H. U.** (1994). Background Of Superpave Asphalt Binder Test Methods. Final Report.
- [48] **Behnood, A.** (2016). *Rheological properties of asphalt binders: an analysis of the multiple stress creep recovery test* (PhD Thesis), Purdue University, Indiana.
- [49] **Kennedy, T.W., Huber, G.A., Harrigan, E.T., Cominsky, R. J., Hughes, C. S., Von Quintus, H. ve Moulthrop, J.S.** (1994). *Superior performing asphalt pavements (Superpave): The product of the SHRP asphalt research program*. Washington D.C.
- [50] **Zaniewski, J. P. ve Pumphrey, M. E.** (2004). Evaluation of performance graded asphalt binder equipment and testing protocol. *Asphalt technology program*, 107, 376–384.

- [51] **West, R.C., Watson, D.E., Turner, P.A. ve Casola, J. R.** (2010). *Mixing and compaction temperatures of asphalt binders in hot-mix asphalt*, NCHRP.
- [52] **AASHTO TP 70** (2013). *Standard method of test for multiple stress creep recovery (MSCR) test of asphalt binder using a dynamic shear rheometer (DSR)*. American Association of State Highway and Transportation Officials.
- [53] **FHWA** (2011). *The multiple stress creep recovery (MSCR) procedure*, Washington D.C.
- [54] **AASHTO M332-19** (2019). *Performance-graded asphalt binder using multiple stress creep recovery (MSCR) test*, American Association of State Highway and Transportation Officials.
- [55] **Król, J., Radziszewski, P. ve Kowalski, K. J.** (2015). Influence of microstructural behavior on multiple stress creep recovery (MSCR) in modified bitumen. *Procedia Engineering*, 111, 478–484.
- [56] **Domingos, M. D. I. ve Faxina, A. L.** (2015). Rheological behaviour of bitumens modified with PE and PPA at different MSCR creep–recovery times. *International Journal of Pavement Engineering*, 16(9), 771–783.
- [57] **Kasanagh, S. H., Ahmedzade, P. ve Günay, T.** (2021). Uzun süreli yaşlandırılmış etilen vinil asetat (EVA) polimer katkılı asfalt bağlayıcının yorulma ömrünün incelenmesi. *Uluslararası Doğu Anadolu Fen Mühendislik ve Tasarım Dergisi*, 3(1), 55–71.
- [58] **Hassanpour-Kasanagh, S., Ahmedzade, P., Fainleib, A. M. ve Behnood, A.** (2020). Rheological properties of asphalt binders modified with recycled materials: A comparison with Styrene-Butadiene-Styrene (SBS). *Construction and Building Materials*, 230, 117047.
- [59] **AASHTO TP101** (2014). *Estimating damage tolerance of asphalt binders using the linear amplitude sweep*, American Association of State Highway and Transportation Officials.
- [60] **Önal, M.A. ve Kahramangil, M.** (1993). *Bitümlü karışımlar laboratuvar el kitabı*. Ankara.
- [61] **Çolak, K.C.** (2006). *Asfalt kaplamalarda sinerjetik fayda konusunun anlaşılmasında marshall oranı yaklaşımının kullanılması* (Yüksek Lisans Tezi), Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- [62] **Balta, İ.** (2004). *Bitümlü sıcak karışımların sudan kaynaklanan bozulmalara karşı duyarlılığı* (Yüksek Lisans Tezi). Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- [63] **İstanbul Büyükşehir Belediyesi.** (2002). *Asfalt El Kitabı*. İstanbul.
- [64] **Akıllı, A.** (2012). *Bazalt agregasının mekanik özelliklerinin yol üstyapısında kullanımı açısından incelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- [65] **Karayolları Genel Müdürlüğü.** (2013). *Karayolu Teknik Şartnamesi*. İstanbul,
- [66] **URL-4** < <https://cdn3.beun.edu.tr/insaat/297a396322b1bf9bc53575e6ee2cf870/2-yapi-malzeme-deneyleri-2-agrega.pdf>>, erişim tarihi 01.05.2023.

- [67] **Zakaria, N. M.** (2020). *Characterisation of bitumen and asphalt mixture with recycled waste plastic (RWP) modified binder* (PhD Thesis). University of Nottingham, UK.
- [68] **İstanbul Büyükşehir Belediyesi.** (2004), *Shell Bitüm El Kitabı*. İstanbul.
- [69] **McGennis, R.B., Anderson, R.M., Kennedy, T.W. ve Solaimanian, M.** (1995). Background of Superpave asphalt mixture design and analysis: FHWA-SA-95-003, FHWA.
- [70] **Geçkil, T., Önal, Y. ve Ince, C. B.** (2021). Moisture Resistance of Bituminous Hot Mixtures Modified with Waste PET. *Journal of Polytechnic*, 74(2), 105–114.
- [71] **Arabani, M. ve Tahami, S. A.** (2017). Assessment of mechanical properties of rice husk ash modified asphalt mixture. *Construction and Building Materials*, 149, 350–358.
- [72] **Geckil, T. ve Ahmedzade, P.** (2020). Effects of carbon fibre on performance properties of asphalt mixtures. *Baltic Journal of Road & Bridge Engineering*, 15(2), 49–65.
- [73] **Ele.** (1994). Universal Materials Testing Apparatus for Asphalt and Unbound Specimens, Hertfordshire, UK.
- [74] **Witczak, M.W.** (2007). Simple performance tests for permanent deformation of hot mix asphalt.
- [75] **Goh, S. W. ve You, Z.** (2009). A simple stepwise method to determine and evaluate the initiation of tertiary flow for asphalt mixtures under dynamic creep test. *Construction and Building Materials*, 23(11), 3398–3405.
- [76] **Little, D.N., Button, J.W. ve Youssef, H.** (1993). *Development of criteria to evaluate uniaxial creep data and asphalt concrete permanent deformation potential*, Transportation Research Board.
- [77] **Witczak, M.W.** (2002). *Simple performance test for superpave mix design*, Transportation Research Board.
- [78] **Bausano, J. ve Williams, C.** (2007). *A New Approach to Calculating Flow Number*, Unpublished Paper.
- [79] **Aragão, F. T. S., Lee, J., Kim, Y.-R. ve Karki, P.** (2010). Material-specific effects of hydrated lime on the properties and performance behavior of asphalt mixtures and asphaltic pavements. *Construction and building materials*, 24(4), 538–544.
- [80] **Subagio, B.S., Siswosoebrotho, B.I. ve Karsaman, R.H.** (2003). Development of laboratory performance of Indonesia rock asphalt (ASBUTON) in hot rolled asphalt mix, *Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 4, 436-449.
- [81] **Küçük, İ.** (2019). *Farklı kütlelerden karbondioksit kullanılarak karbon moleküler elek özelliğinde aktif karbon üretimi ve uygulamalar* (Doktora Tezi). İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya.
- [82] **Kır, Ş.** (2021). *Karbon içerikli malzemelerden grafen kuantum noktacık sentezi ve karakterizasyonu* (Doktora Tezi). Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.

- [83] **Airey, G.D.** (1997). *Rheological characteristics of polymer modified and aged bitumens* (PhD Thesis). University of Nottingham, UK.
- [84] **Bowers, B.F.** (2013). *Investigation of asphalt pavement mixture blending utilizing analytical chemistry techniques* (PhD Thesis). University of Tennessee, Knoxville.
- [85] **Burns, J. J.** (2014). *Use of Fourier-transform infrared spectroscopy to determine immunoglobulin status in camelid and equine species* (Master Thesis). University of Prince Edward Island, Canada.
- [86] **Tunç, A.** (2004). *Esnek kaplama malzemeleri elkitabı*. İstanbul.
- [87] **Orhan, F.** (2012). *Bitümlü karışımlar laboratuvarı çalışmaları*. Ankara.
- [88] **Airey, G. D.** (2006). *Performance of Polymer Modified Bitumens*. UK Market.
- [89] **Yang, L., Han, F., Muhammad, Y., Liu, Y., Zhao, Z., Kong, H. ve Zhang, H.** (2023). Study on the resourceful reuse in SBS-modified asphalt of waste bagasse fibers based on green modification with tannic acid and FeOOH. *Environmental Science and Pollution Research*, 1–18.
- [90] **Zhuang, Y., Yue, J., Men, B., Tang, G. ve Wang, R.** (2023). Experimental study on mechanism, aging and fatigue performance of warm mixing speed melting SBS modified asphalt binders. *Coatings*, 13(2), 311.
- [91] **Zeng, G., Shen, A., Lyu, Z., Kang, C., Cui, H., Ren, G. ve Yue, G.** (2023). Research on anti-aging properties of POE/SBS compound-modified asphalt in high-altitude regions. *Construction and Building Materials*, 376, 131060.
- [92] **Xiong, W., Liu, Y., Muhammad, Y., Han, F., Yang, L., Jin, X. ve Li, J.** (2023). MXene by regulating etching conditions enhanced UV resistance of SBS modified asphalt: Evaluating asphalt photo-oxidation and SBS degradation. *Construction and Building Materials*, 377, 131006.
- [93] **He, W., Zhao, Z., Yuan, J. ve Xiao, F.** (2023). Recent development of ethylene–vinyl acetate modified asphalt. *Construction and Building Materials*, 363, 129800.
- [94] **Dalhat, M. A. ve Al-Adham, K.** (2023). Review on laboratory preparation processes of polymer modified asphalt binder. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 10(2), 159-184.
- [95] **Hong, Z., Yan, K., Ge, D., Wang, M., Li, G. ve Li, H.** (2022). Effect of styrene-butadiene-styrene (SBS) on laboratory properties of low-density polyethylene (LDPE)/ethylene-vinyl acetate (EVA) compound modified asphalt. *Journal of Cleaner Production*, 338, 130677.
- [96] **Yan, K., Li, G., Li, Q., Diab, A., You, L. ve Wang, M.** (2022). Compound modification of asphalt mixture using ethylene-vinyl acetate copolymer and amorphous poly alpha olefin. *Construction and Building Materials*, 341, 127705.
- [97] **Abdy, C., Zhang, Y., Wang, J., Yang, Y., Artamendi, I. ve Allen, B.** (2022). Pyrolysis of polyolefin plastic waste and potential applications in asphalt road construction: A technical review. *Resources, conservation and recycling*, 180, 106213.
- [98] **Abduljabbar, N., Al-Busaltan, S., Dulaimi, A., Al-Yasari, R., Sadique, M. ve Al Nageim, H.** (2022). The effect of waste low-density polyethylene on the

mechanical properties of thin asphalt overlay. *Construction and Building Materials*, 315, 125722.

- [99] **Rincón-Esteva, J. A., González-Salcedo, E. V., Rondón-Quintana, H. A., Reyes-Lizcano, F. A. ve Bastidas-Martínez, J. G.** (2022). Mechanical Behavior of Low-Density Polyethylene Waste Modified Hot Mix Asphalt. *Sustainability*, 14(7), 4229.
- [100] **Ghani, U., Zamin, B., Tariq Bashir, M., Ahmad, M., Sabri, M. M. S. ve Keawsawasvong, S.** (2022). Comprehensive study on the performance of waste HDPE and LDPE modified asphalt binders for construction of asphalt pavements application. *Polymers*, 14(17), 3673.
- [101] **Ibrahim, A. H. A.** (2019). Laboratory investigation of aged HDPE-modified asphalt mixes. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 12, 364–369.
- [102] **Moussa, G. S., Abdel-Raheem, A. ve Abdel-Wahed, T.** (2021). Effect of nanoclay particles on the performance of high-density polyethylene-modified asphalt concrete mixture. *Polymers*, 13(3), 434.
- [103] **Abed, A. H. ve Bahia, H. U.** (2020). Enhancement of permanent deformation resistance of modified asphalt concrete mixtures with nano-high density polyethylene. *Construction and Building Materials*, 236, 117604.
- [104] **Brasileiro, L., Moreno-Navarro, F., Tauste-Martínez, R., Matos, J. ve Rubio-Gámez, M. C.** (2019). Reclaimed polymers as asphalt binder modifiers for more sustainable roads: A review. *Sustainability*, 11(3), 646.
- [105] **Zhao, Z., Wu, S., Liu, Q., Xie, J., Yang, C., Wang, F. ve Wan, P.** (2022). Recycling waste disposable medical masks in improving the performance of asphalt and asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 337, 127621.
- [106] **Ma, J., Nawarathna, H. M. C. ve Hesp, S. A. M.** (2022). On the sustainable use of recycled plastics in flexible asphalt pavements. *Journal of Cleaner Production*, 359, 132081.
- [107] **Mashaan, N., Chegenizadeh, A. ve Nikraz, H.** (2022). Performance of PET and nano-silica modified stone mastic asphalt mixtures. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e01044.
- [108] **Mushtaq, F., Huang, Z., Shah, S. A. R., Zhang, Y., Gao, Y., Azab, M. ve Anwar, M. K.** (2022). Performance optimization approach of polymer modified asphalt mixtures with PET and PE wastes: A Safety study for utilizing eco-friendly circular economy-based SDGs concepts. *Polymers*, 14(12), 2493.
- [109] **Dong, F., Zhao, W., Zhang, Y., Wei, J., Fan, W., Yu, Y. ve Wang, Z.** (2014). Influence of SBS and asphalt on SBS dispersion and the performance of modified asphalt. *Construction and Building Materials*, 62, 1–7.
- [110] **Özen, H.** (2011). Rutting evaluation of hydrated lime and SBS modified asphalt mixtures for laboratory and field compacted samples. *Construction and Building Materials*, 25(2), 756–765.
- [111] **Kaya, D., Topal, A. ve McNally, T.** (2019). Relationship between processing parameters and aging with the rheological behaviour of SBS modified bitumen. *Construction and Building Materials*, 221, 345–350.

- [112] **Ahmedzade, P., Fainleib, A., Günay, T., Starostenko, O. ve Kovalinska, T.** (2013). Effect of gamma-irradiated recycled low-density polyethylene on the high- and low-temperature properties of Bitumen. *International Journal of Polymer Science*, 1-10.
- [113] **Luo, D., Khater, A., Yue, Y., Abdelsalam, M., Zhang, Z., Li, Y. ve Iseley, D. T.** (2019). The performance of asphalt mixtures modified with lignin fiber and glass fiber: A review. *Construction and Building Materials*, 209, 377–387.
- [114] **Gu, Q., Kang, A., Li, B., Xiao, P. ve Ding, H.** (2022). Effect of fiber characteristic parameters on the high and low temperature rheological properties of basalt fiber modified asphalt mortar. *Case Studies in Construction Materials*, 17, e01247.
- [115] **Rahman, M. T., Mohajerani, A. ve Giustozzi, F.** (2020). Possible use of cigarette butt fiber modified bitumen in stone mastic asphalt. *Construction and Building Materials*, 263, 120134.
- [116] **Cui, S., Sheng, Y., Wang, Z., Jia, H., Qiu, W., Temitope, A. A. ve Xu, Z.** (2022). Effect of the fiber surface treatment on the mechanical performance of bamboo fiber modified asphalt binder. *Construction and Building Materials*, 347, 128453.
- [117] **Liu, J., Hao, P., Sun, B., Li, Y. ve Wang, Y.** (2022). Rheological properties and mechanism of asphalt modified with polypropylene and graphene and carbon black composites. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 34(12), 4022343.
- [118] **Gan, Y., Li, C., Chen, A., Li, Y. ve Wu, S.** (2022). A model of pyrolysis carbon black and waste chicken feather using a response surface method in hot-mix asphalt mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 34(11), 4022278.
- [119] **Zarei, M., Naseri, A., Salehikalam, A., Ghandehari, M., Nasrollahi, M. ve Dadashi, A.** (2022). Technical-economic studies about the effect of nano-carbon black on asphalt mixtures. *Electronic Journal of Structural Engineering*, 22(2), 33–41.
- [120] **Geckil, T., Ahmedzade, P. ve Alatas, T.** (2018). Effect of carbon black on the high and low temperature properties of bitumen. *International Journal of Civil Engineering*, 16, 207–218.
- [121] **Raza, M. ve Khan, R.** (2021). Influence of Marble dust filler on marshal properties of hot mix asphalt. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology*, 13(10), 493–502.
- [122] **Khan, A., Khan, M., Ali, S. and Khattak, M.** (2022). Use of Marble Dust as a Filler Material in Flexible Pavements, *4 th Conference on Sustainability in Civil Engineering*, (pp: 1-7), Pakistan: Capital University of Science and Technology.
- [123] **Mahto, S. K. ve Sinha, S.** (2022). Application of marble dust and ground granulated blast-furnace slag in emulsified asphalt warm mixtures. *Journal of Cleaner Production*, 370, 133532.
- [124] **Aruntaş, H. Y., Gürü, M., Dayı, M. ve Tekin, İ.** (2010). Utilization of waste marble dust as an additive in cement production. *Materials & Design*, 31(8), 4039–4042.

- [125] **Abtahi, S. M., Sheikhzadeh, M. ve Hejazi, S. M.** (2010). Fiber-reinforced asphalt-concrete—a review. *Construction and Building Materials*, 24(6), 871–877.
- [126] **Slebi-Acevedo, C. J., Lastra-González, P., Pascual-Muñoz, P. ve Castro-Fresno, D.** (2019). Mechanical performance of fibers in hot mix asphalt: A review. *Construction and Building Materials*, 200, 756–769.
- [127] **Casado-Barrasa, R., Lastra-González, P., Indacoechea-Vega, I. ve Castro-Fresno, D.** (2019). Assessment of carbon black modified binder in a sustainable asphalt concrete mixture. *Construction and Building Materials*, 211, 363–370.
- [128] **Notani, M. A., Arabzadeh, A., Satvati, S., Tarighati Tabesh, M., Ghafari Hashjin, N., Estakhri, S. ve Alizadeh, M.** (2020). Investigating the high-temperature performance and activation energy of carbon black-modified asphalt binder. *SN Applied Sciences*, 2, 1–12.
- [129] **Zhong, K., Li, Z., Fan, J., Xu, G. ve Huang, X.** (2021). Effect of carbon black on rutting and fatigue performance of asphalt. *Materials*, 14(9), 2383.
- [130] **Zhang, R., Wang, H., Gao, J., You, Z. ve Yang, X.** (2017). High temperature performance of SBS modified bio-asphalt. *Construction and Building Materials*, 144, 99–105.
- [131] **Yeh, P., Nien, Y., Chen, W. ve Liu, W.** (2010). Evaluation of thermal and viscoelastic properties of asphalt binders by compounding with polymer modifiers. *Polymer composites*, 31(10), 1738–1744.
- [132] **Ghabchi, R., Dharmarathna, C. P. ve Mihandoust, M.** (2021). Feasibility of using micronized recycled polyethylene terephthalate (PET) as an asphalt binder additive: A laboratory study. *Construction and Building Materials*, 292, 123377.
- [133] **Oda, S., Fernandes J. J. L. ve Ildefonso, J. S.** (2012). Analysis of use of natural fibers and asphalt rubber binder in discontinuous asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 26(1), 13–20.
- [134] **Stempihar, J. J., Souliman, M. I. ve Kaloush, K. E.** (2012). Fiber-reinforced asphalt concrete as sustainable paving material for airfields. *Transportation research record*, 2266(1), 60–68.
- [135] **Perca Callomamani, L. A., Hashemian, L. ve Sha, K.** (2020). Laboratory investigation of the performance evaluation of fiber-modified asphalt mixes in cold regions. *Transportation Research Record*, 2674(7), 323–335.
- [136] **Cong, P., Xu, P. ve Chen, S.** (2014). Effects of carbon black on the anti aging, rheological and conductive properties of SBS/asphalt/carbon black composites. *Construction and Building Materials*, 52, 306–313.
- [137] **Wang, H., Lu, G., Feng, S., Wen, X. ve Yang, J.** (2019). Characterization of bitumen modified with pyrolytic carbon black from scrap tires. *Sustainability*, 11(6), 1631.
- [138] **Geçkil, T., İnce, C. B. ve İssi, S.** (2022). Pirina modifiyeli bitümlerin yüksek sıcaklıklardaki işlenebilirliği ve kalıcı deformasyon direnci. *Politeknik dergisi*, 25(2), 745–755.
- [139] **URL-5** < <https://pixabay.com/tr/photos/at%C4%B1k-%C3%A7%C3%B6p->

%C3%A7%C3%B6p-torbas%C4%B1-%C3%A7%C3%B6pl%C3%BCK-%C3%A7evre-1741127/>, date retrieved 18.04.2023.

- [140] **URL-6** < <https://www.log.com.tr/gelecegi-tehdit-eden-plastik-atik-sorunu-icin-onemli-kesif/>>, date retrieved 08.04.2023.
- [141] **URL-7** <<https://www.yurdakulaluminyum.com.tr/aluminyum-curuf/>>, date retrieved 10.10.2023.
- [142] **URL-8** < <https://www.ekonomim.com/sectorler/tarim/25-milyon-ton-tarimsal-atiktan-25-milyar-liralik-yem-haberi-634469>>, date retrieved 15.05.2023.
- [143] **URL-9** < <https://ornakorman.com/blog-detay/talas-nedir-talas-cesitleri>>, date retrieved 15.05.2023.
- [144] **URL-10** <<http://www.pagcev.org/geri-donusum>>, date retrieved 15.05.2023.
- [145] **Keskin, M. ve Karacasu, M.** (2018). Atık bor içeren asfalt betonlarının performanslarının değerlendirilmesi. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 30(2), 185–192.
- [146] **Ekrem, Y. ve Kılıç, M.** (2014). PVC ve PET Atıkların seçimli flotasyonu bölüm 1: plastikler; çevresel etkileri; geri dönüşümü. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 29(2), 79–94.
- [147] **Şengül, Ü.** (2010). Atıkların geri dönüşümü ve tersine lojistik. *Paradoks Ekonomi, Sosyoloji ve Politika Dergisi*, 6(1), 73–86.
- [148] **Çağal, F. E.** (2009). *Biyokütle enerjisi potansiyelinin Türkiye açısından değerlendirilmesi* (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, İstanbul.
- [149] **Olgun, H., Doğru, M. ve Howart, C. R.** (1999). Katı atıkların enerji dönüşümünde kullanılması ve gazlaştırıcılar. *Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi ve Sergisi*, 835–853.
- [150] **Qian, K., Kumar, A., Zhang, H., Bellmer, D. ve Huhnke, R.** (2015). Recent advances in utilization of biochar. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 1055–1064.
- [151] **Verheijen, F., Jeffery, S., Bastos, A. C., Van der Velde, M. ve Diafas, I.** (2010). Biochar application to soils. *A critical scientific review of effects on soil properties, processes, and functions*, 24099(162), 2183–2207.
- [152] **Merklein, K., Fong, S. S. ve Deng, Y.** (2016). *Biotechnology for biofuel production and optimization*. Elsevier.
- [153] **Srivastava, R. K., Shetti, N. P., Reddy, K. R., Kwon, E. E., Nadagouda, M. N. ve Aminabhavi, T. M.** (2021). Biomass utilization and production of biofuels from carbon neutral materials. *Environmental Pollution*, 276, 116731.
- [154] **Wei, R., Zhang, L., Cang, D., Li, J., Li, X. ve Xu, C. C.** (2017). Current status and potential of biomass utilization in ferrous metallurgical industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68, 511–524.
- [155] **Mahssin, Z.Y., Hassan, N.A., Yaacob, H., Puteh, M.H., Ismail, C.R., Jaya, R.P., Zainol, M.M. ve Mahmud, M.Z.H.** (2021). Converting Biomass into Bio-Asphalt—A Review, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Malaysia, October 16-17.

- [156] **Xue, Y., Wu, S., Cai, J., Zhou, M. ve Zha, J.** (2014). Effects of two biomass ashes on asphalt binder: Dynamic shear rheological characteristic analysis. *Construction and Building Materials*, 56, 7–15.
- [157] **Tahami, S. A., Arabani, M. ve Mirhosseini, A. F.** (2018). Usage of two biomass ashes as filler in hot mix asphalt. *Construction and Building Materials*, 170, 547–556.
- [158] **Kumar, A., Choudhary, R., Narzari, R., Katak, R. ve Shukla, S. K.** (2018). Evaluation of bio-asphalt binders modified with biochar: a pyrolysis by-product of Mesua ferrea seed cover waste. *Cogent Engineering*, 5(1), 1548534.
- [159] **Bostancıoğlu, M. ve Oruç, Ş.** (2016). Effect of activated carbon and furan resin on asphalt mixture performance. *Road Materials and Pavement Design*, 17(2), 512–525.
- [160] **Irianto, I. ve Sri, G.** (2021). Utilization of coconut coir waste in fibrous porous asphalt planning using REAM specification. *Design Engineering.*, (8), 13125–13132.
- [161] **Martínez-Toledo, C., Valdés-Vidal, G., Calabi-Floody, A., González, M. E. ve Reyes-Ortiz, O.** (2022). Effect of biochar from oat hulls on the physical properties of asphalt binder. *Materials*, 15(19), 7000.
- [162] **Bao, D.X., Yu, Y.Y. ve Zhao, Q.-M.** (2020). Evaluation of the chemical composition and rheological properties of bio-asphalt from different biomass sources. *Road Materials and Pavement Design*, 21(7), 1829–1843.
- [163] **Moura, L. S., Silva, C. C. V. P., Oliveira, S. M., Carneiro, A. M. P., Lucena, L. C. F. L. ve Nóbrega, A. C. V.** (2022). Use of calcium-rich wood biomass combustion ashes as filler in hot mix asphalt. *Road Materials and Pavement Design*, 23(10), 2375–2393.
- [164] **Yang, X., You, Z. ve Dai, Q.** (2013). Performance evaluation of asphalt binder modified by bio-oil generated from waste wood resources. *International Journal of Pavement Research & Technology*, 6(4), 431-439.
- [165] **Park, K.B., Kim, J.-S., Pahlavan, F. ve Fini, E. H.** (2022). Biomass waste to produce phenolic compounds as antiaging additives for asphalt. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 10(12), 3892–3908.
- [166] **Ma, J., Nawarathna, H. M. C. ve Hesp, S. A. M.** (2022). On the sustainable use of recycled plastics in flexible asphalt pavements. *Journal of Cleaner Production*, 359, 132081.
- [167] **Zhao, S., Huang, B. ve Ye, P.** (2014). Laboratory evaluation of asphalt cement and mixture modified by bio-char produced through fast pyrolysis. *Pavement Materials, Structures, and Performance*, 140–149.
- [168] **Sun, Z., Yi, J., Huang, Y., Feng, D. ve Guo, C.** (2016). Properties of asphalt binder modified by bio-oil derived from waste cooking oil. *Construction and Building Materials*, 102, 496–504.
- [169] **Raman, N. A. A., Hainin, M. R., Hassan, N. A. ve Ani, F. N.** (2015). A review on the application of bio-oil as an additive for asphalt. *Jurnal Teknologi*, 72(5).105-110.
- [170] **Zhao, S., Huang, B., Shu, X. ve Ye, P.** (2014). Laboratory investigation of biochar-

- modified asphalt mixture. *Transportation Research Record*, 2445(1), 56–63.
- [171] **Yüksel, Ö.** (2017). *Evsel atıklar ve geri dönüşüm-kimya endüstrisi” konularında istasyon tekniğinin öğrencilerin akademik başarısına ve görüşlerine etkisi* (Yüksek Lisans Tezi), Ordu Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü, Ordu.
- [172] **URL-11** <<https://www.milliyet.com.tr/egitim/evsel-atik-nedir-evsel-atik-ornekleri-nelerdir-6449920>> date retrieved 15.05.2023.
- [173] **Gündüzalp, A. A. ve Güven, S.** (2016). Atık, çeşitleri, atık yönetimi, geri dönüşüm ve tüketici: Çankaya belediyesi ve semt tüketicileri örneği. *Hacettepe Üniversitesi Sosyolojik Araştırmalar E-Dergisi*, 9(1), 1–19.
- [174] **Sayın, A. A. ve Yerli, A.** (2020). Evsel atıklarda geri dönüşüm farkındalığı ve ekonomiye katkısının incelenmesi. *OPUS International Journal of Society Researches*, 16(29), 1849–1874.
- [175] **URL-12** < <https://www.worldbank.org/>, *Solid waste Manager*>, date retrieved 15.05.2023.
- [176] **URL-13** < <https://www.bbc.com/turkce/haberler-dunya-48851661#:~:text=Endekse%20g%C3%B6re%2C%20d%C3%BCnya%20g enelinde%20her,%C3%A7%C3%B6p%20oran%C4%B1%20ise%20y%C3 %BCzde%2027>>, date retrieved 5.05.2023.
- [177] **URL-14** < <https://ec.europa.eu/eurostat/web/lucas/data/primary-data/2018>>, date retrieved 15.05.2023.
- [178] **URL-15** < <https://tr.linkedin.com/pulse/avrupa-birli%C4%9Fi->>, date retrieved 15.05.2023.
- [179] **URL-16** <<http://www.tuik.gov.tr>, 2018>, date retrieved 15.05.2023.
- [180] **Çevre Şehircilik Bakanlığı.** (2017). *Ulusal atık yönetimi ve eylem planı 2023*.
- [181] **Çevre Şehircilik Bakanlığı.** (2022). *Malatya ili 2021 yılı çevre durum raporu*.
- [182] **Hakan, E. ve Demiral, B.** (2018). Malatya’da katı atık yönetimi: kentleşmenin yerel çevre politikaları üzerine etkisi. *Sosyal Bilimler Araştırma Dergisi*, 7(2), 277–295.
- [183] **Wallah, S. ve Rangan, B.W.** (2006). *Low-calcium fly ash-based geopolymer concrete: long-term properties*. Curtin University of Technology.
- [184] **Davidovits, J.** (1988). *Soft mineralogy and geopolymers*, Proc. geopolymer 88 International Conference, the Universite de Technologie Compiengne, France.
- [185] **Davidovits, J.** (1994). Geopolymers: man-made rock geosynthesis and the resulting development of very early high strength cement. *Journal of Materials education*, 16, 91.
- [186] **Davidovits, J.** (1994). Global warming impact on the cement and aggregates industries. *World resource review*, 6(2), 263–278.
- [187] **Davidovits, J.** (1994). High-alkali cements for 21st century concretes. *Special Publication*, 144, 383–398.
- [188] **Davidovits, J.** (1999). Chemistry of geopolymeric systems, terminology. *Geopolymer*, 99, 9–39

- [189] **Thang, X. N.** (2016). Influence of Curing and Water to the Mechanical Properties of Geopolymer Mortar. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 5(2), 49-52.
- [190] **Davidovits, J.** (1988). Geopolymer chemistry and properties. *Proceedings of the 1st International Conference on Geopolymer*, 88, 25–48.
- [191] **Davidovits, J.** (1991). Geopolymers: inorganic polymeric new materials. *Journal of Thermal Analysis and calorimetry*, 37(8), 1633–1656.
- [192] **Davidovits, J.** (1994). Properties of geopolymer cements. *First international conference on alkaline cements and concretes, 1*, 131–149.
- [193] **Xu, H. ve Van Deventer, J. S. J.** (2000). The geopolymerisation of aluminosilicate minerals. *International journal of mineral processing*, 59(3), 247–266.
- [194] **Palomo, A., Grutzeck, M. W. ve Blanco, M. T.** (1999). Alkali-activated fly ashes: A cement for the future. *Cement and concrete research*, 29(8), 1323–1329.
- [195] **Liew, Y.M., Heah, C.-Y. ve Kamarudin, H.** (2016). Structure and properties of clay-based geopolymer cements: A review. *Progress in Materials Science*, 83, 595–629.
- [196] **Temuujin, J., Williams, R. P. ve Van Riessen, A.** (2009). Effect of mechanical activation of fly ash on the properties of geopolymer cured at ambient temperature. *Journal of materials processing technology*, 209(12–13), 5276–5280.
- [197] **Hounsi, A. D., Lecomte-Nana, G., Djeteli, G., Blanchart, P., Alowanou, D., Kpelou, P. ve Praisler, M.** (2014). How does Na, K alkali metal concentration change the early age structural characteristic of kaolin-based geopolymers. *Ceramics International*, 40(7), 8953–8962.
- [198] **Cong, P. ve Cheng, Y.** (2021). Advances in geopolymer materials: A comprehensive review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 8(3), 283–314.
- [199] **Milad, A., Ali, A. S. B., Babalghaith, A. M., Memon, Z. A., Mashaan, N. S., Arafa, S. ve Md. Yusoff, N. I.** (2021). Utilisation of waste-based geopolymer in asphalt pavement modification and construction—A review. *Sustainability*, 13(6), 3330.
- [200] **Shahmansouri, A. A., Bengar, H. A. ve Ghanbari, S.** (2020). Compressive strength prediction of eco-efficient GGBS-based geopolymer concrete using GEP method. *Journal of Building Engineering*, 31, 101326.
- [201] **Yu, J., Chen, Y., Chen, G. ve Wang, L.** (2020). Experimental study of the feasibility of using anhydrous sodium metasilicate as a geopolymer activator for soil stabilization. *Engineering Geology*, 264, 105316.
- [202] **Amran, Y. H. M., Alyousef, R., Alabduljabbar, H. ve El-Zeadani, M.** (2020). Clean production and properties of geopolymer concrete; A review. *Journal of Cleaner Production*, 251, 119679.
- [203] **Bajpai, R., Choudhary, K., Srivastava, A., Sangwan, K. S. ve Singh, M.** (2020). Environmental impact assessment of fly ash and silica fume based geopolymer concrete. *Journal of Cleaner Production*, 254, 120147.
- [204] **Tang, N., Deng, Z., Dai, J.-G., Yang, K., Chen, C. ve Wang, Q.** (2018). Geopolymer

as an additive of warm mix asphalt: Preparation and properties. *Journal of cleaner production*, 192, 906–915.

- [205] **Meng, Y., Lei, J., Zhang, R., Yang, X., Zhao, Q., Liao, Y. ve Hu, Y.** (2022). Effect of geopolymer as an additive on the mechanical performance of asphalt. *Road Materials and Pavement Design*, 23(11), 2466–2485.
- [206] **Hamid, A., Baaj, H. ve El-Hakim, M.** (2022). Rutting behaviour of geopolymer and styrene butadiene styrene-modified asphalt binder. *Polymers*, 14(14), 2780.
- [207] **Tang, N., Yang, K., Alrefaei, Y., Dai, J.G., Wu, L.-M. ve Wang, Q.** (2020). Reduce VOCs and PM emissions of warm-mix asphalt using geopolymer additives. *Construction and Building Materials*, 244, 118338.
- [208] **Ali, S. I. A., Yahia, H. A. M., Ibrahim, A. N. H. ve Al Mansob, R. A.** (2017). High temperatures performance investigation of geopolymer modified bitumen binders. *Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields*, 417–422.
- [209] **Dayal, S. ve Soundarapandian, N.** (2018). Effect of fly-ash based geopolymer coated aggregate on bituminous mixtures. *Gradevinar*, 70, 187–199.
- [210] **Tang, N., Cen, W., Yang, J., Yang, K., Sun, Y., Zhao, M. ve Xu, C.** (2022). Pavement performance and particulate matter reduction for warm mix asphalt using geopolymer additives. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 15(6), 1354–1365.
- [211] **Hoy, M., Horpibulsuk, S., Rachan, R., Chinkulkijniwat, A. ve Arulrajah, A.** (2016). Recycled asphalt pavement–fly ash geopolymers as a sustainable pavement base material: Strength and toxic leaching investigations. *Science of the Total Environment*, 573, 19–26.
- [212] **Hoy, M., Horpibulsuk, S. ve Arulrajah, A.** (2016). Strength development of recycled asphalt pavement–fly ash geopolymer as a road construction material. *Construction and Building Materials*, 117, 209–219.
- [213] **Ibrahim, A. N. H., Khairuddin, F. H., Yusoff, N. I. M., Borhan, M. N. ve Akhir, N. M.** (2017). Sifat Mekanik dan Tingkah Laku Resapan Air Bitumen Terubahsuai Geopolimer. *Jurnal Teknologi*, 79(4), 107–111.
- [214] **Yaro, N. S. A., Napiah, M. Bin, Sutanto, M. H., Usman, A., Murana, A. A. ve Rafiq, W.** (2021). Effect of palm oil clinker powder-based geopolymer on bitumen and asphalt mixture properties. *Third International Sustainability and Resilience Conference*, (310–315). Climate Change.
- [215] **Saride, S., Avirneni, D. ve Challapalli, S.** (2016). Micro-mechanical interaction of activated fly ash mortar and reclaimed asphalt pavement materials. *Construction and Building Materials*, 123, 424–435.
- [216] **Geckil, T. ve Seloglu, M.** (2018). Performance properties of asphalt modified with reactive terpolymer. *Construction and building materials*, 173, 262–271.
- [217] **Liang, Y., Feng, Z. ve Yu, J.** (2010). Effect of chemical compositions on temperature susceptibility of bitumens. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 25(4), 669–673.
- [218] **Singh, D., Sawant, D. ve Xiao, F.** (2017). High and intermediate temperature performance evaluation of crumb rubber modified binders with RAP. *Transportation Geotechnics*, 10, 13–21.

- [219] **Masad, E., Somadevan, N., Bahia, H. U. ve Kose, S.** (2001). Modeling and experimental measurements of strain distribution in asphalt mixes. *Journal of Transportation Engineering*, 127(6), 477–485.
- [220] **İskender, E.** (2019). Bentonit nanokilinin elastomerik ve plastomerik polimer modifiye bitümlerin depolama stabiliteleri üzerindeki etkisi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 7(3), 1187–1203.



## ÖZGEÇMİŞ

**Ad-Soyad** : Ceren Beyza İNCE

## ÖĞRENİM DURUMU :

**Lisans** :2016, Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü  
**Yüksek Lisans** :2019, İnönü Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Ulaştırma Bilim Dalı  
**Doktora** :2023, İnönü Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Ulaştırma Bilim Dalı

## MESLEKİ DENEYİM:

- (2016-Devam) Batualp Yapı Deneyim LTD.ŞTİ’de Kontrol Mühendisi olarak çalışıyor.

## YÜKSEK LİSANS/DOKTORA TEZİNDEN VE DİĞER ARAŞTIRMALARDAN TÜRETİLEN ÇALIŞMALAR (Makaleler, Bildiriler, Patentler v.b.)

- **Geçkil, T., Tanyıldızı, M. M. & İnce C.B. (2023).** Investigation of the benefit-cost relationship of using blast furnace slag added concretes as road pavement on soils with weak bearing strength. *Gradevinar*, 75(1), 23-37.
- **Geçkil, T., Tanyıldızı, M.M. & İnce, C.B. (2023).** Investigation of use potential of fiber added concretes as road pavement on weak soils. *Gradevinar*.
- **Geçkil, T., İssi, S. & İnce, C.B. (2022).** Investigation of the use of prina in bitumen modification. *Case Studies in Construction Materials*, 17, e01623.
- **Geçkil, T., İnce, C.B. & Tanyıldızı, M.M. (2022).** Physical, rheological and microstructural properties of waste ldpe and teoa modified bitumens. *Journal of Chinese Institute of Engineers*, 45 (6): 477-487.
- **İnce, C.B. & Geçkil, T. (2022).** Effects of recycled PET and TEOA on performance characteristics of bitumen, *Gradevinar*, 74 (2): 105-114.
- **Geçkil, T., İnce, C.B. & İssi S. (2022).** The workability and permanent deformation resistance of pirina modified bitumens at high temperatures. *Journal of Polytechnic*, 25 (2): 745-755.
- **Geçkil, T., Karabaş, B. & İnce, C.B. (2022).** Selection of trambus system and evaluation of application conditions: Malatya example. *European Journal of Science and Technology*, 38: 205-217.
- **Geçkil, T., İnce, C.B. & Özpınar, E.T. (2022).** Determination of water sensitivity of nanosilica added hot mix asphalt. *Firat University Journal Of Experimental And Computational Engineering*, 1 (3): 110-121.
- **Geçkil, T., Tanyıldızı, M.M., İnce, C.B. & Yıldırım, E.S. (2021).** Effects of a clayey soil stabilized with blast furnace slag on rigid pavement thickness and cost. *European Journal of Science and Technology*, 27: 158-170.
- **Geçkil T., Önal, Y. & İnce, C.B. (2021).** Moisture resistance of bituminous hot mixtures modified with waste PET. *Journal of Polytechnic*, 24 (2): 461-471.

- **Geçkil, T., İnce, C.B. & Özpınar, E.T. (2021).** Effects of nanosilica on the consistency, viscosity and microstructure of bitumen. *Konya Journal of Engineering Sciences*, 9 (4): 845–857.
- **Geçkil, T., Tanyıldızı, M. M. & İnce, C. B., & Yıldırım, E. S. (2020).** Influence of a clay ground stabilized with blast furnace slag on flexible road pavement thickness and cost. *Naturengs*, 1(2): 17-31.
- **Geçkil, T. & İnce, C.B. (2022).** Bitümlü kaplamaların su etkilerine karşı performansı üzerinde atık LDPE'nin etkisi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 10 (2): 631-642.
- **Geçkil, T., İnce, C.B. & İssi, S. (2021).** Pirina katkısının bitümlü kaplamaların nem direncine etkisi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 12 (3): 529-538.
- **Geçkil, T., Aksağan, Z. & İnce, C.B. (2021).** Atık lastiklerden elde edilen siyah karbon katkısının asfaltın işlenebilirlik özelliklerine etkisi, *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 8 (15): 294-306.
- **Geçkil, T., Aksağan, Z. & İnce, C.B. (2021).** Asfalt kaplamaların nem performansı üzerinde siyah karbonun etkisi, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*. 9 (5): 2102-2115.
- **Geçkil, T. & İnce, C.B. (2021).** Atık LDPE'nin asfaltın fiziksel ve işlenebilirlik özelliklerine etkisi, *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*. 11 (4): 1103-1114.
- **Geçkil, T., Seloğlu, M. & İnce, C.B. (2021).** Sıcak karışım asfalt kaplamanın su hasarı direnci üzerinde RET katkısının etkisi. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 33 (2): 537-546.
- **Geçkil, T., İnce, C.B., İssi, S. (2021).** Pirina'nın bitümün fiziksel ve mikroyapısal özellikleri üzerindeki etkisi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 23 (69): 1015-1025.
- **Geçkil, T., Önal, Y. & İnce, C.B. (2020).** Atık Polietilen Tereftalat (PET) ile modifiye edilmiş saf bitümün fiziksel, morfolojik ve ısıl özellikleri. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 32 (1): 157-166.
- **Geçkil, T. & İnce, C.B. (2023, April).** Effect of Garbage Waste Ashes on Temperature Sensivity of Asphalt Binders. *AICMES 2nd International Conference On Interdisciplinary Middle East Studies* (pp. 51-61). Israel.
- **Geçkil, T., İnce, C.B. & Koç, S. (2023, April).** Investigation of the Usage Blast Furnace Slag in Bituminous ot Mixes. *AICMES 2nd International Conference On Interdisciplinary Middle East Studies* (pp. 40-50). Israel.
- **Geçkil, T. & İnce, C.B. (2022, December).** Effect of Waste LDPE on Static Creep Stiffness of Bituminous Hot Mixtures. *SILK ROAD International Scientific Research Conference* (pp. 101-109). Azerbaijan.
- **Geçkil, T., Çetkin, Ö.N. & İnce, C.B. (2022, December).** Effects Of Blast Furnace Slag Stabilized Clay-Sand Soils On Flexible Road Pavement. *SILK ROAD International Scientific Research Conference* (pp. 694-703). Azerbaijan.

- **Geçkil, T., İnce, C.B. & Koç, S. (2022, December).** Evaluation of Use of Glass Powder as Filler in Hot Mix Asphalt. III. International Cappadocia Scientific Research Congress (pp. 820-827). Türkiye.
- **Geçkil, T., Çetkin, Ö.N. & İnce, C.B. (2022, December).** Effects of Blast Furnace Slag Stabilized Clay-Sand Soils on Rigid Road Pavement. III. International Cappadocia Scientific Research Congress (pp. 828-835). Türkiye.
- **Geçkil, T., Çetkin, Ö.N. & İnce, C.B. (2022, December).** Effects of Sodium Hydroxide on the Unconfined Compressive Strength of Clay-Sand Soils. International Icontech Conference-6 on Innovative Surveys in Positive Sciences (pp. 134-140). Croatia.
- **Geçkil, T., Koç, S. & İnce, C.B. (2022, December).** Investigation of the Usage of Ferrochrome Slag as Fillers in Bituminous Hot Mixtures. International Icontech Conference-6 on Innovative Surveys in Positive Sciences (pp. 76-84). Croatia.
- **Geçkil, T., Tanyıldızı, M.M. & İnce, C.B. (2022, August).** The Effect of Blast Furnace Slag-Additive Concretes on Road Pavement Thickness for Different Base Soils. 8th International Black Sea Coastline Countries Scientific Research Conference (pp. 309-324). Bulgaria.
- **Geçkil, T., Tanyıldızı, M.M. & İnce, C.B. (2022, August).** Investigation of the Usage of Fiber Concrete with Blast Furnace Slag (BFS) Additives As Road Pavement on Very Weak Bearing Strength Soil. 8th International Black Sea Coastline Countries Scientific Research Conference (pp. 298-308). Bulgaria.
- **Geçkil, T., İnce, C.B. & Aksağan, Z. (2022, April).** Effect of Waste PET on Marshall Stability of Hot Mixes. Latin American International Conference on Natural and Applied Sciences-II (pp. 304-311). Colombia.
- **Geçkil, T., Aksağan, Z. & İnce C.B. (2022, April).** The Effect of Oak Ash on The Stability of Asphalt Pavements. Latin American International Conference on Natural and Applied Sciences-II (pp. 238-245). Colombia.
- **Geçkil, T., İnce, C.B. & Karabaş, B. (2022, March).** The Effect of Microsilica on The Resistance of Bituminous Pavements to Shear Stress. Middle East International Conference on Scintific Research-VII (pp. 9-18). Lubnan.
- **Geçkil, T., İnce, C.B. & Karabaş, B. (2022, March).** Effect of Waste Polymethyl Methacrylate (PMMA) Additive on The Conventional Properties of Asphalt. Middle East International Conference on Scintific Research-VII (pp. 1-8). Lubnan.
- **Geçkil, T., İnce, C.B. & Tanyıldızı, M.M. (2021, April).** Effect of Microsilica Additive on The Properties of Asphalt. 2. International Baku Scientific Researches Conference (pp. 417-424). Azerbaijan.
- **Öbek, A., Geçkil, T., Demirelli, K. & İnce, C.B. (2021, March).** Effect of Copolymer Synthesized From Waste Polypropylene on The Deformation Resistance of Asphalt Pavements. MAS 14th. International European Conference on Mathematics, Engineering, Natural&Medical Sciences (pp. 163-171). Hungary.
- **Geçkil, T., İssi, S, İnce, C.B. & Tanyıldızı, M.M. (2021, March).** Effects of Pirina on The Stability of Hot Mixed Asphalt Pavements. Euro Asia 8th. International Congress on Applied Sciences (pp. 238-247). Uzbekistan.

- **Geçkil, T., İnce, C.B. & Tanyıldızı, M.M. (2021, January).** Atık LDPE Katkısının Asfaltın Tekerlek İzi Dayanımı Üzerindeki Etkisi. International European Conference on Interdisciplinary Scientific Researches-III (pp. 432-441). Moldavia.
- **Geçkil, T., İnce, C.B., Tanyıldızı, M.M. & Özpınar, E.T. (2021, January).** Nanosilika Katkısının Bitümün Fiziksel Özelliklerine Etkisi. International European Conference on Interdisciplinary Scientific Researches-III (pp. 423-431). Moldavia.
- **Geçkil, T., İnce, C.B. & Aksağan, Z. (2020, Kasım).** Atık LDPE Katkısının Bitümlü Sıcak Karışımların Marshall Stabilitesi Üzerindeki Etkileri. Balkan Zirvesi 3. Uluslararası Uygulamalı Bilimler Kongresi (pp. 12-21). Türkiye.
- **Geçkil, T., Aksağan, Z. & İnce, C.B. (2020, Kasım).** Atık Lastiklerden Elde Edilen Siyah Karbonun Bitümün Kıvamına ve Sıcaklık Hassasiyetine Etkisi. Balkan Zirvesi 3. Uluslararası Uygulamalı Bilimler Kongresi (pp. 1-11). Türkiye.
- **Geçkil, T., Önal, Y. & İnce, C.B. (2019, Eylül).** Atık PET Katkısının Asfaltın Karıştırma ve Sıkıştırma Sıcaklıklarına Etkisi. III. Uluslararası Battalgazi Bilimsel Çalışmalar Kongresi (pp. 217-226). Türkiye.