

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

**FERROKROM CÜRUFUNDAN ELDE EDİLEN GEOPOLİMERİN BİTÜMLÜ
SICAK KARIŞIMLARIN PERFORMANSINA ETKİLERİ**



YÜKSEK LİSANS TEZİ

Sena KOÇ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

HAZİRAN 2024

T.C
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**FERROKROM CÜRUFUNDAN ELDE EDİLEN GEOPOLİMERİN BİTÜMLÜ
SICAK KARIŞIMLARIN PERFORMANSINA ETKİLERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Sena KOÇ
(36203621082)

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Tacettin GEÇKİL
Eş Danışman: Dr.Öğr.Üyesi Ceren Beyza İNCE

HAZİRAN 2024

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez çalışmam boyunca bana yol gösteren, bilgi ve tecrübelerini her daim paylaşan başta danışman hocam Doç. Dr. Tacettin GEÇKİL'e ve bana destek ve yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen eş danışman hocam Dr.Öğr.Üyesi Ceren Beyza İNCE' ye,

Deneysel çalışmalarım esnasında bana destek sağlayan Öğr.Gör. Zülfikar AKSAĞAN'a, İnş.Müh. Atakan AYKANAT ve İnş.Müh. Enes ÇAŞKA'ya,

Son olarak her koşulda yanımda olup bugünlere gelmemde çok büyük emekleri olan başta babam olmak üzere bütün aile bireylerime, bana her konuda destek oldukları için sonsuz sevgi ve saygılarımı sunar,

teşekkür ederim.

Bu çalışma, İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi, FYL-2023-3312 numaralı projesi ile desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne teşekkürü borç bilirim.

ONUR SÖZÜ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Ferrokrom Cürufundan Elde Edilen Geopolimerin Bitümlü Sıcak Karışımların Performansına Etkileri” başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan özenle yazıldığını ve yararlandığım bütün kaynakların hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Sena KOÇ



İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ	i
ONUR SÖZÜ	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
SEMBOLLER VE KISALTMALAR	ix
ÖZET	x
ABSTRACT	xi
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Tezin Amacı ve Kapsamı	3
2. BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLAR.....	5
2.1 Agregalar	5
2.1.1 Agregaların özellikleri	5
2.1.1.1 Mineralojik yapı	6
2.1.1.2 Boyut sınıflandırması	6
2.1.1.3 Gradasyon.....	6
2.1.1.4 Porozite	7
2.1.1.5 Boşluk oranı ve yüzey alanı.....	7
2.1.1.6 Biçim ve yüzey yapısı	7
2.2 Agregalar Üzerinde Yapılan Deneyler	8
2.2.1 Elek analizi deneyi.....	8
2.2.2 Aşınma (Los Angeles) deneyi	9
2.2.3 Özgül ağırlık deneyi	9
2.2.4 Hava tesirine karşı dayanıklılık deneyi	9
2.2.5 Cilalanma deneyi	10
2.2.6 Soyulma deneyi	10
2.2.7 Yassılık ve incelik-uzunluk tayini deneyi	10
2.3 Bitümlü Bağlayıcılar	11
2.3.1 Bitümün kimyasal yapısı	12
2.3.2 Bitümün reolojik davranışı	13
2.4 Bitümlü Bağlayıcılar Üzerinde Yapılan Deneyler	14
2.4.1 Penetrasyon deneyi	15
2.4.2 Yumuşama noktası deneyi.....	15
2.4.3 Düktilite deneyi	16
2.4.4 Parlama ve yanma noktası deneyi	16
2.4.5 Özgül ağırlık deneyi	17
2.4.6 Dönel viskozimetre (RV) deneyi.....	17
2.5 Bitümlü Sıcak Karışımlardan Beklenen Özellikler	18
2.5.1 Stabilité.....	19
2.5.2 Durabilite (Dayanıklılık)	19
2.5.3 Geçirimsizlik	19
2.5.4 İşlenebilirlik.....	19
2.5.5 Esneklik (Fleksibilite).....	20
2.5.6 Yorulmaya karşı direnç	20
2.5.7 Kaymaya karşı direnç	20
2.6 Bitümlü Sıcak Karışım Kaplamalarda Oluşan Bozulmalar	21
2.6.1 Deformasyonlar	21

2.6.1.1 Tekerlek izi oluşumu	21
2.6.1.2 Oturmalar ve Çökmeler	22
2.6.1.3 Ondülasyon ve Kabarmalar	23
2.6.2 Çatlaklar	23
2.6.2.1 Yorulma çatlakları	23
2.6.2.2 Düşük sıcaklık çatlakları	24
2.6.3 Kusma.....	25
2.7 Bitümlü Sıcak Karışımlarda Dizayn Yöntemleri.....	26
2.7.1 Superpave dizayn yöntemi	26
2.7.2 Marshall dizayn yöntemi	26
2.8 Bitümlü Sıcak Karışımlara Uygulanan Deneyler	27
2.8.1 Marshall stabilite ve akma deneyi	27
2.8.2 Kalıcı marshall stabilitesi (RMS) deneyi	28
2.8.3 Dolaylı çekme mukavemeti (ITS) deneyi.....	28
2.8.4 Dolaylı çekme rijitlik modülü (ITSM) deneyi.....	30
2.8.5 Modifiye Lottman deneyi (AASHTO T-283)	32
2.8.6 Sünme deneyi	34
2.8.7 Dolaylı çekme yorulma deneyi.....	38
3. BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIM MODİFİKASYONU	41
3.1 Modifikasyonun Amacı	41
3.2 Bitüm Katkı Maddeleri ve Katkılı Bitümlerden Beklenen Özellikler	42
3.3 Bitüm ve BSK'ların Modifikasyonu İçin Kullanılan Katkı Maddeleri	42
4. ATIKLAR VE LİTERATÜR ÇALIŞMALARI	43
4.1 Geri Dönüşüm	44
4.2 Atık Çeşitleri	45
4.2.1 Evsel atıklar	45
4.2.2 Tarımsal atıklar.....	46
4.2.3 Hayvansal atıklar	47
4.2.4 Ormansal atıklar	48
4.2.5 Kanalizasyon atıkları	48
4.2.6 Endüstriyel atıklar	49
4.2.6.1 Ferrokrom cürufu (FeCR).....	52
4.2.6.2 Geopolimer	54
4.3 Literatür Çalışmaları.....	55
5. MATERYAL VE METOT	63
5.1 Materyal.....	63
5.1.1 Agrega	63
5.1.2 Asfalt bağlayıcı.....	65
5.1.3 Ferrokrom cürufu (FeCR).....	66
5.1.4 Alkali aktivatör (AA)	67
5.2 Metot.....	68
5.2.1 FeCR katkılı bitümlü sıcak karışımların hazırlanması	68
5.2.2 Geopolimer katkılı bitümlü sıcak karışımların hazırlanması	69
6. DENEYSEL BULGULAR.....	72
6.1 Sıcak Karışım Numunelerinin Hazırlanması.....	72
6.2 Optimum Bitüm İçeriğinin Belirlenmesi	75
6.3 FeCR ve Geopolimer Katkılı BSK Numunelerinin Hazırlanması.....	81
6.4 Marshall Karışım Numunelerine Uygulanan Performans Deneyleri	84
6.4.1 Marshall stabilite ve akma deney sonuçları.....	85
6.4.2 Kalıcı marshall stabilitesi (RMS) deney sonuçları	88

6.4.3 Dolaylı çekme mukavemeti (ITS) ve Modifiye Lottman deney sonuçları	89
6.4.4 Dolaylı çekme rijitlik modülü (ITSM) deney sonuçları	95
6.4.5 Statik sünme deney sonuçları	96
6.4.6 Dinamik sünme deney sonuçları.....	100
6.4.7 Dolaylı çekme yorulma deney sonuçları	103
7. SONUÇLAR.....	118
KAYNAKLAR.....	121
ÖZGEÇMİŞ	129



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1: Ülkemizdeki karayolu ağı dağılımı (km).....	1
Çizelge 2.1: Agregalar üzerinde uygulanan deneyler	8
Çizelge 2.2: Geleneksel deneyler	15
Çizelge 3.1: Sıcak karışımlara eklenen çeşitli kimyasal katkı malzemelerinin kaplama üzerindeki olumlu etkileri	42
Çizelge 4.1: Karayolu yapımında kullanılabilecek endüstriyel atık malzemeler	50
Çizelge 5.1: Agreganın fiziksel özellikleri.....	64
Çizelge 5.2: Agreg a malzemesine ait gradasyon.	64
Çizelge 5.3: Saf bitümün özellikleri.....	66
Çizelge 5.4: FeCR' nin kimyasal özellikleri	67
Çizelge 5.5: Sodyum silikata ait özellikler.	68
Çizelge 5.6: Hazırlanan bütün karışım numunelerinin kodlamaları.	70
Çizelge 6.1: Optimum bağlayıcı içeriği için elde edilen tüm hesaplamalar.	78
Çizelge 6.2: OBİ belirlenmesinde kullanılmış olan sonuçlar.....	81
Çizelge 6.3: Kontrol karışım numunelerinin sonuçları.	81
Çizelge 6.4: Performans deneyleri için hazırlanan numune sayıları.....	85
Çizelge 6.5: Numunelerin özellikleri.	85
Çizelge 6.6: Numunelerin özellikleri.	88
Çizelge 6.7: Şartlandırılmamış numunelerin özellikleri.	90
Çizelge 6.8: Şartlandırılmış FeCR katkılı numunelere ait özellikler.	91
Çizelge 6.9: Şartlandırılmış geopolimer katkılı numunelere ait özellikler.	92
Çizelge 6.10: Numunelere ait fiziksel özellikler (25 °C).	95
Çizelge 6.11: Numunelere ait fiziksel özellikleri (40°C).	97
Çizelge 6.12: Numunelere ait fiziksel özellikleri (50°C).	99
Çizelge 6.13: Karışım numunelerinin fiziksel özellikleri.	101
Çizelge 6.14: Karışım numunelerinin özellikleri (3500N).	105
Çizelge 6.15: Karışım numunelerinin özellikleri (4000N).	105
Çizelge 6.16: Farklı gerilme seviyelerinde meydana gelen yorulma test sonuçları.....	108

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1: Esnek üstyapı kesiti.	2
Şekil 1.2: Atık malzemeler.....	3
Şekil 2.1: (a) Gradasyon tipleri (b) gradasyon biçimleri.....	6
Şekil 2.2: Eleme analizi deneyinde kullanılan elekler.	8
Şekil 2.3: Ham petrolün elde edilmesi ve ortaya çıkan ürünler	12
Şekil 2.4: Bitümün yapısı.....	13
Şekil 2.5: Bitümün farklı sıcaklık-zamana değişimi	14
Şekil 2.6: Belirli bir yük ve sıcaklık altındaki bitümde meydana gelen değişim.....	14
Şekil 2.7: (a) Su banyosunda bekletilen numuneler (b) penetrasyon cihazı.	15
Şekil 2.8: (a) Deney cihazı (b) halka yüzük içindeki bağlayıcı (c) bağlayıcının zemine değdiği an.	16
Şekil 2.9: Düktilite deneyi yapılan bağlayıcı.	16
Şekil 2.10: Deney ekipmanları.	17
Şekil 2.11: RV deney ekipmanları.	18
Şekil 2.12: Viskozite-sıcaklık grafiği.....	18
Şekil 2.13: Gerilme- yorulma ömrü ilişkisi	20
Şekil 2.14: Pürüzlülük.....	21
Şekil 2.15: Tekerlek izi.	22
Şekil 2.16: Çökmeye örnek.	22
Şekil 2.17: Ondülasyon örneği.....	23
Şekil 2.18: Yorulma çatlakları.	24
Şekil 2.19: Yol kaplamasında oluşan gerilmeler.....	24
Şekil 2.20: Kaplamadaki çatlağın büyümesi.....	25
Şekil 2.21: Düşük ısı çatlağı	25
Şekil 2.22: Kaplama üzerinde oluşan kasma	25
Şekil 2.23: (a) Su banyosunda bekletilen briket numuneleri (b) marshall deney cihazı	28
Şekil 2.24: ITS deneyinde yükleme durumu ve kırılan briket numunesi.....	29
Şekil 2.25: ITS deney cihazı.	30
Şekil 2.26: ITSM deneyi ve numune üzerinde oluşan deformasyon.	31
Şekil 2.27: ITSM deney düzeneği.....	32
Şekil 2.28: ITSM deneyine maruz bırakılan numune.	32
Şekil 2.29: Sünme deney düzeneği.	35
Şekil 2.30: Sünme deneyine maruz bırakılan briket numunesi.....	35
Şekil 2.31: Yük-zaman ve düşey deformasyon-zaman grafikleri.	37
Şekil 2.32: Toplam kalıcı şekil değiştirme- yükleme sayısı grafiği.....	37
Şekil 2.33: FN'nin tespit edilmesi.....	38
Şekil 2.34: Temsili deformasyon – yük tekrür sayısı grafiği.....	39
Şekil 2.35: Dolaylı çekme yorulma deney düzeneği.....	40
Şekil 2.36: (a) Deneye maruz bırakılan briket numunesi (b) kırılmış numune.....	40
Şekil 4.1: Atık çeşitleri.....	45
Şekil 4.2: Evsel atıklar.	46
Şekil 4.3: Tarımsal atık ürünü olan (a) mısır atıkları ve (b) buğday-arpa atıkları.	47
Şekil 4.4: Hayvansal atıklar.	47
Şekil 4.5: Ormansal atık ürünü olan (a) talaş (b) yonga.	48
Şekil 4.6: Kanalizasyon suyu ve atıkları.	49
Şekil 4.7: Endüstriyel atıkların geri kazanımının faydaları.	49
Şekil 4.8: Granül haldeki FeCR.	52

Şekil 4.9: FeCR' nin elde edilmesi.	53
Şekil 4.10: Davidovits'a göre geopolimerin oluşum yapısı	54
Şekil 5.1: Agregat.....	64
Şekil 5.2: Agregat gradasyon eğrisi.	65
Şekil 5.3: Saf bitüm (B50/70).	65
Şekil 5.4: FeCR' nin elde edilmesi.	66
Şekil 5.5: Ferrokrom cürufu (FeCR).....	67
Şekil 5.6: Sodyum silikat.	68
Şekil 5.7: Sodyum silikat (cam suyu) içeriği.	68
Şekil 5.8: (a) Karıştırma cihazı (b) briket numunelerinin bir kısmı.....	69
Şekil 5.9: Sıcak karışım numuneleri için akış şeması.	71
Şekil 6.1: (a) Agreganın etüvde ısıtılması (b) bitüm ve kalıpların etüvde ısıtılması.	72
Şekil 6.2: (a) Numunenin Marshall tokmağında sıkıştırılması (b) kalıpta bekletilmesi.	73
Şekil 6.3: (a) Numunenin krik o ile kalıptan çıkarılması (b) numunenin kumpas ile yüksekliğinin ölçülmesi.	74
Şekil 6.4: (a) Numunelerin arşiment terazisinde ağırlıklarının alınması (b) su banyosunda numunelerin bekletilmesi.....	74
Şekil 6.5: Numunelerin Marshall stabilite deneyine tabi tutulması.	75
Şekil 6.6: Elde edilen grafikler.....	80
Şekil 6.7: SEM görüntüleri.	83
Şekil 6.8: XRD deseni.....	83
Şekil 6.9: Hazırlanan BSK numunelerinin bir kısmı.	84
Şekil 6.10: Karışım numunelerinin stabilite değ erleri.	86
Şekil 6.11: Karışım numunelerinin akma değ erleri.	87
Şekil 6.12: Karışım numunelerinin MQ değ erleri.	88
Şekil 6.13: Tüm numunelerin RMS değ iş imleri.	89
Şekil 6.14: Karışım numunelerinin ITS _{kuru} değ iş imleri.	93
Şekil 6.15: Karışım numunelerinin ITS _{yaş} değ iş imleri.....	93
Şekil 6.16: Karışım numunelerinin ITSR değ erleri.	94
Şekil 6.17: ITSM değ erinin farklı katkı oranlarındaki değ iş imleri.....	96
Şekil 6.18: Numunelerin 40°C'deki toplam birim şek il değ iş tirme-zaman değ iş imleri.	97
Şekil 6.19: 40°C'deki sünme sertliği değ erinin katkı oranlarındaki değ iş imleri.	98
Şekil 6.20: Numunelerin 50°C'deki toplam birim şek il değ iş tirme-zaman değ iş imleri.	99
Şekil 6.21: 50°C'deki sünme sertliği değ erinin katkı oranlarındaki değ iş imleri.	99
Şekil 6.22: Saf ve FeCR katkılı numunelerin toplam deformasyon ilişk isi-yük tekrarı. ..	101
Şekil 6.23: Saf ve geopolimer katkılı numunelerin toplam deformasyon -yük tekrarı.	101
Şekil 6.24: Numunelere ait sünme sertliği değ iş imleri.	102
Şekil 6.25: Karışım numunelerine ait FN değ erleri.	103
Şekil 6.26: 3500N gerilme altında numunelere ait düş ey deformasyon- yük tekrar sayısı ilişk isi.	106
Şekil 6.27: 4000N gerilme altındaki ait düş ey deformasyon- yük tekrar sayısı değ iş imi.....	107
Şekil 6.28: Ni – katkı içeriği değ iş imi.	109
Şekil 6.29: Nf – katkı içeriği ilişk isi.	110
Şekil 6.30: Np – katkı içeriği değ iş imi.	111
Şekil 6.31: Nmaks – katkı içeriği değ iş imi.	112
Şekil 6.32: δi – katkı oranına göre değ iş imi.....	113
Şekil 6.33: δf – katkı içeriği ilişk isi.	114
Şekil 6.34: $\delta maks$ – katkı içeriği ilişk isi.	115
Şekil 6.35: r_p – katkı içeriği değ iş imi.	116

SEMBOLLER VE KISALTMALAR

BSK	: Bitümlü sıcak karışım
FeCR	: Ferrokrom cürufu
KGM	: Karayolları Genel Müdürlüğü
AASHTO	: American Association of State Highway and Transportation Officials
ASTM	: American Society for Testing Materials
PE	: Polietilen
PVC	: Polivinil klorid
SBR	: Styrene-butadiene-rubber
PP	: Polipropilen
PS	: Polisiren
SUPERPAVE	: Üstün performanslı asfalt kaplama
KTŞ	: Karayolu teknik şartnamesi
RV	: Dönel viskozimetre
AA	: Alkali aktivatör
ITS	: Dolaylı çekme mukavemeti
ITSR	: Dolaylı çekme mukavemeti oranı
ITSM	: Dolaylı çekme rijitlik modülü
G*	: Kompleks kayma modülü
δ	: Faz açısı
$G^*/\sin \delta$	: Tekerlek izi parametresi
$G^*.\sin \delta$	: Yorulma parametresi
Nf	: Yorulma ömrü

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

FERROKROM CÜRUFUNDAN ELDE EDİLEN GEOPOLİMERİN BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARIN PERFORMANSINA ETKİLERİ

Sena KOÇ

İnönü Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

129+XI sayfa

2024

Danışman: Doç. Dr. Tacettin GEÇKİL

Bu çalışmada dünyada ve ülkemizde yüksek oranlarda açığa çıkan, endüstriyel bir atık malzeme olan ferrokrom cürufundan (FeCR) elde edilen geopolimerin bitümlü sıcak karışımların (BSK) performansına etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla, ilk olarak, kırmataş kalker agregasının ve saf B 50/70 bitümün karakteristik özellikleri belirlenmiştir. Daha sonra, Marshall karışım tasarım yöntemi kullanılarak sıcak karışım numuneleri hazırlanmış ve bu numunelerin optimum bitüm içeriği (OBİ) tespit edilmiştir. OBİ oranı tespit edildikten sonra, bu oran esas alınarak sıcak karışımdaki filler oranı ağırlıkça %25, %50, %75 ve %100 oranlarında azaltılarak FeCR ilavesi yapılmış ve bu karışımlara ayrıca %8 oranında alkali aktivatör (AA) sodyum silikat eklenerek geopolimer katkılı karışım numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan tüm karışım numuneleri Marshall stabilite ve akma, statik ve dinamik sünme, dolaylı çekme rijitlik modülü (ITSM) ve dolaylı çekme yorulma deneylerine tabi tutulmuştur. Elde edilen test sonuçlarına göre, %75 geopolimer (bitüm+agrega+FeCR+AA) katkılı karışım numunelerinin stabilitesinin arttığı, kalıcı deformasyonlara karşı direncinin geliştiği ve yorulma ömrünün önemli oranda arttığı görülmüştür. Sonuç olarak, FeCR'nin BSK'larda filler yerine kullanılabileceği ve FeCR katkılı geopolimerlerin BSK'ların performans özelliklerinde iyileştirici bir etkiye sahip olabileceği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Endüstriyel atık, Ferrokrom cürufu, Marshall stabilite, ITSM, Kalıcı deformasyon.

ABSTRACT

MSc. Thesis

EFFECTS OF GEOPOLYMER OBTAINED FROM FERROCHROME SLAG ON THE PERFORMANCE OF BITUMINOUS HOT MIXES

Sena KOÇ

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

129+ XI page

2024

Supervisor: Doç. Dr. Tacettin GEÇKİL

In this study, the effects of geopolymer obtained from ferrochrome slag (FeCR), an industrial waste material that is released at high rates in the world and in our country, on the performance of bituminous hot mixtures (BSK) were investigated. For this purpose, firstly, the characteristic properties of crushed limestone aggregate and pure B 50/70 bitumen were determined. Then, hot mix samples were prepared using the Marshall mix design method and the optimum bitumen content (OBI) of these samples was determined. After the OBI ratio was determined, based on this ratio, the filler ratio in the hot mixture was reduced by 25%, 50%, 75% and 100% by weight and FeCR was added, and 8% alkaline activator (AA) sodium silicate was added to these mixtures and geopolymer-added mixture samples were prepared. All prepared mixture samples were subjected to Marshall stability and flow, static and dynamic creep, indirect tensile stiffness modulus (ITSM) and indirect tensile fatigue tests. According to the test results obtained, it was observed that the stability of the mixture samples with 75% geopolymer (bitumen+aggregate+ FeCR+AA) increased, their resistance to permanent deformations improved and their fatigue life increased significantly.

As a result, it has been determined that FeCR can be used instead of fillers in BSKs and FeCR-doped geopolymers can have an improving effect on the performance properties of BSKs.

Keywords: Industrial waste, Ferrochrome slag, Marshall stability, ITSM, Permanent deformation

1. GİRİŞ

Ulaştırma terimi, tarih boyunca insanların, hayvanların ve eşyaların faydalı olduğu düşünülen belirli bir amaca yönelik yer değiştirmeleri olarak ifade edilir [1]. Dünyada var olan topluluklardaki insanların birbirleri ile daha etkili bir iletişim kurmalarını sağlamak, işgücünün sadece belirli bir bölgede toplanmasının önüne geçmek amacıyla ulaştırma sistemlerine tarih boyunca ihtiyaç duyulmaktadır. Ulaştırma sistemleri, kırsal kesimlerdeki sosyal ve ekonomik büyümeyi hızlandırarak bölge halkının topluma daha kolay adapte olmasına da katkı sağlar. Ayrıca ulaştırma sistemlerinin kalitesi, yaygınlaşması ve gelişmesi, ekonomi ve toplumun modernleşmesi ile paraleldir. Özellikle son yıllarda ulaştırma sektöründe birçok yenilik ve geliştirme çalışmaları yapılmaktadır [2,3].

Ülkemizde özellikle karayolu ulaştırmasına Cumhuriyet döneminde ağırlık verilmeye başlanmış ve birçok bakımsız yol ağı, özverili bir çalışmayla hem mesafe hemde kalite açısından önemli ölçüde geliştirilmiştir [4]. Karayolu ulaştırmasının gelişmesinde, Türkiye'nin doğu ve batı arasında doğal köprü olması aynı zamanda coğrafi ve sosyo ekonomik konumu sebebiyle transit taşımacılığa uygun olması önemli rol oynamıştır [2-4].

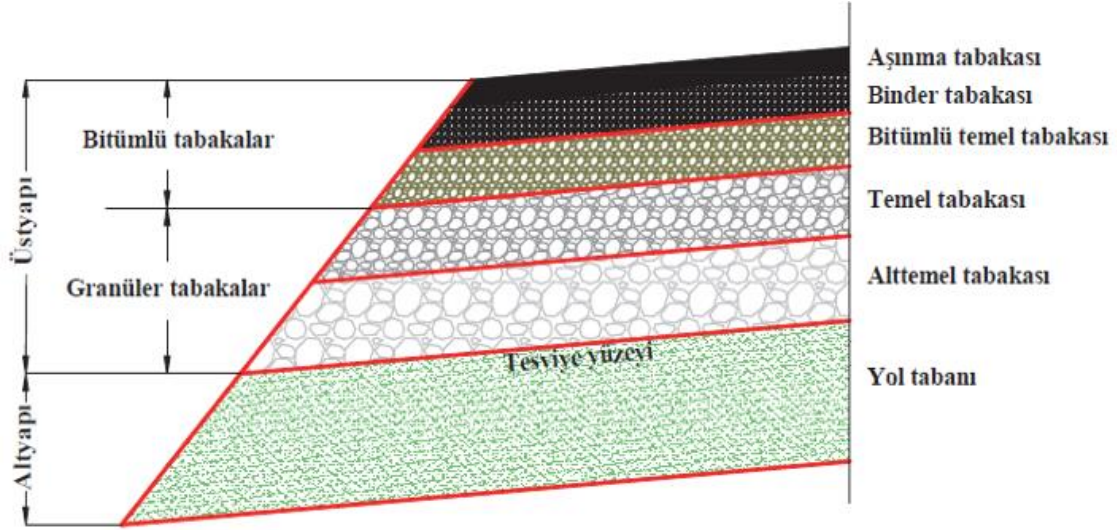
Karayolu Genel Müdürlüğü verilerine göre ülkemizde bulunan toplam karayolu uzunluğu 01.01.2024 tarihi itibarıyla Çizelge 1.1' de görüldüğü üzere 68.654 km'dir. Toplam karayolu ağının %95,3'ü (65,448 km) esnek üstyapı olarak tasarlanarak inşa edilmiştir [5].

Çizelge 1.1: Ülkemizdeki karayolu ağı dağılımı (km) [5].

Satış cinsine göre yol ağı (km)							
	Asfalt betonu	Sathi kaplama	Parke	Stabilize	Toprak	Diğer yollar	Toplam
Otoyol (*)	3.726	-	-	-	-	-	3.726
Devlet yolları	20.135	10.387	45	22	-	275	30.864
İl yolları	6.018	25.182	225	276	299	2.064	34.064
Toplam	29.879	35.569	270	298	299	2.339	68.654

Esnek üstyapılar genel olarak Şekil 1.1'deki gibi alt temel, temel ve kaplama tabakalarından meydana gelmektedir. Alt temel ve temel tabakaları, bozulmalara karşı direnç göstermek ve drenajı sağlamak gibi görevlerden sorumlu tabakalardır. Direkt olarak trafik yüklerine maruz kalan kaplama tabakası ise; yol üstyapısını suyun etkilerine karşı korumak, konforlu bir

sürüş sağlamak, iklim şartlarının ve trafiğin neden olduğu aşınma etkilerine karşı direnç göstermek gibi amaçlar doğrultusunda inşa edilmektedir. Esnek üstyapı kaplamaları sathi kaplama ve bitümlü sıcak karışım (BSK) olarak iki farklı şekilde uygulanmaktadır [6,7].



Şekil 1.1: Esnek üstyapı kesiti.

Esnek üstyapı kaplamalarında, iklim şartları ve sürekli artan trafik yüküyle orantılı olarak oluşan tekerlek izi, çatlama, soyulma gibi deformasyonları geciktirmek, kaplamanın performansını arttırmak, bakım-onarım ihtiyacını ve maliyetini düşürmek amacıyla dünya genelinde, bitümlü bağlayıcılara ya da karışımlara çeşitli katkı malzemeleri ilave edilerek modifiye bitümler ya da karışımlar elde edilmektedir [6,8].

Yol mühendisliğinde modifikasyon işlemi için polietilen (PE), polivinil klorid (PVC), styrene-butadiene-rubber (SBR), polipropilen (PP) ve polisiren (PS) gibi çeşitli katkı malzemeleri sıklıkla kullanılmıştır [6]. Ancak bu tür katkı malzemeleri ticari malzeme olduğu için temin edilmesi maliyeti attırmaktadır. Bu yüzden son yıllarda bilim insanları bu malzemelere alternatif malzemeler araştırmaktadır. Bu amaçla özellikle dikkat çeken alternatif bir malzeme olan “atık malzemeler” kullanılmaya başlanmıştır.

Atık malzemeler (Şekil 1.2) insanların çeşitli sektörlerdeki faaliyetleri sonucu oluşan, hiçbir kalıntı değeri olmayan bir yan ürün olarak tanımlanmaktadır [9]. Atık malzemeleri tarımsal atıklar (patates, kenevir vb.), ormansal atıklar (odun vb.), endüstriyel atıklar (cüruf atıkları, metaller, artık yağlar vb.), hayvansal atıklar (at, koyun, keçi gibi hayvanların gübreleri vb.), evsel atıklar (kağıt, poşet, cam vb.) ve kanalizasyon atıkları olarak altı gruba ayırmak mümkündür.



Şekil 1.2: Atık malzemeler.

Ülkelerin sosyo-ekonomik gelişmeleriyle orantılı olarak önemli bir sorun haline gelen atık malzemelerin tekrar kullanılması ya da yok edilmesi büyük bir sorun haline gelmektedir [10]. Bu malzemelerin bertaraf edilmemesi durumunda ciddi çevresel etkiler meydana getireceği öngörülmektedir. Bu nedenle, atık malzemelerin dönüştürülerek yeni bir malzeme elde edilmesi ile ‘yeniden kazanım’ veya ‘geri dönüşüm’ işlemiyle doğaya verilen zararı minimum düzeye indirmek mümkündür. Diğer bir deyişle geri dönüşüm, kullanım dışında kalan ya da herhangi bir amaç için kullanılmış olan malzemelerin farklı yöntemler uygulanarak yeniden hammadde veya katkı maddesi olarak kullanılması şeklinde ifade edilebilir [11].

Yol mühendisliğinde, geri dönüşüme verilen önemin artmasıyla birlikte bilim insanları bitümlü bağlayıcıya ya da karışıma çeşitli atık malzemelerini katkı malzemesi olarak ilave ederek karayolunun performans özellikleri, bakım-onarım maliyeti, sürüş konforu gibi çeşitli özelliklerini iyileştirmek amacıyla kullanmaktadır.

1.1 Tezin Amacı ve Kapsamı

Bu tez çalışmasında, ferrokrom cürufudan elde edilen geopolimerin bitümlü sıcak karışımların (BSK) performansına etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla yapılan tez çalışması toplam yedi kısımdan oluşturulmuştur. Bu bölümler hakkında bilgilerin özetleri sırasıyla aşağıda verilmiştir.

Çalışmanın ikinci bölümünde, ilk olarak BSK’ da kullanılan agregaların özellikleri ve agregalara uygulanan deneyler tanımlanmıştır. Daha sonra, bitümlü bağlayıcı tanımlanarak

bitümlü bağlayıcılar üzerinde uygulanan geleneksel ve reolojik deneyler tanımlanmıştır. Ardından, BSK’da meydana gelen bozulmalar, beklenen özellikler, uygulanan deneyler ve dizayn yöntemleri detaylı bir şekilde izah edilmiştir.

Üçüncü bölümde, bitümlü sıcak karışımların modifikasyonu, bitüm ve BSK’ların modifikasyonu için kullanılan katkı malzemelerinden ve bu katkı malzemelerinden beklenen özelliklerden bahsedilmiştir.

Dördüncü bölümde, atıklar ve atık çeşitleri hakkında genel bilgiler verilmiştir. Aynı zamanda ferrokrom cürufunun çeşitli alanlardaki kullanımına dair geniş ölçekli literatür araştırmalarından bahsedilmiştir.

Beşinci bölümde, materyal ve metot kısmına geçilmiş olup, karışımda kullanılacak olan bağlayıcının fiziksel özellikleri belirlenmiştir. BSK’da kullanılacak olan agrega ve karışımın oranlarından bahsedilmiştir. Daha sonra, Marshall karışım dizaynında kullanılacak olan agreganın genel özellikleri ve gradasyonu belirlenerek tasarım aşamasına geçilmiştir.

Altıncı bölümde, Marshall karışım dizaynına göre, kullanılacak bitümün optimum içeriği belirlenerek, saf, FeCR ve geopolimer katkılı numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan bu numunelere Marshall stabilite ve akma, dinamik ve statik sünme, ITSM ve dolaylı çekme yorulma deneyleri yapılmıştır.

Yedinci bölümde ise elde edilen tüm deneysel çalışma sonuçları ve değerlendirmeleri özetlenmiş ve tez çalışması tamamlanmıştır.

2. BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLAR

Günümüzde ülkemizde karayolu kaplamalarının yapımı için en yaygın kullanılan kaplama türü esnek kaplamalardır. Esnek üstyapılar, birçok farklı tipte üretilebilmeleri, daha kolay ve daha hızlı üretilmeleri, daha ekonomik olmaları ve her seviyedeki trafiği barındırabilmeleri nedeniyle daha popülerdir. Esnek kaplama; alt temel, temel ve kaplama tabakasından oluşur. Esnek kaplamalar üretmek için tanımlanmış bir agrega gradasyonu ve uygun oranda asfalt bağlayıcı kullanılır. Bitümlü sıcak karışımı (BSK), bir asfalt plentinde 160 °C 'ye ısıtılmış agrega ile asfaltın karıştırılmasıyla elde edilir. Ortaya çıkan karışımda agrega kullanımı ağırlıkça %93-95, bitüm kullanımı ise %5-7'dir [6,12-14]. BSK ile inşa edilen kaplamalarda, kaplamanın performansını direkt olarak etkileyen bitümün ve agreganın fiziksel özelliklerinin iyi bilinmesi gerekmektedir. Sıcak karışımların hacimce %13-15'ini, ağırlıkça %5-7'sini meydana getiren bitümler, agregalar ile birleştiğinde birbirine bağlanarak düzgün kaplama yüzeyi oluşturur. Aynı zamanda konforlu bir sürüş sağlar ve karışım içerisindeki boşlukları doldurup, geçirimsizliği sağlamaktadır [13].

2.1 Agregalar

Ağırlıkça %93-95 oranında agrega içeren BSK'lardaki agrega; kırmataş, akıntı, cüruf ve atıkların meydana getirdiği taneli bir malzemedir. Kullanılacak olan agregaların mekanik özellikleri kaplama tabakasının performans özelliklerini geniş ölçüde etkiler. Karışım içerisinde kullanılan agregaların fiziksel özelliklerinin bilinmesi, kaplamanın yapısıyla alakalı kapsamlı bilgiler sağlayabilir. Agreganın boyutunu, mineral yapısını, şeklini, yüzeyini, gözenekliliğini, gradasyonunu, özgül ağırlığını, yüzey alanını ve boşluk oranını bilmek, agreganın yapısının karışıma uygun olup olmadığı konusunda fikir verir [12].

2.1.1 Agregaların özellikleri

Agregaların fiziksel niteliklerini belirlemek için bir takım sınıflandırmalar yapılmıştır. Bu sınıflandırmalar agreganın boyut, şekil, biçim ve gradasyon gibi özellikler hakkında bilgi vermektedir. Bununla birlikte bu gruplandırmalara bakılarak agreganın uygunluğu belirlenir [12,15].

2.1.1.1 Mineralojik yapı

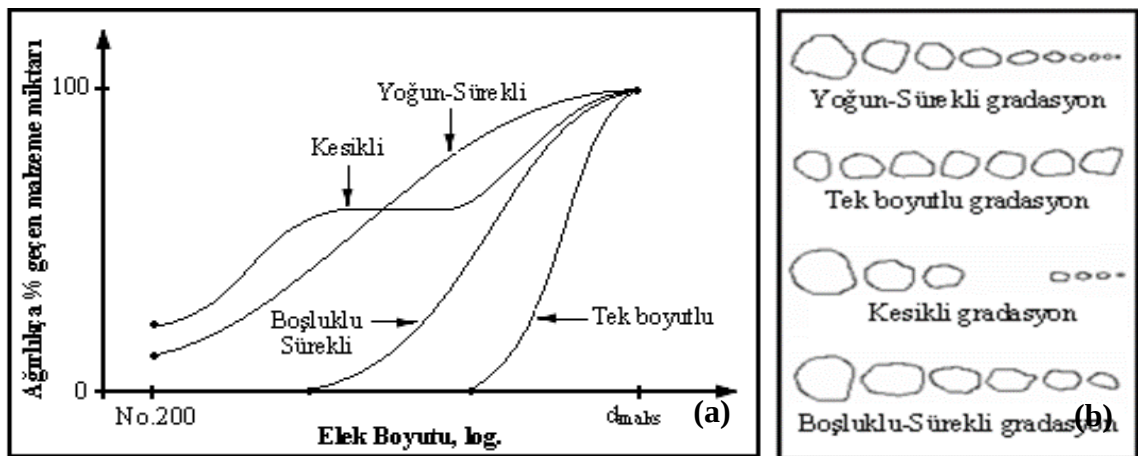
Agregalar çoğunlukla suni taş, kırmataş ve dere malzemesi olarak temin edilmektedir. Kum ve çakıl karışımından oluşan dere malzemesi, olumsuz özellikleri nedeniyle, kaplama uygulaması için sadece konkasörler yardımıyla kırılarak kırma çakıl ve kırma kum olarak kullanılabilir [12].

2.1.1.2 Boyut sınıflandırması

Agregalar kendi içinde dane büyüklükleri baz alınarak, kaba agreg, ince agreg ve mineral filler olarak üç sınıfa ayrılmaktadır. İri agreg yani 4,75mm elek üstünde kalan, ince agreg yani 4,75mm elekten geçen ve 0,075mm elek üstünde kalan agregadır. Filler yani pudra formdaki malzeme ise 0,075mm elekten geçen malzeme olarak adlandırılmaktadır [6,8].

2.1.1.3 Gradasyon

Agrega karışımını oluşturan danelerin boyutlarına göre dağılımının gösterildiği sınıflandırma biçimine gradasyon denir. Belirli bir karışımdaki agreg gradasyonunda maksimum dane boyutu arttığında işlenebilirlik ve sıkışma güçleşmektedir. Stabilite ve yoğunluk yükselirken gereken bağlayıcı miktarı azalır. Agreganın gradasyon açısından yoğun-sürekli, boşluklu-sürekli, kesikli ve tek boyutlu şeklinde dört kategorisi vardır. Agreganın gradasyon türleri Şekil 2.1'de gösterildiği üzere elek analizi grafiğinin çizilmesiyle kolaylıkla anlaşılabilir ve her gradasyon tipinin farklı özelliklere sahip olduğu görülür [6,8].



Şekil 2.1: (a) Gradasyon tipleri (b) gradasyon biçimleri [6].

Yoğun-sürekli gradasyona sahip agregalar, az miktarda boşluk ve yüksek yoğunluk içermektedir. Bu gradasyon tipi karışımların yoğunluğunu arttırmakla beraber geçirimsizliğin de azalmasına sebep olmaktadır. Yoğun-sürekli gradasyon grubuna ait agregalar BSK’larda çoğunlukla tercih edilen gradasyon sınıfıdır. Boşluklu-sürekli gradasyon, ince agrega içermez ve bu yüzden agrega karışımında boşluk miktarı baya fazladır. Bu agrega sınıfı drenajda ve filtre yerine kullanılabilir. Kesikli gradasyon, belli bir kesitteki dane çaplarını içermediğinden boşluk miktarı baya fazladır. Çoğunlukla taş mastik asfalt karayolu kaplama türlerinde tercih edilmektedir. Tek boyutlu gradasyon ise neredeyse aynı boyuttaki agregalardan meydana gelir. Genellikle sathi kaplama gibi daha düşük standartlı yol kaplamalarında kullanılmaktadır [6,15].

2.1.1.4 Porozite

Bitümün agrega karışımında tamamen emilmesi için karışımın belli bir poroziteye sahip agrega danelerinden oluşması gerekir. Yeteri kadar poroziteye sahip olan agregalar, stabilitenin artmasını ve soyulmanın azalmasını sağlar. Fakat yüksek poroziteye sahip ise düşük stabilite ve bitümde terlemeye neden olur [13].

2.1.1.5 Boşluk oranı ve yüzey alanı

Agrega danelerinin tüm yüzeylerinin alanları toplamı ve danelerin arasında olan boşluklu alanların toplamı karışımların sahip olduğu tüm özelliklere doğrudan etki eden etmenlerdir. Gradasyon ve maksimum dane çapı, boşluk oranı ve yüzey alanlarının toplamını doğrudan etkiler [12].

2.1.1.6 Biçim ve yüzey yapısı

Agregaların yüzeyi, cilalılıkla ve pürüzlülük alakalıdır. Agraga danelerinde pürüzlülük oranı arttığında işlenebilirlik yüzdesi azalmaktadır. Bundan dolayı cilalı agregalar BSK kaplamalarda kullanımı uygun değildir.

Dane şekilleri, karışımın yoğunluğunu, işlenebilirliğini, kayma mukavemetini ve stabilitesini etkiler. Dane şekli; yuvarlak, ince, uzun köşeli, yassı ve düzensiz olabilmektedir. Yuvarlak şekle sahip agregalar işlenebilirlik yönünden köşeli agregalardan daha iyi olsa da stabilite açısından dirençli değildir [12,13].

2.2 Agregalar Üzerinde Yapılan Deneyler

Bitümlü sıcak karışımlarda seçilen agregaların karışımda kullanılmaya elverişli olup, olmadığını belirlemek için Çizelge 2.1’de belirtilen birtakım deneyler yapılmaktadır. Bu deneyler; özgül ağırlık, Los Angeles (aşınma), dane boyutu, hava ve su tesirlerine karşı dayanıklılık, yassılık indekssidir [15].

Çizelge 2.1: Agregalar üzerinde uygulanan deneyler [15].

Agrega deneyleri	Aşınma	Binder	Bitümlü temel	Sathi kaplama	Taş mastik asfalt
Aşınma, maks %	30	35	35	30	25
Sağlamlık, (MgSO4) maks %	16	18	18	18	14
Soyulma Mukavemeti, min %	50	50	50	50	60
Yapışma, maks %	-	-	-	12	-
Cilalanma Değeri, min	50	-	-	52	50
Kırılmışlık, min %	100	100	100	80	-
Yassılık İndeksi, maks %	30	35	35	25	25
Su Absorbsiyonu, maks %	2	2.5	2.5	2.5	2
Metilen Mavisi, maks %	1.5	2.5	1.5	2	1.5

2.2.1 Elek analizi deneyi

Farklı büyüklükteki danelerden oluşan agregaların karışımdaki dağılımının tayini için yapılan bir deneydir. Elekler, elek çapı artacak şekilde sıralı olarak aşağıdan yukarıya doğru dizilir. Daha sonra farklı dane boyutlarına sahip agregaya yığını en üstteki eleğe bırakılır. Sarsma aletinde veya el kuvveti uygulanarak, elekler en az iki dakika sarsılır. Bütün eleklerin üstünde kalan agregalar tartılır ve toplam agregaya kütleline göre yüzdesi hesaplanır. Agreganın granülometri eğrisi çizilir [13]. Şekil 2.2’de elek analizi deneyi için kullanılan elekler verilmiştir.



Şekil 2.2: Elek analizi deneyinde kullanılan elekler.

2.2.2 Aşınma (Los Angeles) deneyi

Agrega danelerini aşınmaya karşı gösterdiği direnci ölçmek için yapılmaktadır. Deneyde kullanılan agreganın maksimum dane boyutuna göre 11 tane bilye ve 1250, 2500 veya 5000 gr. malzeme silindir çelik bir tambur içine bırakılır. Tambur 500 ya da 1000 devir yatay eksen etrafında döndürülür. Daha sonra tamburdan çıkartılan malzeme 1,7 mm.'den daha geniş delikli eleklerden elenir. Eleğin üstünde kalmış olan malzeme yıkanıp kurutulur. Agregada meydana gelen aşınma oranının tayini için kayıp malzeme miktarı ilk ağırlığa bölünür [8]. Bitümlü sıcak karışımlardaki agregadaki aşınma oranı maksimum %30 olmalıdır [13].

2.2.3 Özgül ağırlık deneyi

Agregaların hacim tanımına göre üç adet özgül ağırlık hesabı bulunmaktadır. Bunlar; doymuş kuru yüzey özgül ağırlık (SG_{DKY}), zahiri özgül ağırlık (SG_z) ve hacim özgül ağırlık (SG_H)'dır.

Agrega danelerinde havayla teması bulunan boşluklar (su absorbe edebilen) ve hava ile teması bulunmayan katı hacminin içerisinde boşluklar (su absorbe edemeyen) bulunmaktadır. Hava ile temas halinde olan boşluklara su dolduğu zaman, dolan suyun ağırlığı kadar agregada danesinin ağırlığında artış olur. Böylece agregada daneleri iki tip ağırlık ve üç tip hacim ağırlığına sahip olurlar. Denklem 2.1, 2.2 ve 2.3 yardımı ile agregada danelerinin özgül ağırlıkları hesaplanabilmektedir. Denklem 2.4 yardımı ile de agregada danelerindeki su absorpsiyonu hesaplanır [8].

$$SG_z = (\text{Kuru agregada ağırlığı}) / (\text{Katı ve geçirgen olmayan boşlukların hacmi}) \quad (2.1)$$

$$SG_H = (\text{Kuru agregada ağırlığı}) / (\text{Tüm hacim}) \quad (2.2)$$

$$SG_{DKY} = (\text{Doymuş kuru yüzey ağırlığı}) / (\text{Tüm hacim}) \quad (2.3)$$

$$\% \text{ Absorpsiyon (Su Emme)} = [(B-A) / A] \times 100 \quad (2.4)$$

A: Agregaların etüvde kurutulduktan sonraki ağırlığı

B: 24 saat su içinde bekletilen agreganın kuru yüzey doymuş ağırlığı.

2.2.4 Hava tesirine karşı dayanıklılık deneyi

Bu deney, agregaların havanın etki altında donma ve çözölmeye karşı direncini belirlemek amacıyla yapılır. Etüvde ön kurutmaya tabi tutulan numuneler, magnezyum sülfat ($MgSO_4$) çözeltisine daldırılarak oda sıcaklığında 16-18 saat bekletilir. Bu süre sonunda numuneler

çözelti içerisinde çıkarılıp 15 dakika kadar süzölmeye bırakılır. Daha sonra etüvde 110°C’de sabit bir sıcaklığa ulaşınca dek fırınlanır. Fırınlanma prosesi 5 kere tekrar eder. 5. Devir bittiğinde fırından alınan agregalar soğütularak, yıkanır. Ardından hepsi kurutulur. Daha sonra eleme işlemi yapılır ve donma kaybı değeri belirlenir. Numunedeki değışikliklerin doğal koşullar altında yaklaşık 500 donma ve çözölme olayına eş değeri olduğu varsayılır [13].

2.2.5 Cilalanma deneyi

Trafik yükü altında agregaların taşıt lastikleriyle sürtünmesi ve aşınması sonucunda cilalanması oranının belirlenmesi için yapılan bir deneydir. Cilalanma cihazının alt tekerleğine 14 tane numune sabitlenir. Cihazın üst tekerinin agregalara 6 saat süreyle temas halinde olması gerekir. Tekerlek ve agregalar arasına da ince aşındırıcı maddeler ilave edilir. Deney sonunda belirlenen cilalanma miktarı, trafiğin yoğun olduğu yollarda birkaç ayda, trafiğin az olduğu yollarda ise birkaç yılda elde edilebilecek aşınmaya eşdeğer olduğunu ortaya çıkarır. Deneyde bulunan kayma direnci değeri, başlangıçtaki kayma direnci değeri oranlanmasıyla cilalanma katsayısı değeri belirlenir [13].

Aşınma tabakasında kullanılan agregaların sıcak karışım kaplamalarda, cilalanma katsayısının minimum %50 değeriinde olması beklenmektedir [16].

2.2.6 Soyulma deneyi

Soyulma; agrega üzerindeki bağlayıcının, trafik ve su etkisiyle ayrışması olarak tanımlanmaktadır. KGM teknik şartnamesine bağlı kalınarak yapılan bu deneyde agregaların soyulmaya karşı direncinin belirlenmesi amacıyla yapılır. Öncelikler belli miktarda agrega alınarak yıkanır ve sonra etüvde kurutulur. Kurutulan malzemeye seçilen bağlayıcı ilave edilir. Malzemelerin tamamı karışınca kadar karıştırılır. Hazırlana bu karışım 24 saat süresince etüvde 60 °C’de bekletilir. Karışım daha sonra ısıtılır ve daha büyük bir kaba aktarılır. Tekrardan 24 saat 60 °C sıcaklıkta tutulur. Bu işlem sonunda soyulmamış yüzeyin toplam yüzeye oranı hesaplanarak soyulmaya karşı direnç tespit edilir [13]. Aşınma tabakasında bu oranın en az %50 olması gerekmektedir [15].

2.2.7 Yassılık ve incelik-uzunluk tayini deneyi

Yassı ve uzun boyutlu agregalar yük altında daha kolay kırılır. Bu da BSK’ın agregasının gradasyonunda bozulmalar meydana getirir ve mukavemetini zayıflatır. Bu sebeple agrega

danelerinin yassı, ince ve uzun şekillerde olması istenmez. Bu yüzden farklı şekillerdeki agregaların tayini için yassılık indeksi deney cihazı kullanılmaktadır. Yassı ve ince uzun daneli agregaların ebatı belirlenirken, en büyük dane ebatının en küçük dane ebatına oranlanır. Eğer agregadaki bu oran 5'ten fazla ise bu gruba girer [12].

2.3 Bitümlü Bağlayıcılar

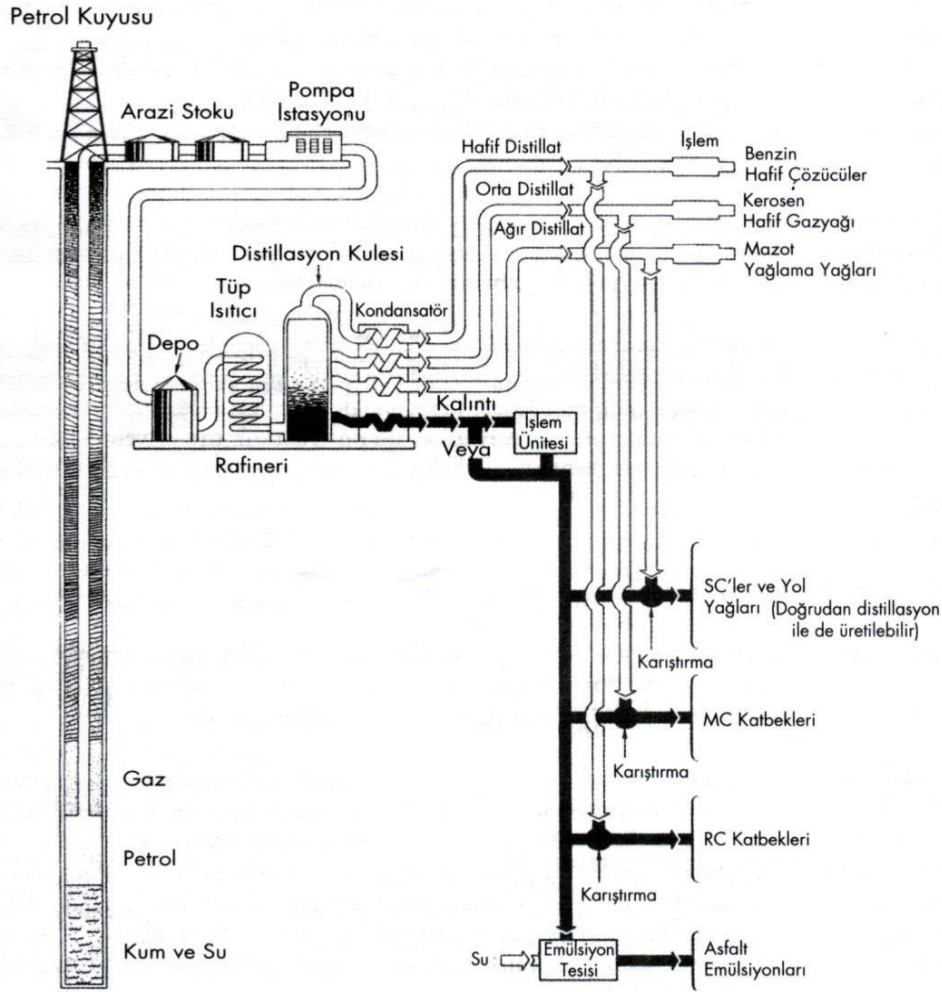
Bağlayıcılar, BSK'ların hacimce %13-15'ini oluşturur. Bitümlü bağlayıcılar, agrega daneleri arasına girerek onları birbirine bağlamaya çalışır ve trafik yükü altında kaplamanın dağılmasını önlemekle görevlidir. Böylelikle sürüş konforu elde edilir. Kaplamada yüksek stabilite ve geçirimsizlik kohezyon ile sağlanır [8,16].

Bitüm, esasında asfaltlar, asfaltitler, ziftler ve katranlar gibi büyük moleküllere sahip ağır hidrokarbonlardan meydana gelir. Doğal veya yapay, siyah veya koyu renkli, katı, yarıkatı veya viskoz bağlayıcı madde olarak tanımlanır. Bitümlü bağlayıcılar katranlar ve asfaltlar olmak üzere iki sınıfa ayrılmaktadır [6].

Asfalt, ana bileşeni bitüm olan, koyu kahve ile siyah arasında bir renge sahip, doğal kökenli ya da petrolün damıtılması sonucu elde edilmektedir. Esnek kaplamalarda; “Asfalt”, “asfalt çimentosu”, “bitüm” ve “asfalt bağlayıcı” gibi terimler aynı anlamda kullanılmaktadır [6,15]. Çıkarılma şekline göre asfaltlar iki sınıfa ayrılır. Bunlar; doğal ve yapay asfaltlardır [13].

Doğal asfaltlar; doğada çoğunlukla minerallerle karışık olarak bulunurlar. Doğal asfaltların kullanılabilmesi için bazı aşamalara uğraması gerekmektedir. Doğal asfaltlara örnek olarak göl asfaltı ve kaya asfaltı verilebilir [6,14].

Ham petrolün damıtılması (Şekil 2.3) sonucu yapay asfaltlar elde edilir. Damıtma işlemi sırasında, uçucu maddeler damıtma kulesinin tavan bölümünden çıkar ve yoğunlaştırılarak soğutucular tarafından ayrılır. Bu sayede hafif ürünler olduğu gibi, daha az uçucu ürünler de ara büyüklükteki ürünleri oluşturur. En ağır şekilde uçanlar ağır ürünleri meydana getirir. Diğer kalıntılar ise kulenin dip kısmında biriktirilmeye bırakılır. Bu sistemle saf petrol; benzin, ağır kalıntı maddeleri, dizel yağları, gaz yağı, ve yağlama yağları olarak beş farklı gruba ayrılır [13,14]. Oluşan ürünler istenildiğinde farklı petrol ürünleri elde etmek için yeniden damıtılır.

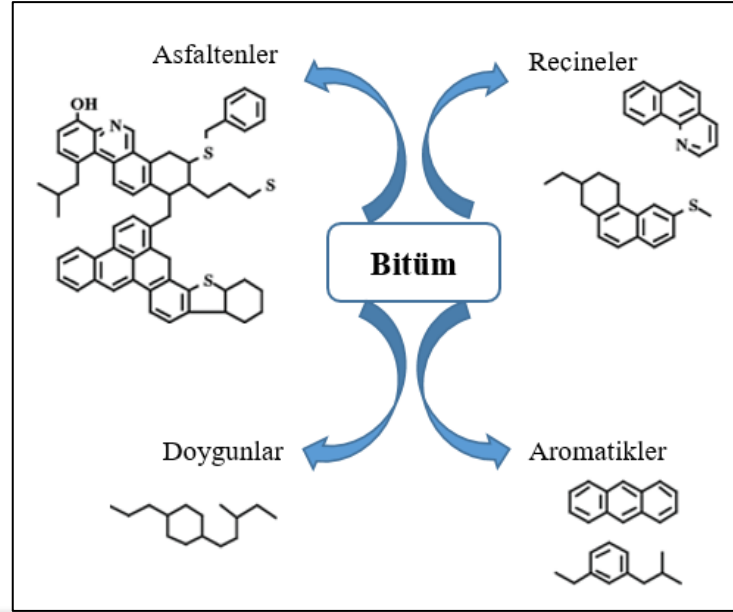


Şekil 2.3: Ham petrolün elde edilmesi ve ortaya çıkan ürünler [8].

Katranlar, petrol ürünleri kullanılmadan önce kömür ürünleri olan ve en yaygın kullanılan bitümlerdir. Katranlar kömürün ya da odunun kapalı bir sistem içinde kuru bir biçimde damıtma işlemine tabi tutulması sonucu elde edilir [7].

2.3.1 Bitümün kimyasal yapısı

Bitüm oldukça karışık bir kimyasal yapıya sahiptir (Şekil 2.4). Bu özelliğinden dolayı kimyasal testleri epey zahmetlidir. Ancak bu testler sonucunda oldukça fazla veriye ulaşılmaktadır. Bitümün yapısı asfaltenler ve maltenler olmak üzere iki ana bileşenden oluşur. Maltenler; doygunlar, aromatikler ve reçineler olarak üç alt gruba ayrılmaktadır [6,13].



Şekil 2.4: Bitümün yapısı.

Asfaltenerler, genellikle yüksek molekül ağırlığına ve elektrikselle yüklerle sahip (polar) yapılardır. Bitümdeki asfaltener miktarı bitümün reolojik özellikleri üzerinde çok önemli rol oynamaktadır. Bitümdeki asfaltener oranının yükselmesiyle daha yüksek yumuşama noktasına ve daha düşük penetrasyona sahip yüksek viskoziteli bitüm elde edilebilmektedir. Ayrıca bitüm içeriğinin % 5-25'ini asfaltenerlerden oluşmaktadır [14,16].

Bitümün n-heptanda çözülen kısmı olan maltenler; reçineler, aromatikler ve doyunlar olmak üzere üç sınıfa ayrılmaktadır. Reçineler n-heptan içinde çözünen yapılardır. Genellikle katı veya yarı katı olan reçineler koyu kahve renkte ve oldukça yüksek elektrikselle bir yüke sahiptir. Bu yüzden reçineler yüksek yapışma gücüne sahiptirler [14].

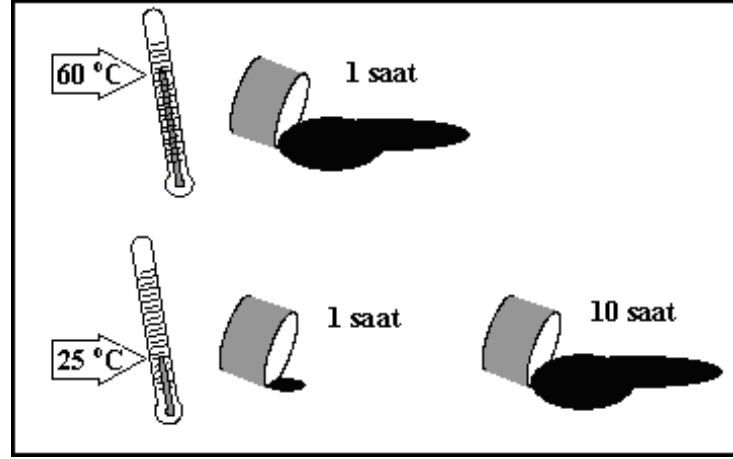
Aromatikler, bitüm içeriğinin %40-65'ini oluşturan viskoz sıvılardır. Koyu kahverengine sahip, bitümde en az moleküler ağırlığı olan naftenik aromatik bileşenlerden meydana gelmektedir [14].

Doygunlar ise genellikle saman rengi ya da beyaz renkli, parafinik olmakla birlikte naftenik yağ halkalarını da içerirler. Bitüm içeriğinin % 5-20'sini meydana getirirler [13,14].

2.3.2 Bitümün reolojik davranışı

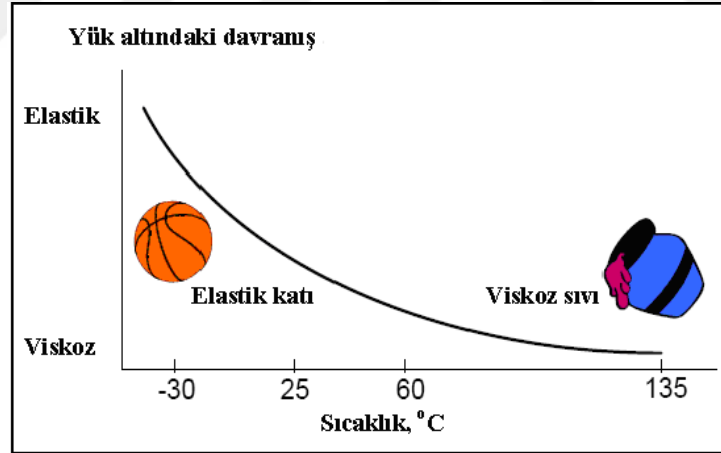
Bitüm visko-elastik bir davranışa sahip termo-plastik bir malzemedir. Trafik yükleri altında gelen yükün zamanına, şiddetine ve sıcaklığına göre değişken davranışlar gösterebilir.

Şekil 2.5'de farklı sıcaklıklar altında ve farklı zamanlardaki bitüme ait değişimler verilmiştir.



Şekil 2.5: Bitümün farklı sıcaklık-zamana değişimi [6].

Şekil 2.5 incelendiğinde, bağlayıcının 60 °C’de 1 saatte göstermiş olduğu akışkanlık ile 25 °C’de 10 saatte gösterdiği akışkanlık birbirinden oldukça farklıdır. Bu durum yükleme süresin ve sıcaklık arasında benzer bir bağlantı olduğunu göstermektedir. Bu tarz maddeler az yüklemeye maruz kaldığında viskoz, orta yük hızında orta elastik, yüksek yüklemeye ise elastik davranış sergilemektedir. Bu nedenle yükleme süresi ve sıcaklık karışımının rijitlik özelliğiyle direkt olarak bağlantılıdır (Şekil 2.6) [6,8].



Şekil 2.6: Belirli bir yük ve sıcaklık altındaki bitümde meydana gelen değişim [6].

2.4 Bitümlü Bağlayıcılar Üzerinde Yapılan Deneyler

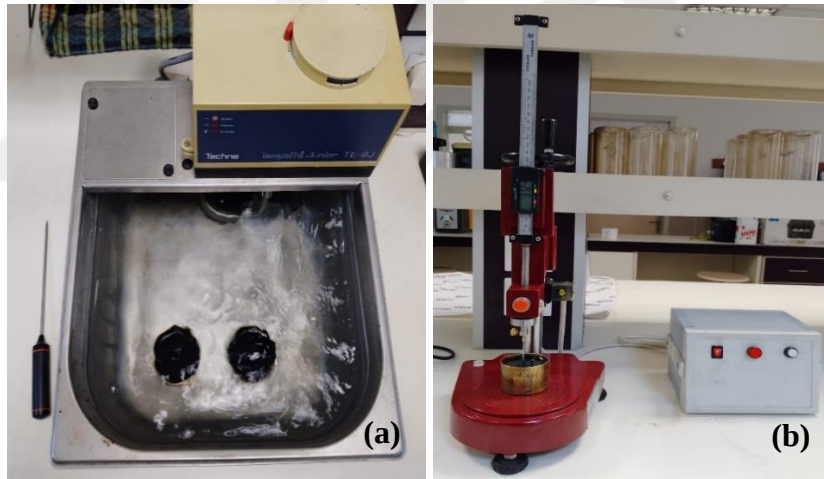
Esnek yol kaplamasında kullanılan bitümlü bağlayıcıların mekanik özelliklerinin tayini için geleneksel deneyler uygulanmaktadır. Geleneksel bağlayıcı deneyleri Çizelge 2.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 2.2: Geleneksel deneyler [6].

Özellik	Koşul	Standart
Penetrasyon	25 °C, 5sn, 100gr	ASTM D5 - TS EN 1426
Yumuşama noktası	-	ASTM D36 - EN 1427
Düktilite	25 °C, 5cm/dak	ASTM D113 - TS 119
Parlama noktası	-	ASTM D92
Özgül ağırlık	25 °C	ASTM D70 - TS 1087
Dönel viskozimetre(RV)	135-165°C	ASTM D4402

2.4.1 Penetrasyon deneyi

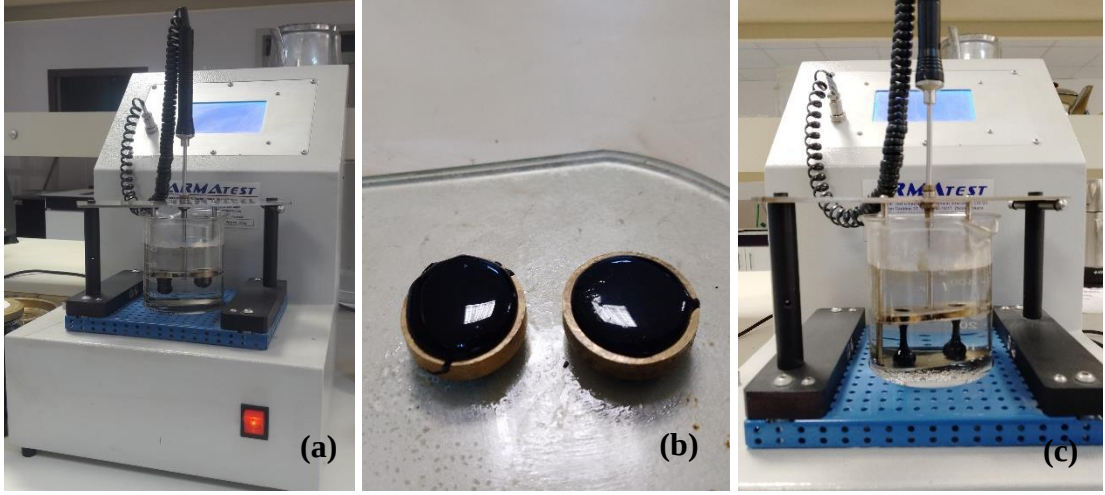
Bu deney, bitümlü bağlayıcının kıvamını ya da başka bir ifadeyle sertlik derecesini belirlemek amacıyla yapılır. Penetrasyon cihazı, 100 gr ağırlığında olan bir iğne, 25 °C’de 5 saniyede bağlayıcının içinde indiği dikey uzaklık şeklinde ifade edilir. Deneyin birimi 10⁻¹ mm’ dir. Bağlayıcının penetrasyon değeri kıvamlilik değeri arasında ters bir orantı vardır [8]. Şekil 2.7’de su banyosunda bekletilen numuneler ve penetrasyon cihazı gösterilmiştir.



Şekil 2.7: (a) Su banyosunda bekletilen numuneler (b) penetrasyon cihazı.

2.4.2 Yumuşama noktası deneyi

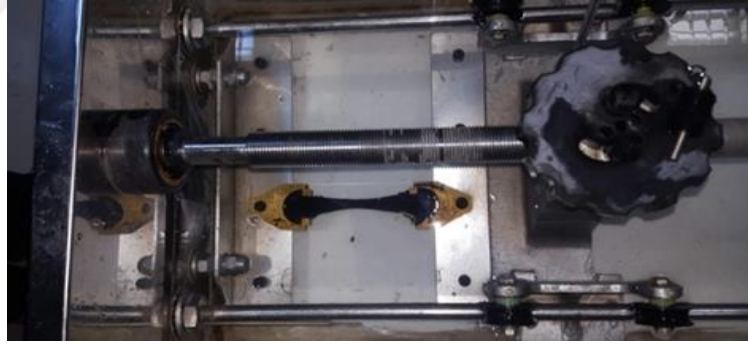
Bu deney, bitümün hava sıcaklığına gösterdiği hassasiyeti belirlemek amacıyla yapılır. Deneyde, cihazdaki (Şekil 2.8a) iki yuvarlak halka yüzük içerisine bitüm taşacak şekilde doldurulur (Şekil 2.8b). Bir süre soğutulmaya bırakıldıktan sonra halkanın üzerinden kalan bitümün yüzeyi bir bıçak yardımıyla kesilir. Ve deney cihazına düzgün bir şekilde bırakılır. Halkaların üstüne birer tane bilye bırakılır. Deneyde ilk sıcaklık 5 °C sıcaklıktadır. Sıcaklık deney boyunca dakikada 5 °C artırılır. Bağlayıcının deney tabanına değdiği andaki değer cihaz tarafından otomatik belirlenmektedir (Şekil 2.8c) [8].



Şekil 2.8: (a) Deney cihazı (b) halka yüzük içindeki bağlayıcı (c) bağlayıcının zemine değdiği an.

2.4.3 Düktilite deneyi

Bitümlü bağlayıcının kohezyon mukavemeti, düşük ısıdaki düktilitesi ile ölçülmektedir. Deneyde ilk olarak standart bir deney kalıbının içine hazırlanan bitümlü bağlayıcı aktarılır. Daha sonra 25 °C’de ve 5 cm./dak. hızla çekilir. Bağlayıcı kopuncaya kadar ki uzadığı mesafe ölçülür [8]. Şekil 2.9’da cihaza ait görüntü verilmiştir.



Şekil 2.9: Düktilite deneyi yapılan bağlayıcı.

2.4.4 Parlama ve yanma noktası deneyi

Parlama noktası, bitüm numunesinin ısıtılan tarafına, uc kısmında alev çıkan deney cihazına temasıyla birlikte parlayıp ancak yanmaya devam ettiği en düşük sıcaklıktır [6-7,12]. Şekil 2.10’da deneye ait ekipmanlar gösterilmiştir.



Şekil 2.10: Deney ekipmanları.

2.4.5 Özgöl ağırlık deneyi

Hacim ağırlığı belirlenmiş bağlayıcının, aynı hacimdeki su ağırlığına oranlanması ile özgöl ağırlık hesaplanmaktadır. Deneyde ‘piknometre metodu’ kullanılmakta ve deney için uygun sıcaklık 25 °C’dir. Bu metotta öncelikle boş kabın ağırlığı belirlenir. Daha sonra saf su ile dolurularak kap+su ağırlığı belirlenir. Su dökülerek kabın içi tamamen kurutulup içerisine belirlenen miktardaki bağlayıcı koyularak kap+bağlayıcı ağırlığı belirlenir.

Bağlayıcı kaba aktarılırken hava kabarcıklarının oluşmamasına dikkat edilir. Sonrasında bağlayıcının üzerinde kalan boş kısma su eklenerek kap+bağlayıcı+su ağırlığı belirlenir. Son olarak gereken hesaplamalar yapılarak bağlayıcının özgöl ağırlığı tayin edilir [17-20].

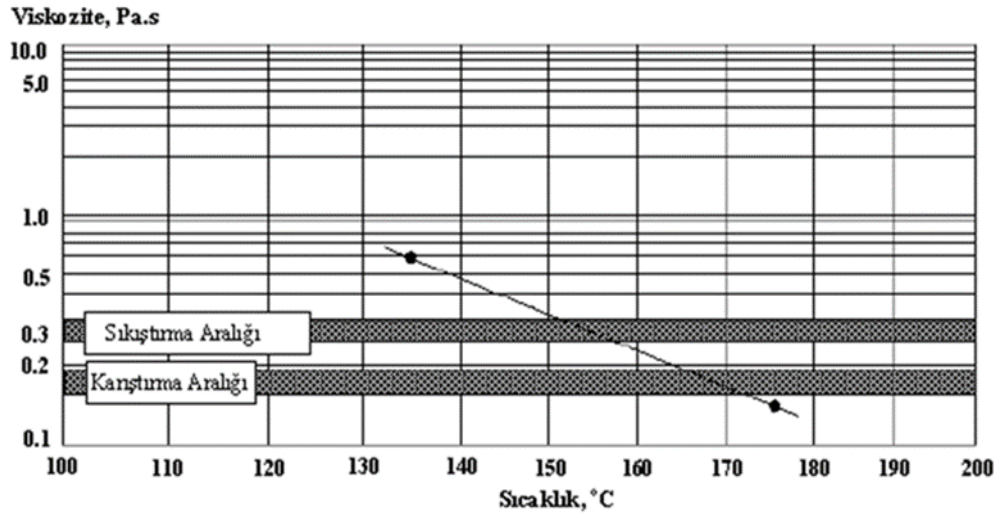
2.4.6 Dönel viskozimetre (RV) deneyi

Deney, asfalt bağlayıcıların şiddetli sıcaklıklardaki akışkanlık özelliklerini tespit etmek için kullanılmaktadır. Deney AASHTO TP48 standardına göre “Brookfield Viskozimetresi” ile yapılmaktadır (Şekil 2.11). İlk olarak etüvde ısıtılıp akışkan kıvama gelen numune yaklaşık 11 gram RV kabı içine doldurulur. Sonra 15 dk sabit sıcaklıkta, sıcaklık kontrolü olan kapta bekletilir ve deney başlatılır. Deneyde numune içerisine batırılan silindirik mil düzenli olarak 20 rpm. hızla döner. Daha sonra neredeyse birbirine yakın değerlere geldiğinde üç kere okuma yapılır. Bu okumaların ortalaması alınarak bağlayıcının viskozite değeri elde edilir. Deney sırasında bağlayıcıları 135 °C sıcaklıkta ve 3000 cP’yi geçmemesi istenir [7,19] . Bu bağlamda 135 °C ve 165 °C’ de RV deney sonucunda ulaşılan sayılar viskozite-sıcaklık grafiğine yerleştirilerek sıkıştırma ve karıştırma sıcaklıkları belirlenmektedir. Şekil

2.11’de RV deney ekipmanları, Şekil 2.12’de sıcaklık-viskozite değer grafiği gösterilmiştir [7-19].



Şekil 2.11: RV deney ekipmanları.



Şekil 2.12: Viskozite-sıcaklık grafiği.

2.5 Bitümlü Sıcak Karışımlardan Beklenen Özellikler

Sıcak karışım ile tasarlanan kaplamaların özellikleri, karışımın özellikleri ile direkt olarak ilgili olduğu için bu özelliklerin iyi tanımlanması gerekir. Bu nedenle karışım tasarımı oluşturulmalı ve tasarlanan karışımın durabilite, yorulmaya, stabilite ve kaymaya karşı direnç, işlenebilirlik, geçirimsizlik ve esneklik özellikleri göz önünde bulundurulmalıdır [6].

2.5.1 Stabilite

Stabilite; trafiğin yoğunluğu, çevre ve sıcaklık etmenlerine gösterilen dirençdir. Stabilitenin bu etkenlerin hepsini karşılayabilmesi beklenir. Stabilite yetersizliği kaplamada tekerlek izi ve çökme gibi deformasyonlara sebep olmaktadır. Bunun yanı sıra çok fazla stabilite de istenmeyen bir durumdur. Böyle durumlarda trafik yüklerinden dolayı kaplamalarda çatlamlar meydana geldiği görülmektedir [15-16].

2.5.2 Durabilite (Dayanıklılık)

Durabilite; hava, su, sıcaklık ve trafik yükünün kaplamada aşındırma etkilerine karşı gösterdiği önemli bir özelliktir. Bu etkilere, asfalt yapısının oksidasyonu ve buharlaşması vb. farklılıklar eklenebileceği gibi, suyun donması ve çözülmesi nedeniyle kaplama ve agregada oluşan farklılıklar da eklenebilir. Yüksek durabilite, soyulma direnci yüksek ve yoğun gradasyonlu agregaya ile yüksek asfalt yüzdesi seçilerek kaplamanın maksimum geçirimsizlik elde edilecek şekilde tasarlanıp sıkıştırılmasıyla sağlanır [6,20].

2.5.3 Geçirimsizlik

Geçirimsizlik, karışım içerisindeki hava boşluğu yüzdesi sayesinde tespit edilmektedir. Az bitüm içeriği ve karışım içerisindeki yüksek boşluk miktarı tabakayı çok geçirimli hale getirir. Bundan dolayı karışım tasarımları belli miktarda esnekliği sağlayacak boşluk yüzdesine göre yapılmaktadır [16].

2.5.4 İşlenebilirlik

Asfalt+agrega harmanının hazırlanması ve yoldaki serim sonrası silindirle sıkıştırılması esnasındaki kolaylık işlenebilirlik olarak tanımlanmaktadır [6,8]. İşlenebilirlik genellikle;

- Kaba agregaya oranı,
- Agregaya maks. dane boyutu fazlalığı,
- Kırmataş agregaya kullanıldıkça,
- Filler oranı ve orta ebatlı malzeme oranı arttığında azalmaktadır [8].

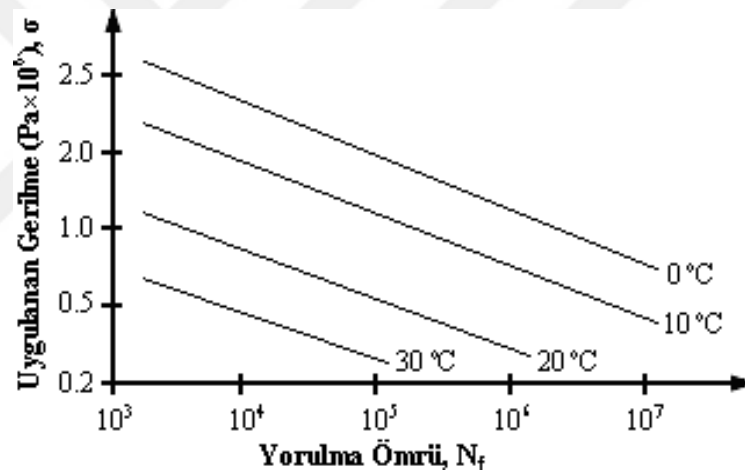
Karışımlarda işlenebilirliğin az olması, yayma ve sıkıştırma işlemleri zor olabilir. Bu yüzden çoğunlukla stabilitesi az olan ve homojen olmayan tabakalar elde edilmektedir [6].

2.5.5 Esneklik (Fleksibilite)

Esneklik, sıcak asfalt karışım kaplamalarının geçici oturma hareketleri sırasında deformasyona ve çatlamaya uğramaması olarak tanımlanabilir. Esnekliği karışım içerisindeki bitümün yüzdesi ve agrega gradasyonu etkilemektedir [8,16].

2.5.6 Yorulmaya karşı direnç

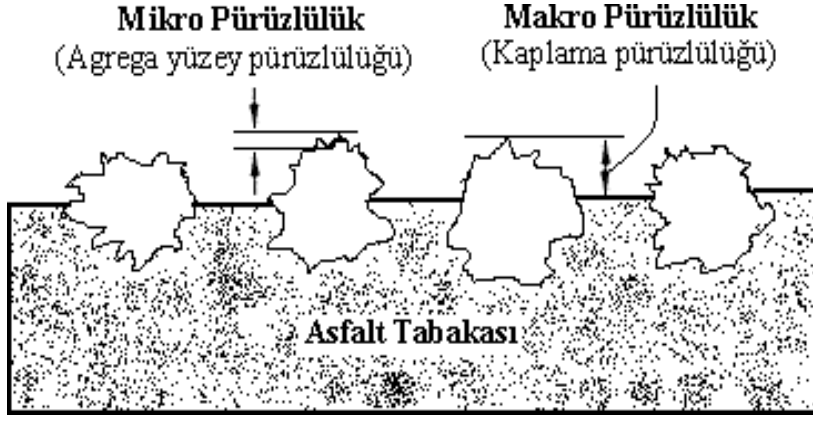
Kaplamaya gelen taşıt trafiğinin oluşturduğu deformasyonlara ve yorulmaya karşı gösterilen direnç olarak söylenebilir. Yorulmayı boşluk yüzdesi ve bitümün viskozitesi etkiler. Yorulma dayanımı, genellikle kaplamanın kalınlığı, rijitliği, yoğunluğu, bitüm oranı arttıkça artış göstermektedir. Farklı sıcaklıklarda benzer özellikleri olan karışımların sabit gerilmelere maruz kaldığındaki yorulma ömürleri Şekil 2.13’de verilmiştir. Şekil 2.13’de incelendiğinde, aynı özelliklere sahip kaplamaların yorulma ömrü uygulanan gerilmelerin değerleriyle ters orantılıdır [6].



Şekil 2.13: Gerilme- yorulma ömrü ilişkisi [6].

2.5.7 Kaymaya karşı direnç

Kaplama tabakasının üzerinden geçen araçların, bütün hava şartlarında emniyetle durabilmesi için gerekli olan sürtünme direnci, kayma direnci olarak tanımlanmaktadır. Bitüm miktarı az ve yoğun gradasyonlu sıcak karışım kaplamalarında kayma direnci daha yüksek olmaktadır. Asfalt kaplamalardaki kayma direnci pürüzlülüğe bağlıdır (Şekil 2.14). Agregada mikro pürüzlülük yüzey yapısına bağlıyken, makro pürüzlülük nominal boyutuna bağlıdır [6,12].



Şekil 2.14: Pürüzlülük [6].

2.6 Bitümlü Sıcak Karışım Kaplamalarda Oluşan Bozulmalar

BSK kaplamalar, oldukça iyi tasarlanmış ve inşa edilmiş olsalar bile bir süre sonra çeşitli etmenlerden dolayı bozulmaya başlarlar. Yol üstyapılarında oluşan bozulmaların ana nedenleri; kötü malzeme seçilmesi, yapım ve bakım hataları, dizayn hataları, iklim şartları göz önüne alınmadan seçilen malzeme ve proje tasarımının yapılmasıdır. Bunların sonucu olarak kaplama üzerinde kalıcı deformasyonlar, çatlaklar ve ayrışmalar oluşmaktadır [21].

2.6.1 Deformasyonlar

Üstyapıda meydana gelen deformasyonlar, genellikle stabilite yetersizliği sonucu oluşan şekil değiştirmeler olarak tanımlanmaktadır. Bu deformasyonlar sürüş konforu ve emniyeti açısından ciddi sakıncaları olan bozulmalardır [6,16].

2.6.1.1 Tekerlek izi oluşumu

Yollarda ağır taşıt trafiğinin olması genellikle sıcak havalarda en çok rastlanan, kalıcı deformasyonlardan en yaygını tekerlek izi oluşumudur. Genellikle aşağıdaki nedenlerden kaynaklanmaktadır.

- Trafiğin yoğun yükü ve tekrar sayısının çokluğu,
- Ağır araçların hızları,
- Hava sıcaklığının yüksek olması ve asfaltın viskozite değerinin düşük olması ,
- Yeterli olmayan temel tabakası kalınlığı ve zemin mukavemeti,
- Yüksek oranda filler yüzdesi ve asfalt veya filler/bitüm yüzdesi,
- Yuvarlak şekilli dere malzemesi,
- Yetersiz miktarlarda sıkıştırma [6,20,22].

Şekil 2.15’de üstyapı kaplamasında oluşan tekerlek izi deformasyonu gösterilmiştir.



Şekil 2.15: Tekerlek izi.

2.6.1.2 Oturmalar ve Çökmeler

Oturmalar, alt tabakalarda oluşan bozulmaların sathı etkilemesidir. Oturmalar sıcak karışım kaplamaya bağlı değildir. Esneklikleri sayesinde bitümlü tabakalar çatlama kaynaklı oluşan bozulma sebebiyle alt katmanların yeni kotuna ulaşabilirler. Ancak daha kırılgan asfalt kaplamalarda çatlamlar belirgin şekilde görülür [8,15]. Oturmaların meydana gelmesinin başlıca nedenleri; yeterli olmayan sıkıştırma, tabakaların yetersizliği ve üstyapı tabanının taşıma gücünün zayıf olması olabilir [6,20].

Çökmeler ise asıl kaplama yüzeyine oranla daha düşük kotta kalan ufak çukurlardır (Şekil 2.16). Temel ve alttemel tabakalarında stabilite eksikliği, yetersiz drenaj, yetersiz sıkıştırma, yapım hataları ve kötü işçilik çökmenin meydana gelmesinde başlıca sebepler olarak sıralanabilir [6-7].



Şekil 2.16: Çökmeye örnek.

2.6.1.3 Ondülasyon ve Kabarmalar

Ondülasyonlar, yol üstyapısında trafik akış yönüne göre enine doğrultuda meydana gelen ve bir dalgaya benzerler. Ondülasyonlar plastik bir hareket sonucunda kaplamada oluşan deformasyonlardır (Şekil 2.17). Bu tür dalgalar otobüs durakları, kavşaklar, tırmanma şeritleri gibi bölgelerde görülür.

Genellikle stabilitesi az olan karışımlarda, aşırı asfalt miktarı, yetersiz tabaka kalınlığı, rutubet miktarı, düşük viskoziteli asfalt, ağır taşıtların yoğun durma-kalkma hareketi gibi sebeplerden dolayı oluşmaktadır [6].



Şekil 2.17: Ondülasyon örneği.

Kabarmalar, genellikle kaplama üzerinde sadece bir kısımda yukarı yöne doğru hareket etmesidir. Bunun nedeni genellikle doğal zemin tabakasının ve üst tabakaların şişmesi sonucu açığa çıkmaktadır [6].

2.6.2 Çatlaklar

BSK kaplama üzerinde trafik yükü, iklim ve çevrenin tesiriyle çeşitli biçimlerde, derinlikte ve genişlikte meydana gelen kusurlar çatlama olarak adlandırılmaktadır. Çatlamalar genellikle yorulma çatlamları ve düşük sıcaklık çatlamları şeklinde iki sınıfa ayrılır [6,23-25].

2.6.2.1 Yorulma çatlakları

Tekrarlı ağır tekerlek yüklerinden dolayı kaplamada çatlamların oluşmasına neden olacak şekilde, kaplamanın çekme gerilme dayanımının aşılması sonucu yorulma çatlakları meydana gelmektedir (Şekil 2.18). Yorulma çatlağı başlangıcının ana işareti, trafiğin akış yönünde aralıklı olarak boyuna tekerlek izi çatlaklarının meydana gelmesidir. Oluşan aralıklı

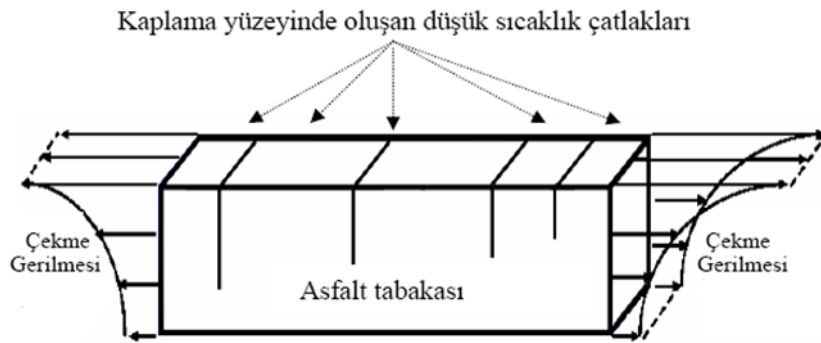
boyuna çatlaklar zamanla birleşerek, ardından bu çatlaklar enine çatlakların oluşmasına neden olarak haliyle daha fazla çatlağın oluşumuna sebep olması nedeniyle, kaplamada artan bir bozulma türüdür. Bu tip çatlaklar birbirleriyle bağlantılı olup timsah sırtı veya kümes teli görünümünde kaplamanın bütününde ya da belli bir bölgesinde oluşabilirler [6,24,25].



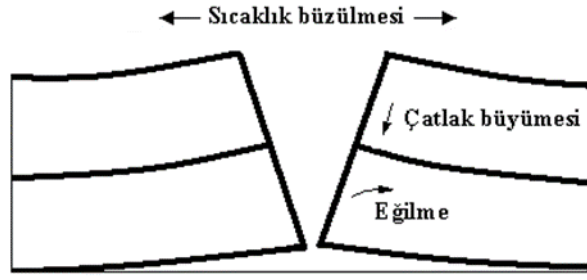
Şekil 2.18: Yorulma çatlakları.

2.6.2.2 Düşük sıcaklık çatlakları

Trafik akışına dik olarak oluşan bu çatlaklar, soğuk iklimlerde kaplama yüzeyinin büzülmesi sonucu meydana gelir. Soğuk hava koşullarında kaplamada meydana gelen tekrarlı çekme gerilmeleri ve yüksek gerilmeleri, kaplamanın çekme direncini aştığı anda şekilde gösterildiği gibi çatlaklar açığa çıkmaktadır [6,24,25]. Şekil 2.19’da kaplama üzerinde oluşan gerilmeler, Şekil 2.20’de kaplamadaki düşük sıcaklık çatlağının artış gösterdiği durum ve Şekil 2.21’de düşük ısı çatlağı gösterilmiştir.



Şekil 2.19: Yol kaplamasında oluşan gerilmeler [6].



Şekil 2.20: Kaplamadaki çatlakın büyümesi [6].



Şekil 2.21: Düşük ısı çatlağı [26].

2.6.3 Kuma

Asfaltın sıcaklık etkisiyle kaplamanın yüzeyine doğru çıkarak kaplama yüzeyinde kalın bir film tabakası oluşturması olayı kuma olarak adlandırılmaktadır. Kuma sonucu oluşan film tabakasından dolayı yüzeyindeki sürtünme değeri azalmaktadır [13,16]. Şekil 2.22’de kaplama yüzeyinde oluşan kuma verilmiştir.



Şekil 2.22: Kaplama üzerinde oluşan kuma [13].

2.7 Bitümlü Sıcak Karışımlarda Dizayn Yöntemleri

Yol üstyapıların dizayn edilmelerindeki öncelikli amaç, üstyapının trafik yüklerini etkin bir şekilde dağıtabilmesi, hizmet ömrü ve yapım maliyeti boyunca yapılacak bakım-onarım masraflarını minimum düzeyde tutabilecek bir mühendislik yapısı inşa etmektir. Günümüzde sıklıkla tercih edilen dizayn metodları olarak Superpave ve Marshall dizayn yöntemi başta gelmektedir [6].

2.7.1 Superpave dizayn yöntemi

Üstün performanslı asfalt kaplamalar anlamına gelen Superpave, tarihte ilk defa Stratejik Karayolu Araştırma Programı (SHRP) tarafından 20. Yüzyılın sonlarında geliştirildi ve geliştirilmeye devam ediyor. Bu yöntem, BSK tasarım yöntemlerini geliştirmek amacıyla tasarlandı. Superpave dizayn yönteminin temel amaçlarından bazıları aşağıda verilmiştir.

- İklim ve trafik şartlarının daha iyi birleştirilmesi
- Asfalt bağlayıcı ve agrega seçiminin daha iyi değerlendirilmesi
- Karışım tasarımında daha iyi hacimsel yaklaşımlar [27-28].

Superpave dizayn yöntemi iki kısımdan oluşturulmuştur. Bunlar; karışım dizaynı ve bağlayıcı şartnamesidir. Superpave bağlayıcı şartnamesi saf ve modifiye edilmiş bağlayıcıların dizayn şartlarındaki performans özelliklerini belirlemek için geliştirilmiştir.

2.7.2 Marshall dizayn yöntemi

Asfalt endüstrisinin gelişmesinde büyük rol oynayan Bruce Marshall'ın yeni bir tasarım modeli geliştirmesiyle, günümüzde laboratuvar deneysel çalışmaları için yaygın olarak kullanılan Marshall dizayn yöntemi ortaya çıkmıştır [29]. Marshall dizayn yönteminde, belirlenmiş miktarlardaki agrega-asfalt karışımı, düşen bir kütle tarafından sıkıştırma sıcaklığında belirli bir sıkıştırma işlemine tabi tutulur. Ayrıca bu yöntemde, uygun asfalt içeriğinin belirlenmesi amacıyla sıkıştırılmış numunenin boşluk yapısı kullanılır [30,31]. Marshall dizayn yöntemi sonucunda numunelere ait yoğunluk-boşluk analizleri ve stabilite-akma değerleri belirlenmektedir. Bu deney sonucundan Bitüm Yüzdesi-Hava Boşluğu Yüzdesi (Vh), Bitüm Yüzdesi-Pratik Özgül Ağırlık (Dp), Bitüm Yüzdesi-Asfaltla Dolu Boşluk Yüzdesi (Vf), Bitüm Yüzdesi-Akma, Bitüm Yüzdesi-Stabilite ve Bitüm Yüzdesi-Agregalar Arası Boşluk (VMA) yüzdesi arasındaki ilişkileri gösteren sonuç grafikleri çizilir. Bu grafiklerde, stabilite ve yoğunluk eğrilerinin max. değerine denk gelen bitüm yüzdeleri,

%70 bitümle dolu boşluk yüzdesine denk gelen bitüm yüzdesi ve %4 hava boşluğu yüzdesine karşılık gelen değer toplanır ve bu değerlerin ortalamaları elde edilir. Elde edilen bu değer optimum bitüm yüzdesi olarak adlandırılır. Son olarak elde edilen optimum bitüm yüzdesinin denk geldiği akma değerine bakılarak şartnameye uygunluğu kontrol edilir [17-19].

2.8 Bitümlü Sıcak Karışımlara Uygulanan Deneyler

BSK'ların performans özelliklerini belirlemek amacıyla, karışım numunelerine çeşitli karışım deneylerine tabi tutulmaktadır. Bitümlü sıcak karışımlar üzerinde genellikle uygulanan deneyler; dolaylı çekme yorulma, Marshall stabilite ve akma, statik ve dinamik sünme, kalıcı Marshall stabilitesi (RMS) ve dolaylı çekme rijitlik modülü (ITSM) deneyleridir [6-7,17].

2.8.1 Marshall stabilite ve akma deneyi

Bu deney, sıcak karışım asfaltların plastik akmaya karşı gösterdiği mukavemetin ASTM D 1559 standardına göre belirlenmesi için yapılır. Deneye ön hazırlık olarak, sıcak karışım numunelerinin 3 farklı ağırlıkları ve yükseklikleri belirlenir. Daha sonra numuneler 60 ± 1 °C sıcaklıktaki su banyosunda yaklaşık 30-40 dakika kadar bekletilir (Şekil 2.23a). Bu süre bitiminde numuneler sudan çıkarılarak Marshall cihazına yerleştirilir ve briket numunesine 50 ± 2 mm/dakika hızla yükleme yapılır. Deney sonunda briket numunesinin kırıldığı andaki stabilitesi ve akma değeri Marshall cihazına otomatik kaydedilir (Şekil 2.23b). Stabilite değeri, sıcak karışımın deformasyonlara karşı gösterdiği en yüksek mukavemeti, akma ise numunede maksimum yüke ulaştığı anda meydana gelen düşey deformasyonu göstermektedir. Standart numune yüksekliği bu deney için 63.5 mm olarak belirlenmiştir. Ancak yükseklikleri farklı olan numuneler için denklem (2.6) yardımıyla stabilite düzeltme katsayıları hesaplanır [6,32].

$$c = 5.24 \times e^{(-0.0258 \times h)} \quad (2.6)$$

Denklemden c; düzeltme katsayısı, h; numune yüksekliğini göstermektedir. Bulunan stabilite ve akma değerlerinin ortalaması hesaplanarak kaydedilir ve böylece sonuçlar elde edilmiş olur. Numunelerin ortalama değeri hesaplanarak sapma miktarları belirlenmektedir. Aynı zamanda bu deney sonucunda, sıcak karışımların sertliğinin ve deformasyona karşı direncinin bir göstergesi olarak kabul edilen Marshall oranı (MQ) değeri de

hesaplanabilmektedir. Marshall oranı (MQ), stabilite değerinin akma değerine oranıdır [6,32].



Şekil 2.23: (a) Su banyosunda bekletilen briket numuneleri (b) marshall deney cihazı.

2.8.2 Kalıcı marshall stabilitesi (RMS) deneyi

BSK'ların nem hasarlarına gösterdikleri direncin tespit edilmesi amacıyla kalıcı marshall stabilitesi deneyi yapılmaktadır. RMS deneyinde her bir numune 60 ± 1 °C' deki su banyosu içerisinde 24 saat boyunca bekletildikten sonra Marshall stabilite ve akma deneyi uygulanır. Numuneler 24 saat süreyle 60 °C'deki suda bekletildikten sonraki stabilite değerinin numunenin normal stabilite değerine oranlanması sonucunda RMS değeri belirlenir. Bu değer yüksek olması bitümlü sıcak karışımın nem hasarına karşı daha yüksek bir dirence sahip olduğu değerlendirilmektedir [20,33].

2.8.3 Dolaylı çekme mukavemeti (ITS) deneyi

ITS deneyi, BSK'ların kohezyonunu belirlemek amacıyla yapılmaktadır. ITS deneyi, AASHTO T245 veya ASTM D4123 standardına göre yapılarak, sıcak karışımın orta sıcaklıklardaki durabilitesini ve sertliğini belirlemek amacıyla da kullanılmaktadır. ITS deneyi için kullanılacak olan numuneler Marshall veya Yoğurmalı pres cihazları ile üretilir. Deney sonucunda elde edilen ITS verileri karışımların kohezyon kuvvetine bağlıdır. ITS değeri arttığında kohezyon değeri de artmaktadır. Dolayısıyla bağlayıcının kohezyon özelliği ITS değerini direkt olarak etkilemektedir. Aynı zamanda bu deney, bitümlü sıcak

kaşımların sıcaklık ve yorulma sebebiyle meydana gelen çekme gerilmelerinin özelliklerinin belirlenmesinde ve çekme mukavemetinin hesaplanmasında da kullanılmaktadır [6,17,32].

ITS deneyi, dolaylı çekme gerilmesi deney ekipmanları ve Marshall stabilite deney cihazı kullanılarak yapılmaktadır. Silindirik deney numunesi çap düzlemi doğrultusuna paralel bir şekilde cihaz düzeneğine yerleştirilir. Daha sonra 50 mm/dakika hızda sabit bir basınç yükü numune üzerine uygulanarak, kırılıncaya kadar yüklemeye devam edilir. Deney sonucunda numunenin aldığı en yüksek yük değeri kaydedilir [6,13]. Numunenin deneyin başında ve sonundaki hali Şekil 2.24’de, ITS deney cihazı ise Şekil 2.25’ de gösterilmiştir.

Numunelerin ITS değeri Denklem (2.7) yardımı ile hesaplanmaktadır [6].

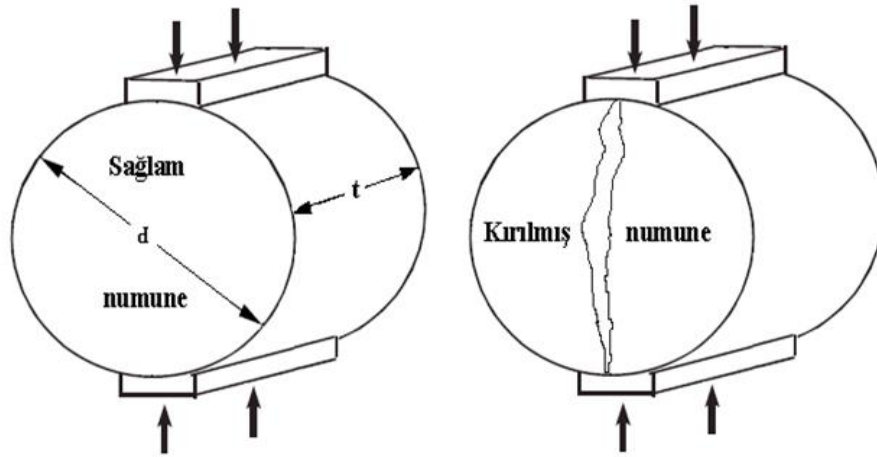
$$ITS = \frac{2P_{maks}}{\pi.t.d} \quad (2.7)$$

ITS : Dolaylı çekme mukavemeti

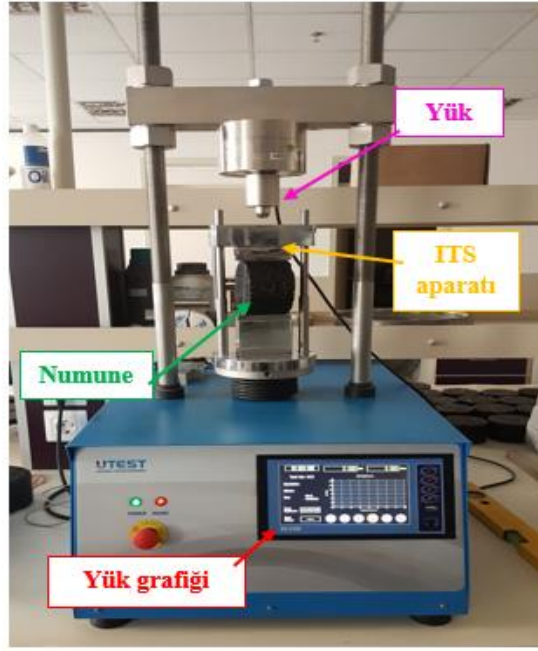
Pmaks: Maximum yük (kN)

t : Numune kalınlığı (mm)

d : Numune çapı (mm)



Şekil 2.24: ITS deneyinde yükleme durumu ve kırılan briket numunesi.



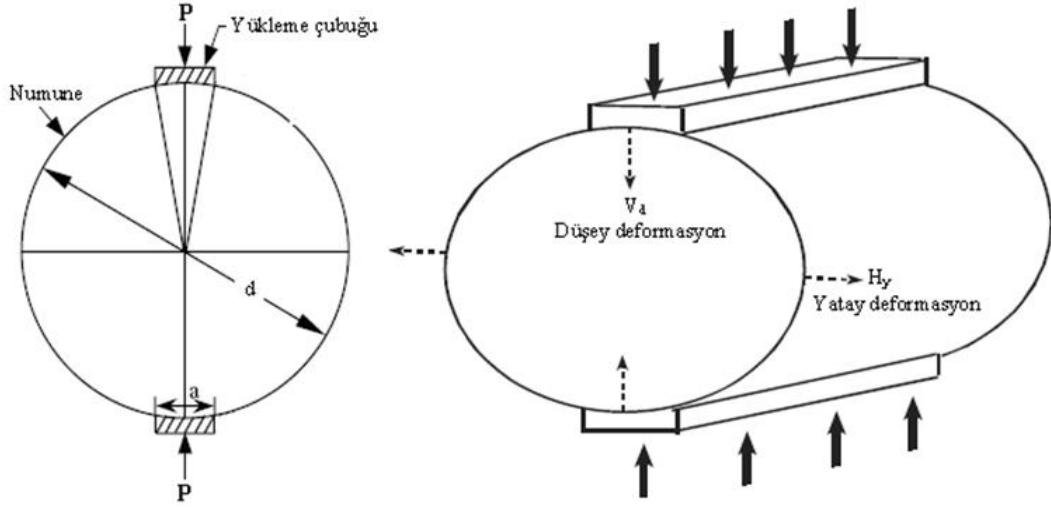
Şekil 2.25: ITS deney cihazı.

2.8.4 Dolaylı çekme rijitlik modülü (ITSM) deneyi

BSK'ların hareketli yükler altındaki esnekliğinin belirlenmesi amacıyla ITSM deneyine tabi tutulurlar. Kaplamanın performans özelliklerinin ve yük dağıtma yeteneğinin tespit edilmesinde esneklik modülü önemli bir kriterdir. Karışım numunesi tek eksenli yüklemeye maruz bırakıldığında esneklik modülü değeri belirlenir. Bu değer en yüksek gerilmenin en yüksek birim şekil değiştirmeye oranlanmasıyla elde edilir [6].

Bu deneyde numuneler üzerinde değişik yükleme süreleri ve farklı sıcaklıklar altındaki esneklik modülü değerleri belirlenmektedir.

Deneyde, numune üzerine yarı sünizoidal olarak, düşey gidişatta tekrarlı darbeler halinde basınç yükü uygulanmaktadır [6,12]. ITSM deneyi ve numunede meydana gelen deformasyon Şekil 2.26' da verilmiştir.



Şekil 2.26: ITSM deneyi ve numune üzerinde oluşan deformasyon.

Sıcak karışımlar genel olarak 0°C ve 25°C'lik sıcaklıklarda deneye maruz bırakılmaktadır. Deney sonunda esneklik modülü değeri Denklem (2.8) yardımı ile hesaplanmaktadır.

$$Em = \frac{P \times (v + 0.2734)}{H_y \times h} \quad (2.8)$$

Burada;

Em : Esneklik modülü (Mpa),

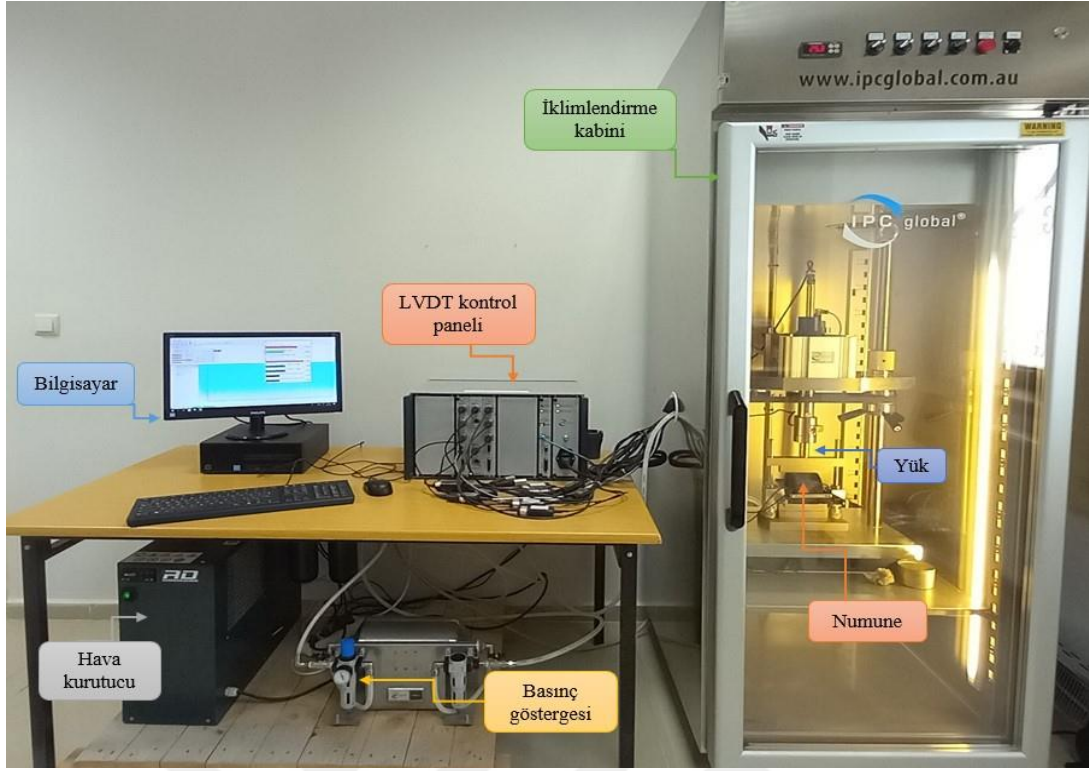
P : Maksimum yük (N),

H_y : Toplam yatay deformasyon(mm)

H : Numune kalınlığı (mm),

v : Poisson oranını ifade etmektedir.

ITSM deney düzeneği Şekil 2.27'de ve deney esnasındaki numune görseli Şekil 2.28'de verilmiştir.



Şekil 2.27: ITSM deney düzeneği.



Şekil 2.28: ITSM deneyine maruz bırakılan numune.

2.8.5 Modifiye Lottman deneyi (AASHTO T-283)

BSK'ların kaplamalarda kullanılabilirliğinin uygunluğunu belirlemek amacıyla yapılan en kritik ölçümlerden biri de sıcak karışımın su etkilerine karşı hassasiyetinin tespit edilmesidir. Bu deney, sıkıştırılmış BSK'ların suyun oluşturduğu etkilere karşı hassasiyetinin tespit

edilmesi için kullanılmaktadır. Bu deney sayesinde karışımda su yüzünden oluşan dayanım kaybı belirlenmektedir. Deney sonuçları, BSK'ların yol üzerindeki uzun dönem servis süresinde, soyulmaya karşı hassasiyetlerinin belirlenmesi için kullanılmaktadır [6].

Sıkıştırılmış asfalt numuneler, “koşullandırılmış” ve “koşullandırılmamış” olarak iki farklı gruba ayrılır. Her iki gruptaki numuneler dolaylı çekme deneyine tabi tutularak sıcak karışımın dayanım kaybı tespit edilmektedir. Karışımın dolaylı çekme mukavemetinin alınmasının nedeni, sıcak karışım aşınma tabakaların sürekliliği için en kritik değerin çekme dayanımı olmasıdır. Karışımda çekme dayanımının düşük olması, kaplamada çevre ve trafik etkileriyle meydana gelen çekme gerilmelerine karşı koyamayacaktır. Bunun sonucunda kaplamada bozulmalar meydana gelecektir [6,20].

Deneyde yapılacak her bir deney grubu için 3 adet kuru ve 3 adet koşullandırılmış olmak üzere minimum 6 adet Marshall briket numuneleri hazırlanmaktadır. Hazırlanan sıkıştırılmamış sıcak karışım numuneleri tepsilere konulur ve oda sıcaklığında 2 saat soğutulur. Daha sonra 60 °C'deki etüve yerleştirilir ve 16 saat bekletilir. Karışım numuneleri sıkıştırma sıcaklığında 2 saat bekletildikten sonra %6-8 hava boşluklarında sıkıştırılır. Bu numuneler daha sonra 24 saat oda sıcaklığında bırakılır. Şartlandırmayan kuru briket numuneleri ise su banyosunda (25 °C'deki) yaklaşık 2 saat bekletilir. Daha sonra bu numuneler üzerinde dolaylı çekme deneyi uygulanarak numuneler kırılır. Şartlandırılacak olan briket numunelerine ise 13-67 kPa emme basıncı altında 5-10 dakika süreyle bir manometre ile vakum uygulanarak %70-80 oranında su ile doymuş bir hal alması sağlanır. Doymuş bir hal alan briket numuneleri -18 °C soğutucuya 16 saat süreyle yerleştirilir. Ardından soğutucudaki briket numuneleri çıkarılarak su banyosunda (60 °C'deki) 24 saat bırakılır. Bu süre sonunda her bir numune sudan çıkarılarak 25 °C'deki su banyosu içerisine yerleştirilir. Burada da 2 saat kadar bırakıldıktan sonra dolaylı çekme deneyine maruz bırakılır [6,29]. Şartlandırılmayan numunelerin dolaylı çekme mukavemetinin (ITS_{kuru}) ve şartlandırılmış olan briket numunelerinin dolaylı çekme mukavemetine (ITS_{yaş}) oranı (2.9) bağıntısı ile hesaplanmaktadır [6,29,34].

$$ITSR = (ITS_{yaş} / ITS_{kuru}) \times 100 \quad (2.9)$$

ITSR : Dolaylı çekme mukavemeti oranı (%),

ITS_{yaş} : Şartlandırılmış numunelerin ortalama dolaylı çekme mukavemeti (kPa)

ITS_{kuru} : Şartlandırılmamış numunelerin ortalama dolaylı çekme mukavemeti (kPa)

Sıcak karışım numunelerin Superpave dizayn yöntemi esas alınarak suyun oluşturduğu etkilere karşı uygun dayanımda kabul edilmesinin için ITSr değerinin minimum %80 oranında olması gerekmektedir. Fakat orijinal Lottman metodunda ITSr değerinin minimum %70 oranında olması yeterli gelmektedir. Deney sonucunda %80'den daha az ITSr değerleri olan karışım numunelerinin, yeteri kadar suyun etkisine karşı direnç gösteremeyeceği kabul edilerek, bu direncin artırılması istenmektedir. Bu amaçla karışımın içerisine çoğunlukla soyulmayı önleyici katkı maddeleri ikame edilmektedir. Çeşitli katkılarla modifiye edilen BSK'larda ise ITSr değerinin %85 değerinden daha az olmaması gerekmektedir [6,29].

2.8.6 Sünme deneyi

BSK kaplamalarda, oluşan yük türlerine göre iki farklı yükleme şeklinde sünme deneyi uygulanmaktadır. Bunlar; statik sünme ve dinamik sünme deneyleridir.

Sünme deneyinde, dairesel ve tek eksenli basınç yüklemesi altında BSK'ların sünme oranı tespit edilmektedir. Aynı zamanda bu değer sıcak karışım kaplamalarda tekerlek izi oluşumuna karşı dayanımı tespit ederek, değerlendirilmesine olanak sağlar [6,12].

Sabit trafik yükleri nedeniyle kaplamada oluşan kalıcı deformasyon etkilerine karşı dayanım statik sünme deneyi ile tespit edilmektedir. Deneyde, briket numunesine belirlenen yük uygulandıktan sonra yük kaldırılır. Daha sonra numunede meydana gelen kalıcı deformasyonu ölçülür. Sünme deneyi sonucunda sünme modülü değeri belirlenir. Bu değer, sıcak karışımın dingil yükleri ve ısıyla karşılaştığı zaman daha az sıcaklıklardaki kırılma potansiyelinin ve oluşacak olan tekerlek izinin hesaplanması için kullanılmaktadır [6,12,32].

Statik sünme deneyinde standart deney sıcaklığı 40 °C'dir. Ancak yüksek sıcaklık bölgeleri için daha yüksek sıcaklıklarda da deney uygulanabilmektedir. Deney başlatıldıktan sonra numuneye belirli bir statik eksenel gerilme (σ) 1 saat süre boyunca uygulanır. Ayrıca zamanın bir fonksiyonu olan eksenel deformasyonlar da deney esnasında kaydedilmektedir.

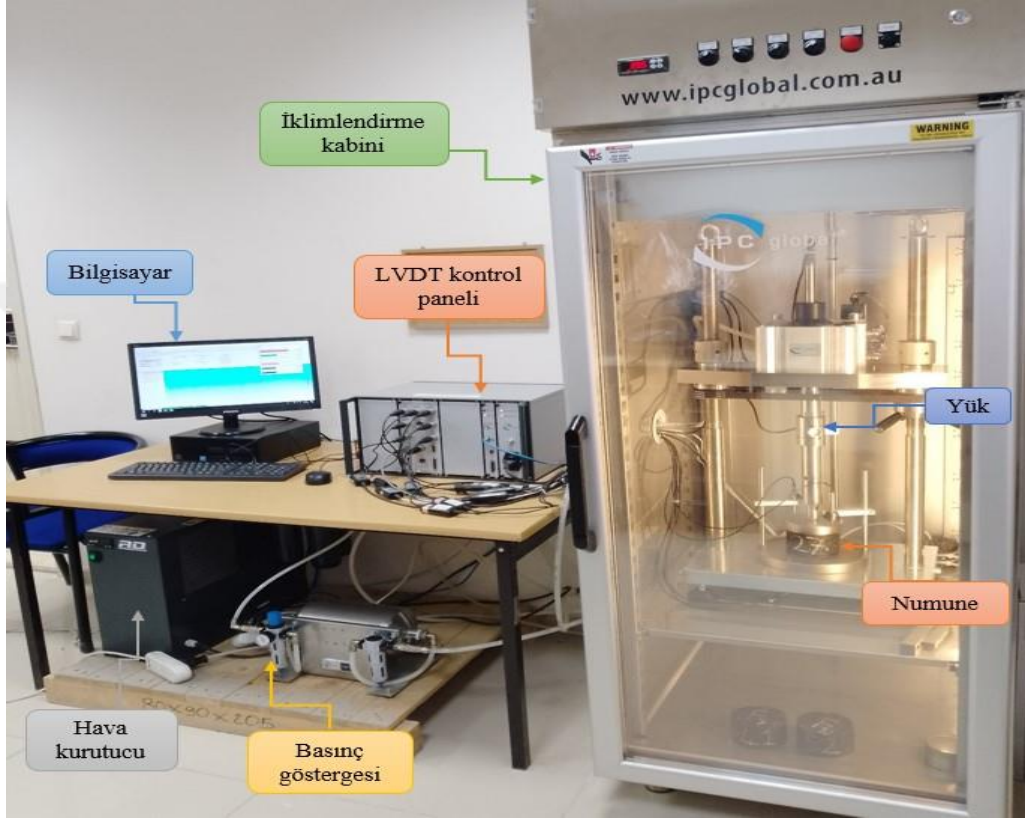
Statik tek eksenli sünme deney şartları şunlardır;

- Standart deney sıcaklığı '40°C', yüksek sıcaklıklardaki bölgelerde '50°C';
- 0.01 MPa şartlandırma stresi altında 10 dakikalık ön yükleme;
- Deney 0.2 MPa'ya karşılık gelen sabit yük stresi;
- Deney süresi: 1 saat yükleme ve 1 saat boşaltma şeklinde yapılmaktadır [6,12,34].

Briket numunesinde herhangi bir yükleme anında uygulanan gerilme (σ), eksenel gerinim (ϵ) ve rijitlik modülü (S_{mix}) Denklem (2.10) ile hesaplanır [6].

$$S_{mix} = \sigma / \epsilon \quad (2.10)$$

Sünme deney düzeneği Şekil 2.29’da, deneye maruz bırakılan briket numunesi ise Şekil 2.30’da verilmiştir.



Şekil 2.29: Sünme deney düzeneği.



Şekil 2.30: Sünme deneyine maruz bırakılan briket numunesi.

Sıcak karışım kaplamalarda hareketli yükler nedeniyle kayma deformasyonları meydana gelmektedir. Bu deformasyonlar kaplama üzerinde tekerlek izinin oluşmasına neden olur. Fakat tasarlanan kaplamaların kayma deformasyonuna karşı yüksek bir dayanım göstermesi beklenmektedir. EN 12697-25A standardına göre, BSK kaplamaların kayma deformasyonlarına karşı dayanımını belirlemek amacıyla dinamik sünme deneyi uygulanmaktadır. Bu deney, farklı yükleme ve sıcaklıklarda gerçekleştirilebilir. Fakat dinamik sünme deneyi çoğunlukla 50°C sıcaklıkta gerçekleştirilmektedir. Deneyde ana yükleme yapılmadan hemen önce her numune 10 dakika süreyle 10 kPa ön yüke maruz bırakılır. İkinci yükleme olan ana yükleme ise 500 kPa'lık bir saptırıcı gerilimi ve 10 kPa'lık bir temas gerilimi olan yarı sinüzoidal bir yüklemedir. Ana yük, bozulma oluncaya kadar devam ettirilir. Deney sonunda numunenin ana yükleme altındaki birikmiş deformasyonları ölçülür. Bununla birlikte defirmasyon yükleme döngü grafikleri de elde edilir [35]. Deney bittiğinde Denklem (2.11) – Denklem (2.15) kullanılır ve sünme değerleri hesaplanmaktadır [36].

$$E_c = \sigma / \varepsilon_c \quad (2.11)$$

$$E_r = \sigma / \varepsilon_r \quad (2.12)$$

$$\varepsilon_c = (L3_n - L1)/G \quad (2.13)$$

$$\varepsilon_r = (L2_n - L3_n)/(G - (L3_n - L1)) \quad (2.14)$$

$$\sigma = F/A \quad (2.15)$$

Burada; E_c : sünme sertliği (MPa)

σ : uygulanan dinamik gerilme (MPa)

ε_c : toplam plastik kalıcı gerilim,

E_r : esneklik modülü

ε_r : toplam elastik eksenel şekil değiştirme

L1: başlangıç LVDT deplasmanı (mm)

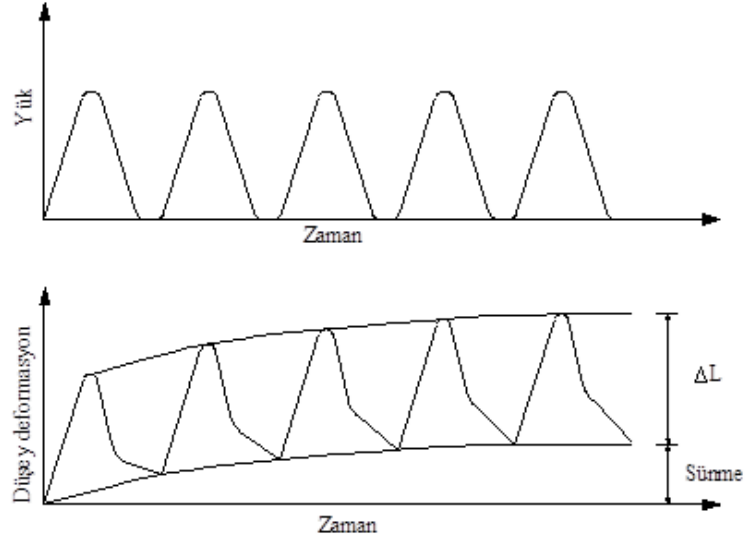
L2_n : n.darbedeki maks. deplasman (mm)

G : yükseklik

F : maks düşey yük (kN)

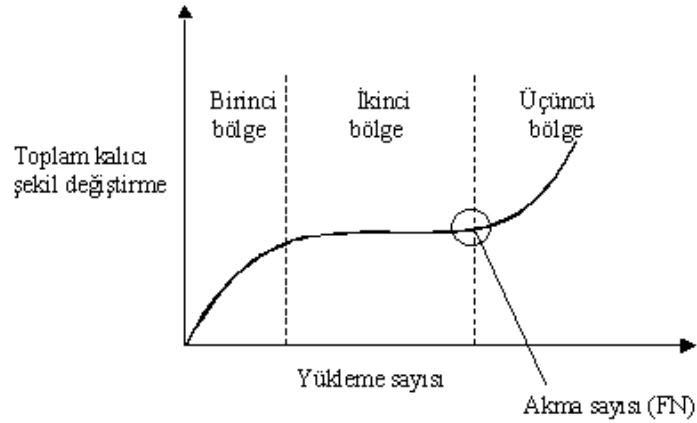
A : numune kesit alanı (cm²)'dır [12,40].

Dinamik sünme deneyinde, silindirik bir karışım numunesine dinamik bir yük uyguladıktan sonra oluşan deformasyon ölçülmektedir. Sıcak karışım numunesine uygulanan yük-zaman ve meydana gelen düşey deformasyon-zaman grafiği Şekil 2.31’de verilmiştir.



Şekil 2.31: Yük-zaman ve düşey deformasyon-zaman grafikleri.

Ölçümden sonra, sıcak karışımın kalıcı deformasyona karşı direncini tespit etmek amacıyla yüklemeye maruz kaldığındaki toplam kalıcı şekil değiştirme-zaman grafiği çizilmektedir (Şekil 2.32).

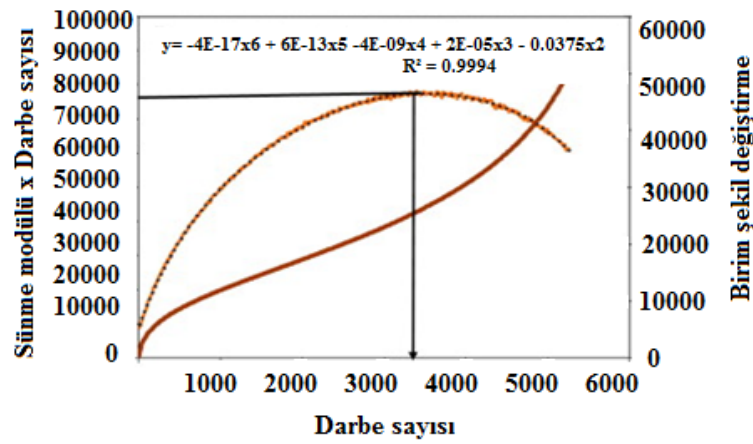


Şekil 2.32: Toplam kalıcı şekil değiştirme- yüklemeye sayısı grafiği.

Şekil 2.32 incelendiğinde, yüklemeye tabi tutulan numune için oluşturulan grafik 3 bölgeden geçen bir eğriden meydana gelmektedir. Grafikte I. bölgenin olduğu kısımda oturmalar oluşur. Bu bölgede hacimde azalma olur ve şekil değiştirme hızla artış gösterir.

Ancak daha sonra bu artma miktarı azalır. II. bölgede, şekil değiştirme neredeyse lineer olarak oluşmaktadır. Son bölge olan III. bölgeye geldiğinde ise kayma deformasyonları artık

oluşmaya başlamıştır. Toplam oluşan şekil değiştirme bu bölgede tekrardan hızla artmaya başlar. Grafikte III. bölgenin başlamış olduğu noktada yük tekrar sayısı, “akma sayısı (flow number- FN)” olarak kabul edilir. Akma sayısı, BSK’nın tekerlek izi oluşumuna karşı göstermiş olduğu direncin bir ölçüsüdür [35-38]. Akma sayısı çeşitli yöntemlerle hesaplanabilir. Günümüzde çoğunlukla Bausano ve Williams’ın (2007) geliştirdiği metot kullanılmaktadır. Bu yöntemde, düşey eksen kısmına darbe sayısı ve sünme modülü değerleri çarpılarak yazılır. Grafikte yatay eksen kısmına ise sadece darbe sayısı yazılır. Daha sonra bir grafik oluşturulur. Akma sayısı grafiğinin tepe nokta değeri ‘FN’ yani akma sayısı kabul edilmektedir (Şekil 2.33) [38,39].



Şekil 2.33: FN'nin tespit edilmesi.

2.8.7 Dolaylı çekme yorulma deneyi

BSK kaplamaların üzerine gelen tekrarlı trafik yükleri nedeniyle çatlamlar meydana gelir. Bu çatlamlar zaman içerisinde artar ve kaplamanın rijitliği azalır. Bunun sonucunda kaplama yüzeyinde yorulma çatlakları meydana gelir. Kaplamada meydana gelen bu çatlaklar en sık görülen deformasyon türüdür [40].

Dolaylı çekme yorulma deneyi genellikle 25°C sıcaklıkta EN 12697-24E standardına göre yapılır. Deneye hazırlık aşamasında her bir numune iklimlendirme kabininin içerisinde minimum 2 saat şartlandırılmak üzere bırakılır. Bu süre bittiğinde, bilgisayara numuneye ait fiziksel özellikler ve gerekli bilgiler girilerek, numune cihaza yerleştirilir. Daha sonra LVDT'ler uygun şekilde sabitlenir ve deney başlatılır. Briket numunesi tam olarak kırılana kadar deney devam eder. Numunede kırılma meydana geldiği anda cihaz bilgisayarında otomatik şekilde yük tekerrür sayısı – deformasyon grafikleri kaydedilir (Şekil 2.34).

Deney sonunda yorulma ömrü (Nf) ile gerilme (σ) arasındaki ilişki Denklem (2.16) ile hesaplanmaktadır [39-41].

Dolaylı çekme yorulma deney düzeneği Şekil 2.35’de, deneye maruz bırakılan briket numunesi ve deney sonrasında kırılan numune ise Şekil 2.36’da verilmiştir.

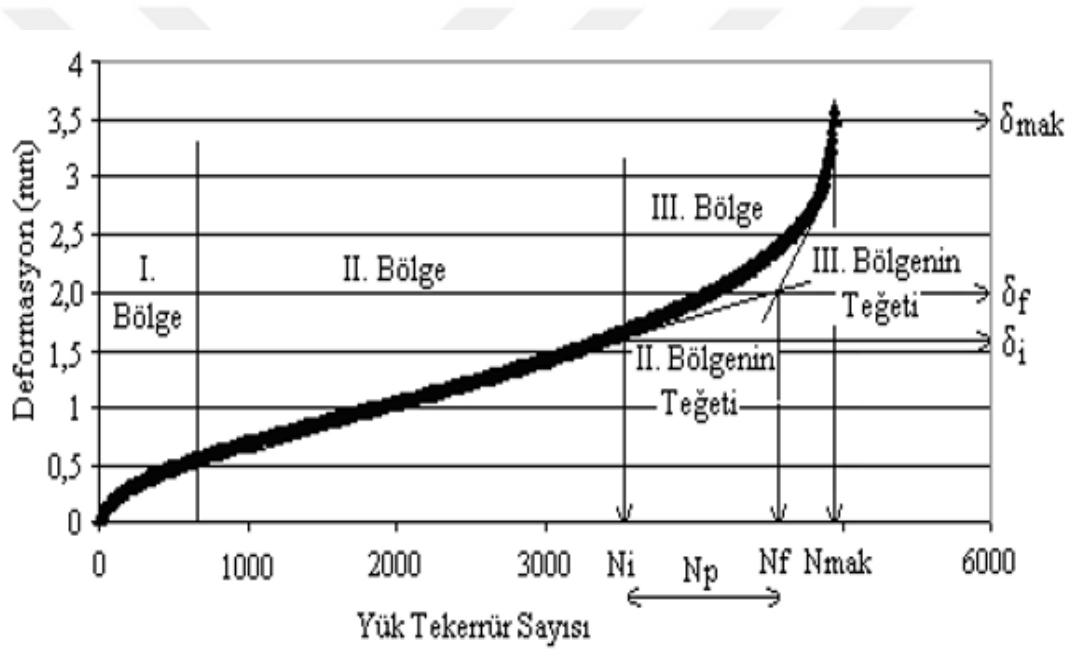
$$Nf = k_1 \times \left(\frac{1}{\sigma}\right)^{k_2} \quad (2.16)$$

Burada;

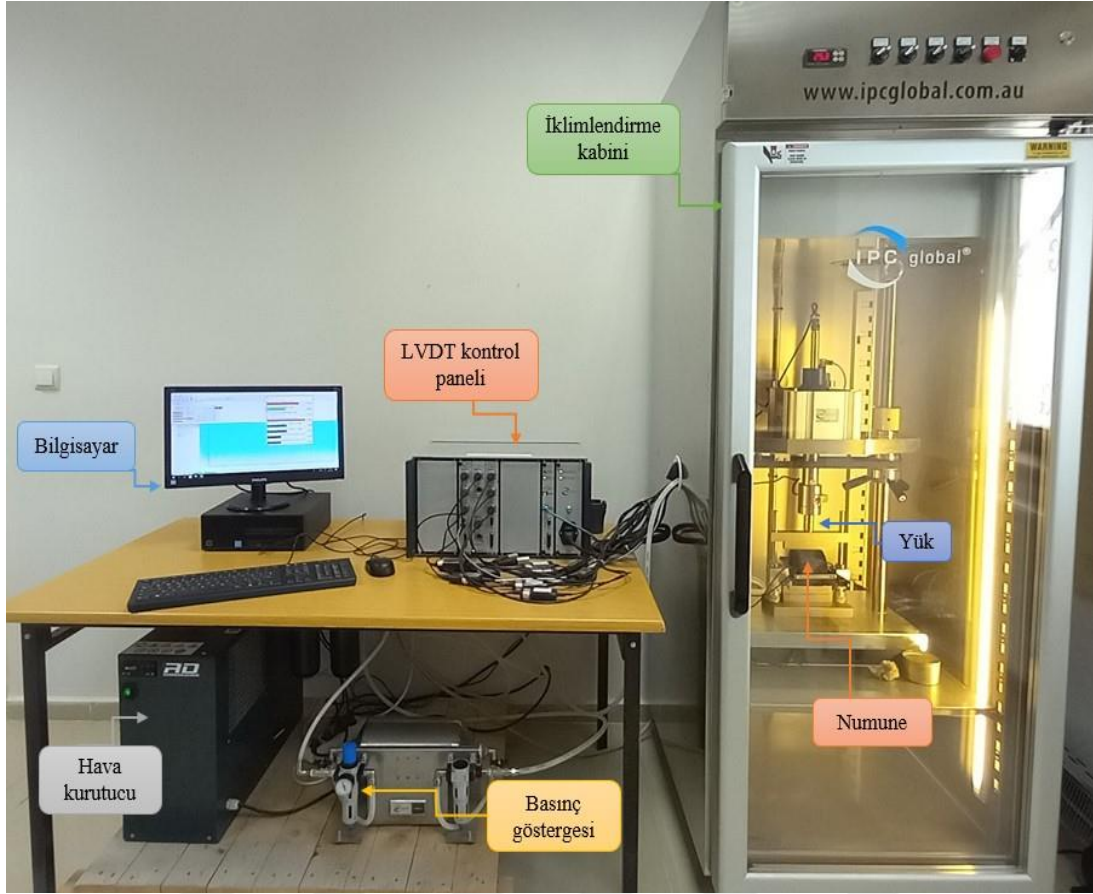
Nf : Yorulma ömrü

k_1, k_2 : Malzeme karakteristiği

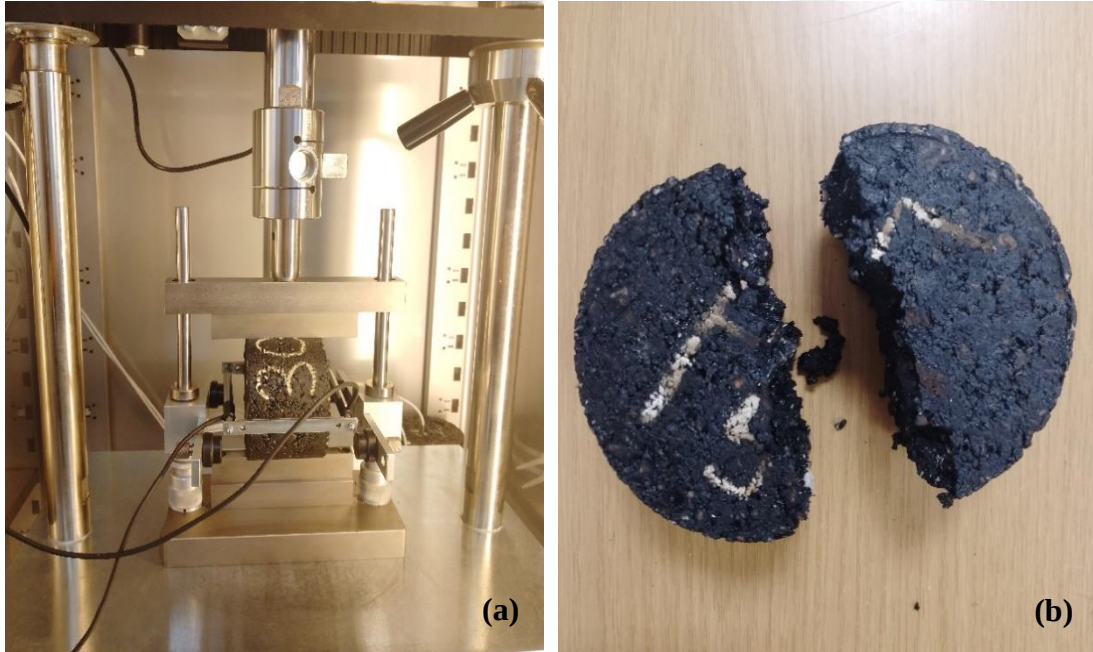
σ : Gerilme (kPa)



Şekil 2.34: Temsili deformasyon – yük tekerrür sayısı grafiği.



Şekil 2.35: Dolaylı çekme yorulma deney düzeneği.



Şekil 2.36: (a) Deneye maruz bırakılan briket numunesi (b) kırılmış numune.

3. BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIM MODİFİKASYONU

Sıcak asfalt kaplamaların performans ve stabilite açısından nitelikli, uzun ömürlü ve bakım-onarım maliyetinin az olması hedeflenmektedir. BSK kaplamaların istenilen özellikleri karşılayabilmesi için yorulma çatlaklarının, düşük ısı çatlaklarının, kalıcı deformasyonlarının ve su sebebiyle soyulmasının en aza düşürülmesi zorunludur. Bu nedenle modifiye prosedürü gerçekleştirilir. Bunun sayesinde hem bağlayıcının hemde karışımın performansında iyileştirmeler yapılmaya çalışılmaktadır [6,8].

Modifikasyon; bitümlü bağlayıcının ve BSK'ların performans özelliklerini artırmak amacıyla, modifiyer olarak ilave edilecek katkı maddelerinin belirli oranlarda ya bitüme ya da karışıma ilave edilmesiyle gerçekleştirilmektedir. Bu yöntemle elde edilen bitümlere “Modifiye Bitüm (MB)” ve karışımlara ise “Modifiye Edilmiş Karışım” denilmektedir [7,8].

3.1 Modifikasyonun Amacı

Bitüm ve BSK'ların modifiye edilmelerindeki temel esaslar çoğunlukla şöyle sıralanabilir:

- Düşük sıcaklıklarda daha esnek karışımlar tasarlayarak, oluşabilecek çatlamları en aza düşürmek,
- Yüksek servis sıcaklıklarında rijit karışımlar tasarlayarak, kaplamada oluşabilecek tekerlek izini minimuma düşürmek,
- Kaplamalarda yüksek kayma direncine sahip yüzeyler tasarlamak,
- Karışımların direncini, işlenebilirliğini, dayanımını artırmak amacıyla bitüm ve BSK'lar modifiye edilmektedir.
- Agregası ve bağlayıcı arasındaki adezyonu arttırarak soyulmayı azaltmak,
- Bağlayıcının yaşlanmaya karşı direncini arttırmak,
- Kaplamada oluşan kusmayı ya da terlemeyi azaltmak,
- Her yönden kaplamanın performans özelliklerini yükselterek, uzun vadede kaplamanın ekonomik olmasını sağlamak [6].

3.2 Bitüm Katkı Maddeleri ve Katkılı Bitümlerden Beklenen Özellikler

Bitüm veya karışım modifikasyonunda kullanılacak olan katkıli bitümlerin ve katkı maddelerinin uygulama için uygun, ekonomik ve etkili olması açısından sahip olması için gerekli özellikler aşağıda verilmiştir [6,8,42].

- Kolay temin edilebilmelidirler,
- Asfalt ile homojen bir şekilde karışabilmelidir,
- Asfalt, karışım sıcaklığında özelliklerini kaybetmemelidir,
- Sıcaklığın düşük olduğu bölgelerde asfaltın sert ya da çok kırılgan olmamasını sağlamalıdır,
- Temin edilme maliyetleri daha ekonomik olmalıdır.

3.3 Bitüm ve BSK'ların Modifikasyonu İçin Kullanılan Katkı Maddeleri

Günümüzde modifiye karışım veya modifiye bitüm elde edebilmek amacıyla seçilen çok çeşitli katkıları bulunmaktadır. Bu katkı malzemeleri ticari ve atık malzeme olarak temin edilebilmektedir. Son yıllarda modifikasyon için yüksek fırın cürufı (YFC), silis dumanı, uçucu kül, katran, siyah karbon, SBS ve elyaflar gibi malzemeler en yaygın kullanılan katkı malzemeleridir [8,42]. Sıcak karışımlara eklenen çeşitli kimyasal katkı malzemelerinin kaplama üzerindeki olumlu etkileri Çizelge 3.1'de verilmektedir.

Çizelge 3.1: Sıcak karışımlara eklenen çeşitli kimyasal katkı malzemelerinin kaplama üzerindeki olumlu etkileri [6].

Kimyasal katkıların rolü	Kimyasal katkıları					
	Hidrate kil	Portland çimentosu	Manganez modifiyesi	Katyonik yüzey aktif ajanları	Sülfür	Organik polimer
Yaşlanma	x			x		
Nem hasarı	x			x		
Agrega bağlayıcı değişikliği			x			
İşlenebilirlik	x	x	x	x	x	x
Stabilite	x	x		x	x	x
Tekerlek izi	x	x	x		x	x
Soyulma	x		x			
Sertlik	x		x		x	

4. ATIKLAR VE LİTERATÜR ÇALIŞMALARI

Sanayileşme ve kentleşmeyle birlikte gelişen dünyada, doğal ve yapay kaynakların bilinçsiz tüketimi sonucunda atıklar meydana gelmektedir. Artan tüketimle doğru oranda artan atıklar birçok soruna sebep olmaktadır. Bu sorunların etkileri çok çeşitli olup genellikle çevresel tahribatlara, atıklara ait depolama alanlarının azalmasına, doğada yaşayan canlıların sağlığına karşı tehdit oluşturmaya ve aynı zamanda toplumun günlük yaşantısına da etki etmektedir. Çevrenin ve doğada yaşayan canlıların korunmasına yönelik hazırlanan çeşitli çevre koruma politikaları arasından en önemlisi atık yönetimidir. Atık yönetimi, üretilen çeşitli atıkların çevre ve insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkilerini ortadan kaldırarak ülke ekonomisi için bir kazanç sağlamayı hedeflemektedir [43,44].

Atık yönetiminin temel amacı; atık malzemelerin insan sağlığına ve çevreye verdikleri zararları önlemek, iş istihdamı oluşturmak, sürdürülebilirlik ve atıkların ülke ekonomisine kazanılmasını sağlamaktır [45,46]. Büyük çoğunlukla tanımlanan atık yönetim piramidinde; azaltma, önleme, geri dönüşüm, tekrar kullanım, atıkların bertaraf edilmesi ve enerji geri kazanımı bulunmaktadır [47-49].

Atık yönetiminin başarılı bir şekilde uygulanabilmesi ve atıkların ayrışması sonucunda açığa çıkan koku, görüntü kirliliği ve sera gazları gibi olumsuz çevresel faktörlerin ortadan kaldırılması için atıkların düzenli depolama bölgelerinde depolanması gerekmektedir. Düzenli depolama; atık sızıntı sularının ve atıkların bozunmasıyla açığa çıkan gazın atık depolama bölgelerinden uzaklaştırılması ve uygun alanlarda depolanmasını kontrollü bir şekilde sağlayan, özel olarak tasarlanmış bölgelerdeki depolama işlemleridir [50].

Düzensiz depolama ise gelişmemiş veya gelişmekte olan ülkelerde uygulanır. Bu depolama yöntemi, çevre ve insan sağlığı açısından çok tehlikeli olup, atıkların kontrolsüz bir şekilde rastgele doğaya bırakılmasıdır. Düzensiz depolamanın en nihai sonuçları; çevre kirliliği, görüntü kirliliği, salgın hastalıklar, böcek-haşere oluşumudur [51].

4.1 Geri Dönüşüm

Günümüzde hemen her alanda atıkların artmasıyla birlikte, bu atıkların yeniden işlenmesi ve kullanılması olarak ifade edilen geri dönüşüm, her alanda oldukça önem kazanmıştır [43]. Aynı zamanda tüketilen maddelerin yeniden farklı alanlarda geri dönüştürülerek kullanılması hammaddeye olan ihtiyacı da minimuma indirecektir. Geri dönüştürülebilen maddelerin tekrar hammadde olarak kullanılması yüksek oranda enerji tasarrufu elde etmek mümkündür [52].

Geri dönüşüm çalışmaları çoğunlukla gelişmiş ülkelerde yapılmaktadır. Gelişen ülkelerde ise bu çalışmaların başlatılabilmesi için doğal kaynaklardan maksimum fayda sağlanarak uzun vadede tüketilmesi ve aynı zamanda bütün sektörlerde atık israfının azaltılması, maddi değeri olan malzemelerin geri dönüştürülerek tekrar kullanılması gerekmektedir [43].

Doğal kaynakların hızla tüketilmesine ve teknolojik gelişmelere bağlı olarak, endüstriyel atıklarının, sanayi atıklarının ve demir-çelik sektöründe üretim sırasında elde edilen yan ürünler gibi atıkların miktarları yıllık olarak milyon tonlarla ifade edilen miktara ulaşmaktadır [53]. Bu nedenle doğal çevre tehlikeli bir biçimde bozulmakta, miktarı her geçen gün artan atıklara depolama alanları açılmasında sıkıntılar yaşanmaktadır. Doğru uygulamalar kullanılarak tekrardan kullanılabilme potansiyeline sahip atık maddeleri, atık olmaktan çıkarıp ürün olarak değerlendirmek sürdürülebilirliği desteklemek için çok önemlidir. Dünyada ve ülkemizde çok önemli yeri olan endüstriyel ve demir çelik sektörü atıklarının değerlendirilmesi ve yeniden ekonomiye kazandırılarak hammadde yerine kullanılması günümüzde ihtiyaç değil zorunluluk halini almıştır [43].

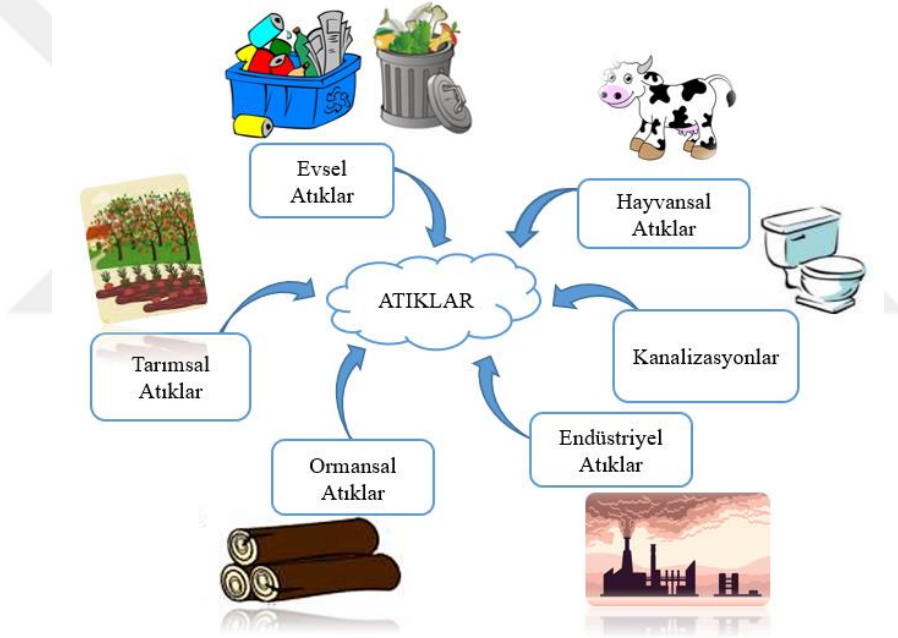
Son yıllarda, çevreyi ve iklimi olumsuz etkileyen endüstriyel alanlardaki bu durumu iyileştirmek için geleneksel uygulamaların kesinlikle değiştirilmesi gerektiği bildirilmektedir [54]. Bu nedenle, atık malzemelerle ilgili sürdürülebilirliği teşvik eden çeşitli yeni araştırma alanlarının oluşturulması ve geliştirilmesi gerekmektedir. Yeni araştırmalar, yeni üretim teknolojileri ve malzemeleri arayışına odaklanmıştır [55,56].

Yol yapımı maksadıyla agrega, bağlayıcılar ve dolgu malzemesi gibi doğal kaynaklar büyük oranlarda kullanılmaktadır. Bu kullanımın nihai sonucu olarak, doğal kaynak rezervleri azalmaktadır [57,58]. Bu nedenle karayolu uygulamalarında doğal malzemeler yerine kullanılabilinecek alternatif malzemelerin bulunması çok önemlidir [59,60]. Bu amaçla doğal agregalar yerine farklı atık malzemelerin kullanımının araştırılması gerekmektedir.

Ömrünü tamamlamış ve yeniden inşası gereken yollarda veya yeni inşa edilecek olan yollar yüksek oranda doğal malzeme kullanımı gerektirmektedir. Kısmen de olsa doğal kaynakların korunmasında, yüksek hacimlerde çevresel kirlilik oluşturan endüstriyel atıklar gibi son zamanlarda fazla miktarlarda açığa çıkan atık malzemelerin inşaat sektöründe, özellikle karayolu yapımında yararlı bir biçimde geri dönüşüm ihtiyacını ortaya çıkarmıştır [61].

4.2 Atık Çeşitleri

Yol yapımında katkı malzemesi olarak kullanılan atık malzemelerini, evsel atıklar, tarımsal atıkları, hayvansal atıklar, ormansal atıkları, kanalizasyon ve endüstriyel atıklar olarak altı grupta toplamak mümkündür. Şekil 4.1’de atık çeşitlerine ait şema verilmiştir.



Şekil 4.1: Atık çeşitleri.

4.2.1 Evsel atıklar

Evsel atıklar diğer bir deyişle kentsel çöpler, yerleşim yerlerinin yüz yüze geldiği en ciddi problemlerin başında yer almaktadır. Evsel atıklar, çoğunlukla organik atıklardan oluşmaktadır. Küçük bir kısmını ise plastik, cam, karton, kağıt, gibi atık malzemeler oluşturur (Şekil 4.2). Gün içerisinde yapılan tüm faaliyetlerin bir sonucu olarak mutfakta oluşan atıklar ve tehlikeli madde içeriği olmayan bütün malzemeler evsel atık olarak adlandırılmaktadır. Evsel atıklara örnek olarak, ambalaj atıkları, yiyecek atıkları, ev eşyası atıkları ve mutfak çöpleri verilebilir [62,63]. Evsel atıklar, yerleşim merkezleri için büyük

önem arz etmektedir. Bunun nedeni, hastalık yapıcı organizmalar için bu atıklar uygun ortam oluşturmaktadır. Dolayısıyla, bu atıkların bertaraf edilmesi oldukça önemlidir. Evsel atıklar geri kazanım, düzenli depolama ve yakma metotlarıyla bertaraf edilmektedir [64].



Şekil 4.2: Evsel atıklar.

4.2.2 Tarımsal atıklar

Türkiye de çoğu tarımsal mahsül atıkları, hasat sonrasında tarlalarda ya yakılmakta ya da çürümeye bırakılmaktadır. Atıkların yakılması, topraktaki hayvanların ve faydalı mikroorganizmaları yok eder. Aynı zamanda toprağın üst tabakasını yakarak bir takım fiziksel ve kimyasal değişikliklere de sebebiyet vermektedir. Ayrıca bu atıklar, aynı zamanda tarla ile ilgili yapılacak mekanizasyon çalışmalarına da bazen engel olabilmektedir [65,66]. Bu yüzden, çiftçileri anız yakma alışkanlığından vazgeçirme sebeplerden birisi de tarımsal artıkların (ek gelir kaynağı olarak) ekonomik açıdan geri dönüşümünü sağlamaktır.

Bu geri dönüşüm işlemi ise, tarımsal artıkların değerlendirilmesi yöntemleri ile ilgilidir. Bu yöntemlerden birisi tarımsal artıkların Termik Santrallerde yakıt olarak kullanılarak enerji elde edilmesidir. Tarımsal atık kökenli biyokütle enerjisinin temel ilkesi bitkisel atık ve/veya artıkların yakılması sonucunda açığa çıkan ısıdan enerji elde edilmesidir.

Pamuk atıkları, buğday-arpa atıkları, mısır atıkları, şekerpancarı atıkları tarımsal atıklara örnek olarak verilebilirler [67,68]. Şekil 4.3’de tarımsal atık ürünü olan mısır atıkları ve buğday-arpa atıkları gösterilmiştir.



Şekil 4.3: Tarımsal atık ürünü olan (a) mısır atıkları ve (b) buğday-arpa atıkları.

4.2.3 Hayvansal atıklar

At, keçi, sığır, hindi gibi hayvanlara ait dışkıları, mezbahadan çıkan atıklar ve hayvansal gıdaların işlenmesi esnasında açığa çıkan atıklar, hayvansal atık olarak adlandırılmaktadır (Şekil 4.4).

Hayvansal varlıkların faaliyetlerine bağlı olarak meydana gelen organik atıklar tükenmeyen kaynaklardır. Son yıllarda sürekli artan nüfus sayısına bağlı olarak, insanların tüketimi ile yakından bağlantılı olması açısından, organik kökenli atık ve artık maddelerin tükenmez olduklarını kabul etmemek mümkün değildir. Bu organik atıkların değerlendirilerek giderilmesi en uygun bertaraf yöntemi olarak kabul edilmektedir [69].



Şekil 4.4: Hayvansal atıklar.

4.2.4 Ormansal atıklar

Orman mahsülleri ve atıklarını kapsayan ormansal atıklar; yonga, ağaç kabuğu, talaş gibi ormanda meydana gelmiş atıklardır. Bu tür atıklar, çoğunlukla orman bölgelerinde atıl durumda olup başka maksatlar için kullanılmazlar. Aynı zamanda bulunduğu bölgede çürümeye terk edilirler [70].

Odun, ormansal ürünler arasında ilkel metotlarla yakacak olarak enerjiye dönüşümde ilk sırada bulunmaktadır. Odunun katı yakıt olarak kullanımıyla birlikte, biyokömür, çar elde edilme gibi amaçlar için kullanılmaktadır. Ayrıca, ikinci dünya savaşı dönemlerinde taşıtlarda yakıt olarak kullanımı da mevcuttur. Fakat tabiatın en önemli kaynaklarından bir olan ormanlarda odun tüketimi, ormansal kaynakların giderek azalmasına ve daha sonrasında tamamen tükenmesi ile çevresel ve sosyal birçok problemler ortaya çıkacağından dolayı Küba ile beraber bazı ülkelerde sınırlandırılmıştır [71]. Ormansal bir atık ürünü olan talaş ve yonga Şekil 4.5’de verilmiştir.



Şekil 4.5: Ormansal atık ürünü olan (a) talaş (b) yonga.

4.2.5 Kanalizasyon atıkları

Kanalizasyon suyu çoğunlukla; mutfak, banyo ve sanayi artığı sulardan oluşur (Şekil 4.6). Bu suların hastalık yapıcı mikroplar ihtiva etmesi ve rahatsız edici kokular yayması sebebiyle yerleşim bölgelerinden uzaklaştırılmak zorundadır. Uzaklaştırılan kirli sular boşaltıldığı yerde ve yayıldığı alanlarda da tehlike yaratabilir. Bu nedenle, kanalizasyon suyunun bir takım ön işlemlerden geçirildikten sonra atılması veya gerek temizlenen sudan gerekse kanalizasyon suyundan ayrılan katı kısımdan yararlanma imkanlarının araştırılması gerekmiştir. Böylelikle kaynakların korunması ve yeniden kullanılması sağlanmaktadır.

Belediyelerin önemli bir sorunlarından biri, kanalizasyon suyunun toplumca kabul edilebilir, ekonomik olarak elverişli ve insan sağlığına zararsız bir şekilde elden çıkarılmasıdır.

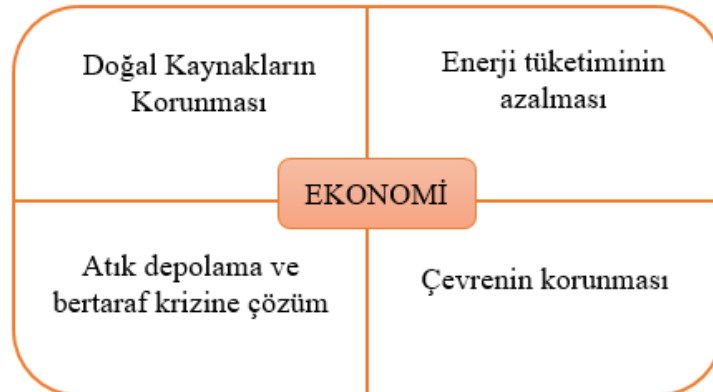
Türkiye'de kanalizasyon suyundan kurtulmada bugün için başvurulana başlıca yollar; kanalizasyon suyunun doğrudan akarsu, göl veya denizlere boşaltılması, sulamada kullanılması veya İskan bölgelerinden uzakta boş arazilere atılması şeklindedir. Bu durum, su toprak ve bitkilerin kirlenmesine bir takım hastalık ve rahatsızlıkların ortaya çıkmasına neden olabilmektedir [72,73].



Şekil 4.6: Kanalizasyon suyu ve atıkları.

4.2.6 Endüstriyel atıklar

Endüstriyel katı atıklar; kül, cürufklar, odun parçaları, metal parçaları, tekstil parçaları, cam kırıkları, hurda ve lastikler olarak çeşitlendirilebilir. Bu atıkların doğada oluşturduğu zararın engellenmesi amacıyla kaynağında ortadan kaldırılması ya da çevreye zarar verme ihtimalinin en aza indirgenmesi gerekmektedir [74]. Endüstriyel atıkların geri kazanımının çeşitli faydaları Şekil 4.7’de verilmiştir.



Şekil 4.7: Endüstriyel atıkların geri kazanımının faydaları.

Karayolu yapımında başta endüstriyel atık malzemeler olmak üzere kullanılabilen bazı atık malzemeler Çizelge 4.1’de verilmiştir [61].

Çizelge 4.1: Karayolu yapımında kullanılabilecek endüstriyel atık malzemeler [61].

Atıklar ürünü	Atık kaynağı	Kullanım yeri
Uçucu kül	Termik santraller	Bitümlü karışımlarda filler malzemesi, betonda bağlayıcı malzeme, temel zemini stabilizasyonu
Yüksek fırın cürufu	Çelik endüstrisi	Temel ve alttemel tTabakası, Taban zemini iyileştirme
Demir cürufu	Demir döküm endüstrisi	Dolgu malzemesi, betonda agrega olarak
Kaolin	Tuğla ve kiremit endüstrisi	Filler malzemesi, bitümlü karışımlarda agrega
Kömür külü	Kömür madenciliği	Filler malzemesi
Lastik atığı	Otomobil endüstrisi	Bitüm modifikasyonu, agrega

Önceki çalışmalar, farklı türdeki atıkların, karayolu üstyapı tabakalarında filler, katkı malzemesi ve agrega yerine potansiyel kullanımının araştırıldığını göstermektedir. Atıkların farklı türleri ve potansiyel özellikleri mevcut olmasına rağmen, madencilik ve demir-çelik sanayisinin ürünü olan atık haldeki cüruflar, termik santrallerin ürünü olan baca külünün geniş kullanım ve araştırma aralığına sahiptirler [57,58].

Uçucu kül, kömürle çalışan enerji ve buhar santrallerinde kömür tozunun yakılmasıyla üretilen ve egzoz gazları tarafından yanma odasından uzaklaştırılan ince bir atık ürünüdür. Kömür tozu havayla birlikte doğrudan ısıнын üretildiği kazanın yanma odasına üflenir. Baca kullanılarak kazandan ısı alındığında erimiş mineral kalıntısı sertleşerek küle dönüşür. Cüruf veya taban külü adı verilen kaba kül kısımları yanma bölümünün tabana düşer. Uçucu kül adı verilen daha küçük kül kısımları baca içinde asılı kalır. Bu kül, filtre bezleri ya da elektrostatik çöktiriciler benzeri parçacık emisyonunu sınırlayan cihazlarla giderilir. Taban külü ise kazan tabanında biriken cüruflara denir. Uçucu kül, önemli oranda geçirgenlik, yüksek CBR değeri, yüksek kesme mukavemeti, daha hızlı konsolidasyon oranına, az sıkıştırılabilir ve hafif olması gibi özelliklere sahiptir. Bu özellikler yardımıyla, rijit ve yarı rijit beton tasarımlarında, tabi zeminin iyileştirilmesinde ve BSK'larda filler malzeme yerine geçebilir [57-58,61,75-76].

Demir cürufu, demir endüstrisinin bir yan ürünü olarak açığa çıkar. Bu cüruf içerisinde önemli miktarda demir ve kalsiyum içermektedir. Aynı zamanda magnezyum ve sönmemiş kireç benzeri silikat ve oksit bileşenlerini de bünyesinde barındırır. Partikül ebatları 80 mm'den 300 mikrona kadar değişkenlik gösteren iç yapısında boşluklu ve sert bir yapı hakimdir. Bu malzeme granül taban zeminlerde filler malzemesi ve agrega yerine kullanılabilir. Ancak bu maddelerin sızdırılabilir ve kirletici bir malzeme içeriğinin olup

olmadığı araştırılmalıdır. YFC ile kıyaslandığında kireç ve silika az olduğundan yüksek oranda kalsiyum ve demir oksit içerir [57,58].

Kömür tozu, kömür madenciliği ve kömür madenlerinin işlenmesi sırasında ortaya çıkarılan artık bir maddedir. Yanmamış halde bulunan kömür külüyle kıyaslandığında daha büyük bir mukavemet değerine sahiptir. Yanmış halde olan kömür tozu ise altyapı uygulamalarında, atık stoklama bölgelerinde, yol yapımında ve taşkın koruma alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır [57,58,61].

Araç sayısı her geçen gün arttıkça ömrünü tamamlamış ve parçalanmış, atık durumunda olan lastiklerin miktarları da artmaktadır. Lastiklerin çeşitli kimyasal içeriğinden dolayı çevreye atılması veya yakılması doğada çok geniş ölçeklerde hasarlara sebebiyet verebilir. Fakat son yıllarda kullanılmaz hale gelen lastikler öğütülerek yol üstyapısında karışımın ya da bitümün iyileştirilmesi amacıyla modifikasyonda kullanılmaktadır [77,78].

Yüksek fırın cürufu, metal veya çelik imalatı yapan kuruluşların elektrik ark ocağından eritilmesi esnasında yan ürün olarak ortaya çıkar. Kimyasal birleşen olarak kireç, silikat ve alüminosilikatlardan meydana gelir. Aynı zamanda yapısında döküm külü ve metal oksit de içerebilen endüstriyel bir atık malzemedir. Çimentoyla benzer özelliklere sahiptir. Aynı zamanda, fiziksel şekli havayla soğutma veya ıslatılarak soğutulma yoluyla, büyük oranda toplama yöntemine bağlıdır. Cüruflar, ıslama yöntemi ile soğutulduğunda boyutları çoğunlukla çakıl boyutlarındadır. Çimentoyla benzer olmaları, daha düşük bütçe gereksinimine ve neme maruz kaldıklarında sertleşmeleri nedeniyle yol yapılarında alt zeminini stabilize etmek amacıyla çimentoya alternatif bir bağlayıcı olarak kullanılabilirler [57,76,79,80].

Cüruflar, kübik tane şekli, pürüzlü yüzey doku ve keskin kenarlı yapısına sahiptir. Bu özellikleri sayesinde bitümlü bağlayıcıyla arasındaki aderansın daha yüksek olmasını sağlar. Ayrıca belirlenecek uygun karışım gradasyonu ile birlikte BSK'ların içsel sürtünme dayanımını geleneksel agregalara nazaran büyük ölçüde arttırmaktadır. Bu özelliğinden dolayı endüstriyel tesislere giden yollarda, araçların yoğun kullandığı park bölgelerinde, aşınma direncinin büyük olduğu kaldırımlarda ve kavşaklarda yaygın olarak kullanılmaktadır [81,82].

Cüruflar, farklı soğutulma yöntemlerinden dolayı farklı özelliklere sahiptir. Havada yavaşça soğutulduğunda kristal bir yapı oluşur. Bu şekilde oluşan cüruflar, yüksek mekanik

özelliklere sahip olur. Genellikle agreganın yerine kullanılır. Günümüzde bu şekilde en fazla açığa çıkan cüruf çeşidi ferrokrom cürufudur [83].

4.2.6.1 Ferrokrom cürufu (FeCR)

Ferrokrom, ısıya dayanımı yüksek çelik üretiminde kullanılan ve genellikle paslanmayan bir metal bileşiğidir (Şekil 4.8). Atık bir malzeme olan FeCR ise ferrokrom üretilen santrallerin elektrik-ark ocaklarından işlem sonucu ortaya çıkar (Şekil 4.9) [83,84].



Şekil 4.8: Granül haldeki FeCR.

Ferrokrom cürufu soğutma sisteminin, açığa çıkan cürufun özellikleri üzerinde çok büyük bir etkisi vardır. Açığa çıkan cürufun boyutu ve kristallik derecesi büyük oranda soğutma sistemine bağlıdır. Çoğunlukla kullanılan hızlı soğutma yönteminde, kristal yapıya sahip, boyut olarak küçük (≤ 5 mm) ve koyu renkli taneler üretilir. Gözenekli ve pürüzlü bir yüzey yapısıyla sonuçlandığı için, su emilimi ve performans stabilitesi açısından kullanıldığı malzemeyi olumsuz yönde etkileyebilir. Bundan dolayı soğutma sisteminin FeCR'nin fiziksel özellikleri üzerindeki etkileri uygulama yapılmadan önce özenle incelenmelidir [85-88].



Şekil 4.9: FeCR’ nin elde edilmesi.

Diğer bir FeCR soğutma şekli olarak hava soğutmalı yöntem kullanılır. Bu yöntemde genellikle daha büyük boyutlarda (8 ila 20 mm) cüruf üretimi yapılır. Gri renkte ve yumrulu bir dokuya sahiptir. Her iki yöntemde de cürufun yapısı kısmen kristal kısmen de camsıdır. Fakat kristallik derecesi hava soğutmalı FeCR’ de daha yüksektir. Bu şekilde üretilen cüruflar yüksek mekanik özellikleri gösterirler. Genellikle agrega olarak kullanılır. FeCR’lerin büyük çoğunluğunun hava bazlı soğutma sistemi kullanılarak üretildiği rapor edilmiştir. Bu tür cüruflar daha çok çimentolu sistemlerde, çimento ve beton üretiminde kullanılır [83-87].

Dünyada en büyük krom rezervine sahip ülkeler arasında Çin ve Güney Afrika başta gelmektedir. Çin’de FeCR’ nin mevcut üretim sürecinde, üretilen her 1 ton ferrokrom alaşımı için yaklaşık 2,5 ton ila 2,6 ton arasında kromit tüketilmektedir. Bu tüketim sonucunda 1 ton ila 1,2 ton ferrokrom cürufu üretilmektedir. Bu nedenle ferrokrom alaşımlarının yıllık üretimi göz önüne alındığında , ferrokrom cürufunun yıllık üretiminin kabaca 6-8 milyon ton olduğu tahmin edilebilir. Bu da küresel üretimin %50'sinden fazlasını oluşturur [85,87,88].

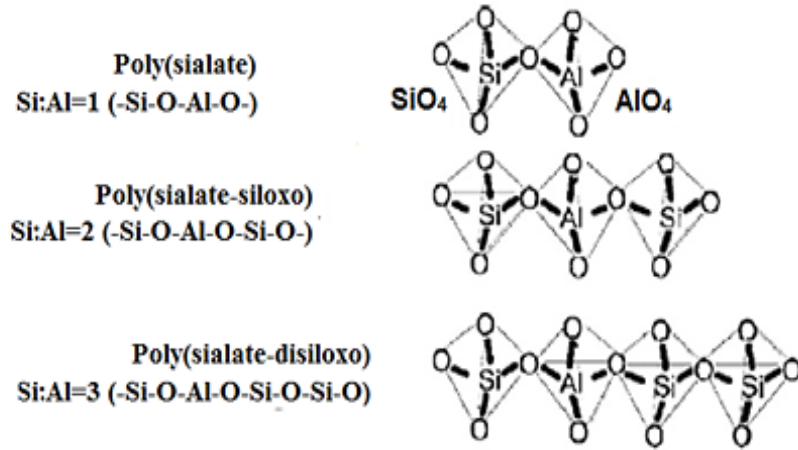
Türkiye’de ise iki bölgede endüstriyel ölçüde FeCR çıkmaktadır. Bu bölgelerden birisi ‘Elazığ ETİ Ferrokrom İşletmesi’ diğeri ise ‘Antalya Ferrokrom işletmesi’ dir. Ferrokromun işlenmesi sonucunda her 3 kg ferrokrom başına 1 kg cüruf atığı ortaya çıkmaktadır. Antalya

Ferrokrom İşletmesinden bir yılda neredeyse 35.000 bin ton, Elazığ ETİ Ferrokrom İşletmesinden ise yılda takribi 225.000 ton Ferrokrom (FeCr) cüruf atığı elde edilmektedir. Bu cürufların neredeyse tamamı depolama tesislerinde depolanmaktadır. Bugüne kadar cüruflar, ciddi bir şekilde değerlendirilmemiştir. Açık arazilerde depolanan bu cüruflar, önemli oranda çevresel kirlilik meydana getirmektedir [82,83].

4.2.6.2 Geopolimer

Geopolimer tarihte ilk kez 1978 yılında Fransız bilim adamı, Davidovits tarafından ortaya çıkmıştır [89]. Davidovits, geopolimerizasyon işlemiyle, alkali çözelti ve alümina içeriğiyle birlikte zengin silika içeren kaynak malzemelerden oluşturulan kristalin olmayan yapıya sahip inorganik bir malzeme olan bir geopolimer keşfetti. Bu, oda sıcaklığındaki silikon ve alüminyum açısından zengin malzemeleri, alkali bir ortamda kimyasal olarak birleştiren bir geosentez işlemidir [90-93].

Davidovits'a göre, kimya ve reaksiyon mekanizması (Şekil 4.10), termal olarak aktive edilmiş kaolinin (metakaolin) alkaline bir çözelti içinde hidroksilasyonu ve çoklu yoğunlaşmasından kaynaklanmıştır. Böylece, geopolimerler, metakaolin, uçucu kül, cüruf vb. gibi bir alüminosilikat kaynağının, esas olarak silikon, alüminyum ve oksijen olmak üzere uzun menzilli ve kovalent bağlı atomlardan oluşan alkaline aktivatörlerle aktivasyonu ile sentezlenir. Sodyum veya potasyum silikatlar gibi alkaline reaktifler geopolimerizasyon için oldukça faydalıdır [90-95].



Şekil 4.10: Davidovits'a göre geopolimerin oluşum yapısı [96].

Şekil 4.10 incelendiğinde, görülen mineral kimyasal bileşik sırasıyla; poly (sialate) (Si-O-Al-O), poly (sialate-siloxo) (-Si-O-Al-O-Si-O) ve poly (sialate-disiloxo) (-Si-O-Al-O-Si-O-Si-O-) olarak 3 farklı tekrar eden yapıdan meydana gelmektedir. Geopolimer oluşum

ağında, silis-sialat (Si-O-Al-O-Si-O-Si-O), ferro-sialat (-Fe-O-Si-O-Al-O-) veya aluminofosfo (-Al-O-PO-) gibi bileşimleri alkali ortamda hızlı bir şekilde gerçekleştiren, polimerizasyon işlemiyle kimyasal bir reaksiyon oluşturur. Oluşan kimyasal reaksiyon sonunda Si-O-Al-O bağ yapısından oluşan halkalı ve 3 boyutlu şekilde polimerik zincir yapıda yeni bir madde oluşur [90-96].

Son yıllarda, alkaliyle aktifleştirilen malzemelerin gelişimi, çevresel faydalarından dolayı geniş çapta araştırılmaktadır. Geopolimerlerin kimyasal bileşimi zeolitlere benzer ancak mikro yapıları amorfudur. Geopolimerizasyon işlemi, çok çeşitli atık malzemelerinin inşaat malzemeleri için kullanılabilecek faydalı bağlayıcılara dönüştürülmesi için etkili bir yöntemdir. Geopolimerlerin sentezi için çok sayıda doğal olarak oluşan ve endüstriyel olarak üretilen alüminosilikatlar kullanılmaktadır. Geopolimer üretmek için yaygın olarak kullanılan malzemeler uçucu kül ve cüruf gibi endüstriyel yan ürünlerdir [97].

Geopolimerlerin üretimi, geleneksel inşaat malzemelerine göre çok daha düşük karbon ayak izi ile sonuçlanır. Karbondioksit (CO₂) ve çevreye zararlı diğer maddelerin emisyonunun azaltılmasına ve aynı zamanda atıkların kullanılmasıyla doğal kaynakların korunmasına olanak tanır. Ayrıca, geopolimerizasyon süreci farklı atık maddelerin, hammadde olarak kullanılmasına da olanak sağlar [98].

Geopolimerlerin mükemmel mekanik özelliklere, yangına dayanıklılığa ve asit dayanıklılığına sahip olduğu iyi bilinmektedir. Geopolimerlerin ticari uygulamaları şu anda sınırlı olsa da, araştırma ve geliştirme faaliyetlerindeki son artış, bu malzemelerin daha geniş kabul görmesini kolaylaştırabilir [91-93].

4.3 Literatür Çalışmaları

Atıklar (ormansal, tarımsal, endüstriyel, evsel, hayvansal ve kanalizasyon suları) biyokütle kaynaklarının büyük çoğunluğunu oluşturan karbon (C) esaslı malzemelerdir. Bu malzemeler günümüzde çeşitli yöntemlerle geri dönüştürülmeye ya da ortadan kaldırılmaya çalışılmaktadır. İnsanoğlunun yaşamını sürdürebilmesi ve ekolojik dengenin korunabilmesi için bu kaynakların en verimli şekilde değerlendirilmesi, hem doğal kaynakların tüketilme hızını azaltmada hemde bu malzemelerin çevreye vermiş olduğu zararı azaltmada çok önemli rol oynamaktadır.

Atık malzemelerin kullanıldığı çalışmalar incelendiğinde, bu kaynakların çoğunlukla yapı alanında kullanıldığı görülmüştür. Ancak özellikle son yıllarda, karayolu mühendisliğinde

bu kaynaklar bitüm/kaplama performansını arttırmak amacıyla da kullanılmaya başlamıştır. Yapılan bu çalışmalarda, ferrokrom cürufu'nun çoğunlukla beton içerisinde kullanıldığı, ancak bitümlü sıcak karışım kaplamalarda çok az çalışmada kullanıldığı ve bu çalışmalarda da çok az miktarda ikame edildiği görülmüştür. Genel olarak endüstriyel kaynaklı atık malzeme olan ferrokrom cürufu'nun kullanıldığı çalışmalar aşağıdaki gibi kısaca özetlenmiştir.

Lind vd. (2001) tarafından yapılan bu çalışmada, Batı İsveç'teki Vargön Alaşım İşletmesi'nden çıkarılan FeCR'nin fiziksel özellikleri araştırılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda FeCR'nin bileşimi ve çözünme deneyleri, normal şartlarda çözünme miktarının az olmasına karşılık, kromun yüzdesinin %1-3 arasında olduğu ortaya çıkmıştır. Potansiyel çözünme kabiliyeti yaklaşık %16 potasyumun dışında, çinko, nikel, krom ve öteki elementlerinde çözünme verileri oldukça düşüktür. Çalışma sonucunda FeCR'nin yol yapım malzemesi olarak kullanılmasının oldukça uygun olduğu sonucuna varılmıştır [99].

Erşimşek (2006), yaptığı çalışmada enjeksiyon metoduyla üretilen granül FeCR katkılı betonların fiziksel özelliklerini araştırmıştır. Numuneler üzerinde Los Angeles ağırlık kaybı, donma-çözülme ve basınç dayanımı deneylerini gerçekleştirmiştir. Çalışmasında beton içerisinde 0-4 mm agregaya yerine granül haldeki FeCR ve 4-19 mm agregaya yerine doğal agregaya kullanmıştır. Beton numunelerde granül haldeki FeCR katkı içeriğini %10, %20 ve %30 oranlarında belirlenmiştir. Yapılan deney sonuçlarını incelendiğinde, granül haldeki FeCR içeriğinde artış oldukça beton numunelerinin aşınma ve donma-çözölmeye karşı basınç dirençlerinde artış meydana geldiği görölmüştür [100].

Yılmaz ve Kök (2009), yaptığı çalışmalarında FeCR'nin BSK'da agregaya yerine kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Bu çalışmada FeCR, sıcak karışım ve kaba agregaya bütün agregası olarak kullanılmıştır. Aynı zamanda modifiye edilmiş olan styrene-butadiene-styrene (SBS) bağlayıcısının FeCR ilave edilen BSK'larda meydana getirdiği etkiler gözlemlenmiştir. Hazırlanan numunelere sünme rijitliği, indirek çekme mukavemeti, indirek çekme rijitlik modülü ve Marshall stabilite ve akma deneylerine tabi tutulmuştur. Sonuç olarak, iri agregaya yerine FeCR kullanılmış olan karışım numunelerine yapılan tüm deney sonuçlarında en iyi sonuç değerlerine ulaştığı gözlemlenmiştir. Sonuç olarak FeCR'nin BSK'lar da agregaya yerine kullanılmasının uygun olabileceği belirtilmiştir [101].

Yılmaz ve Karaşahin (2010), BSK'larda agregaya yerine ferrokrom cürufunun kullanılmasının uygunluğunu araştırmışlardır. Yapılan çalışmada, FeCR'nin kimyasal ve fiziksel nitelikleri

belirlemişlerdir. Kireçtaşı ve FeCR katkılı agrega ile yapılan numunelerin fiziksel özelliklerini de tespit etmişlerdir. Bu çalışmada numuneler üzerine basınç, aşınma, CBR, donma direnci ve tekrarlı yükler altında üç eksenli yorulma testleri uygulanmıştır. Kireç taşı agregasına göre, FeCR'nun fiziksel ve mekanik özelliklerinin daha iyi sonuçlar verdiği belirtilmiştir [102].

Erdoğan (2011), bu çalışmada ilk kez, toz bağlayıcı yerine sadece öğütülen FeCR içeren jeopolimer hamurlar ve harçların elde edilmesini araştırmıştır. Yapılan çalışmada, belirlenen kür koşulları ve karışım yüzdelerinin hazırlanan harçların özelliklerine etkileri de değerlendirilmiştir. Hamur numuneleri ve sertleşmiş harç asite ve çeşitli bozucu kimyasallara maruz bırakılmıştır. Bu işlem sonucunda daha az bozulmanın meydana geldiği numunelerin portland çimentolu numuneler olduğu ifade edilmiştir. Herbir numune 1100°C sıcaklıkta ısıtılmış ve belirlenen süre boyunca o sıcaklıkta tutulmuştur. Tekrar soğutululan numunelerde gözlemlenen direnç kayıpları portland çimentolu numunelerinkine göre çok daha düşük miktarda elde edilmiştir. Ayrıca bazı numunelere ait basınç dayanımlarının da artma meydana geldiği ifade edilmiştir [103].

Maraş (2013), Elazığ Ferrokrom Cürufu (EFC)'nu, çimentonun büyüklüğünde öğütüp, alkali katkısıyla aktive ettikten sonra, bağlayıcı özelliği olan bir jeopolimer karışımı oluşturmayı amaçlamıştır. Bu amaçla, ilk olarak jeopolimer hamurlarını 3 değişik silis modülü (0.50, 0.60 ve 0.70) ve 4 farklı sodyum oksit içeriğiyle (%4, 7, 10 ve 12) üretmiştir. Jeopolimer katkılı numunelerde hidrasyon ısı, basınç dayanımını ve priz süresi incelemiştir. Priz süreleri 120 ile 870 dakika arasında, çeşitli Na₂O oranlarına bağlı olarak değişiklik göstermiştir. Silis modülü 0.70 ve 28 günlük en yüksek basınç dayanımı Na₂O içeriği %7 olan jeopolimer beton numunelerinden elde etmiştir. Çimento yerine jeopolimer katkılı bağlayıcı kullanılarak, çeşitli oranlarda su(w)/bağlayıcı(b) (0.30, 0.35 ve 0.40) ve 3 farklı kür şartlarında harç numuneleri üretilmiştir. Genellikle jeopolimer harç numunelerin w/b oranının artmasıyla birlikte basınç dayanımlarının azaldığı gözlenmiştir. 28 günlük maksimum basınç dayanımı w/b oranı 0.30 olan jeopolimer katkılı numuneler, laboratuvar şartlarında kür yapılan numunelerden elde edilmiştir. Agrega ve hazırlanan bağlayıcı madde kullanılarak jeopolimer katkılı beton numuneleri üretilmiştir. Daha sonra üretilmiş olan jeopolimer beton numunelere ait sülfat dirençlerini ve basınç dayanımlarını (3, 7 ve 28 gün) incelemiştir. Jeopolimer beton numunelerden en yüksek basınç dayanımı değeri 35 MPa olarak belirlenmiştir. Jeopolimer beton numunelerinin ağırlık değişimi, boy değişimi, çeşitli magnezyum sülfat çözeltileri içerisinde (ağırlıkça %3, %5 ve %7) basınç dayanımı, görsel

görünümü ve pH değişimi incelenmiştir. Bu numunelerin magnezyum sülfata karşında yüksek bir dayanım gösterdiği gözlenmiştir. Ek olarak, bu numunelerin dış görünüşünde hiçbir deformasyon meydana gelmediği ifade edilmiştir [104].

Kantarıcı (2013), çalışmasında, EFC'yi çimento boyutunda öğütmüş ve aktivatör (NaOH ve Na_2SiO_3 karıştırılmaları sonucunda açığa çıkan) ile birleştirerek bağlayıcı niteliğinde bir malzeme oluşturmuştur. Agregat ve elde ettiği bağlayıcı malzemeyi kullanarak geopolimer beton numuneler üretilmiştir. Üretilen geopolimer beton numunelerin basınç dayanımları (3, 7 ve 28 gün), bazı fiziksel özellikleri, yangın dayanımları (100, 200, 300, 400, 500, 600 ve 700 °C) ve mikro yapıları incelenmiştir. Yapılan deney sonuçlarını incelediğinde, aktivatör ve EFC kullanılarak hazırlanan dere agregalı geopolimer beton numunelerde 28 günlük basınç dayanımı değerinin yaklaşık 35 MPa olduğunu görülmüştür. Bu değer aynı kür şartlarına maruz bırakılarak hazırlanan normal Portland çimentolu beton numunelerden bulunan basınç dayanım değerinden (31.8 MPa) daha büyük olduğunu ifade edilmiştir. Yangın sonrasında basınç dirençlerinde ise kontrol numunelerine bakıldığında, tüm karışımlarda 100 °C ve 300 °C sıcaklıklarda bu değerlerde artış olduğu gözlenmiştir. Beton numunelerin hepsinde 700 °C'de en az basınç dayanımı verdiği belirtilmiştir [105].

Taşgın (2014), FeCR, cam tozu ve mermer tozu atıklarının üst yapılarda kaplamada filler malzemesi yerine uygulanabilirliğini araştırmıştır. Ayrıca geleneksel şekilde elde edilerek, kullanılan kırmataş agregası tozuyla da bir kıyaslama yapmıştır. İlk olarak optimum bitüm içeriği, farklı bağlayıcı oranları uygulanarak yapılan Marshall stabilite deney sonuçlarına bakılarak belirlemiştir. FeCR, cam ve mermer atıkları ve kırmataş tozu ile farklı bağlayıcı oranlarında hazırlanan numuneler Marshall stabilite deneyine tabi tutulmuştur. Yapılan bu deney sonucuna bakılarak stabilite, pratik özgül ağırlık, agregalar arası boşluk yüzdesi, asfaltla dolu boşluk yüzdesi ve akma sonuçlarının değişim grafikleri belirlenmiştir. Daha sonra optimum asfalt içeriğine bakılarak, farklı filler malzeme oranlarını kullanarak Marshall stabilite deneyleri sonucu değerlendirilmiştir. Aynı zamanda kırmataş numunelerinin deney sonucuyla bir kıyaslama yapmıştır. Deney sonuçlarını incelediğinde; kullanılmış olan bütün atık malzemelere ait optimum asfalt içeriği % 5.78 ile % 5.99 arasında değişkenlik göstermiştir. Stabilite sonucunda, en yüksek değer FeCR katkılı numunelerde olduğunu gözlemlenmiştir [106].

Kalkan (2017), çalışmasında üretilmiş olan geopolimer katkılı beton numunelerinde bağlayıcı yerine Elâzığ'da bulunan Ferrokrom işletmesine ait atık mamulü olan Elazığ Ferrokrom cürufunu (EFC) kullanmıştır. 45 mikronun altında öğütülmüş olan EFC; sodyum

metasilikat ve sodyum hidroksit karışımları alkali-aktivatörler aracılığıyla aktive etmiştir. Ayrıca dere agregası ile beraber karıştırılıp, geopolimer katkılı beton numuneleri üretmiştir. Geopolimer katkılı numunelerinin silis modülleri 1.25, 1.50 ve 1.75 olarak belirlenmiştir. Ek olarak bağlayıcı malzeme olarak %10 ve %20 oranlarında silis dumanı katkılı beton numuneleri üretilmiştir. Böylece toplam 9 adet geopolimer katkılı beton numune grubu üretmiştir. Herbir numunenin çeşitli kürleme sıcaklıklarında (23, 40, 60, 80 ve 100 °C) ve çeşitli kürleme sürelerinde (24, 48, 72 ve 96 saat) basınç dayanımları belirlenmiştir. Bütün sonuçlar incelendiğinde, sıcaklık ve kür süreleri arttıkça basınç dayanım değeri de artma olduğu görülmüştür. Fakat silis dumanı katkılı numunelerde yüksek kür sıcaklıklarında fiziki formlarında bazı bozulmalar oluşması sebebiyle basınç dayanımlarında azalma meydana geldiği belirlenmiştir. Numunelere ait en büyük basınç dayanım değeri (20.23 MPa) %100 EFC ile hazırlanan, 96 saat ve 100 °C de kür edilmiş ve silis modülü 1.25 olan numunelerde ulaşıldığı ifade edilmiştir [107]

Mahamaya vd. (2018), alt zemin iyileştirmesinde kullanılan kendiliğinden yerleşen betonda çimento ve uçucu kül yerine FeCR kullanımının uygun olup olmadığını araştırmışlardır. FeCR üstünde X-ışını kırınım (XRD) analizi, X-ışını floresan (XRF) etkisi, elektriksel iletkenlik, basınç, optik mikroskop görüntüsü, termal iletkenlik ve toplam çözünmüş katı miktarı (TDS) deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Hazırlanmış olan kendiliğinden yerleşen beton karışım numuneleri ve stabilize zemin numunelerine uygulanan deney sonuçlarını incelediklerinde, FeCR'nin uçucu kül ve çimentonun alternatifi olarak betonun içinde kullanılabileceğinin uygun olduğunu belirlemişler [108].

Özcan (2018), bu çalışmada, bağlayıcı madde olarak yüksek fırın cürufu (YFC) ve Elazığ ferrokrom cürufu (EFC) kullanılmış ve geopolimer katkılı beton numuneleri üretmiştir. Bu numunelerin sülfat, asit ve tuz reaksiyonlarına karşı dayanıklılığını incelemiştir. Bunun için EFC olarak ağırlık oranınca %0, %25, %50, %75 ve %100 değerlerinde YFC ilave edilerek 5 farklı tür katkılı numune üretmiştir. 28 günlük kür periyodundan sonra geopolimer beton numuneleri 12 hafta boyunca %5'lik fosforik asit, hidroflorik asit, magnezyum klorür, magnezyum sülfat, hidroklorik asit, sodyum sülfat, sülfürik asit ve sodyum klorür çözeltileri içerisine konulmuştur. Bu sırada bütün numunelere ait basınç dayanımını, uzunluk ve ağırlık değişimleri ve ultrasonik ses hızlarını (UPV) belirlemiştir. Aynı zamanda içyapılarını, görsel değişimleri ile incelemiştir. Deney bulguları incelendiğinde, geopolimer katkılı beton numunelerin basınç dayanımları sırasıyla; magnezyum sülfat, sülfürik asit,

fosforik asit, hidroklorik asit, magnezyum klorür, sodyum sülfat, hidroflorik asit ve sodyum klorür çözeltilerinde en yüksek etkiyi gösterdiğini belirtmiştir [109].

Dash ve Patro (2018), su soğutmalı FeCR'nin geleneksel beton agregasının %50'si yerine kullanılıp kullanılamayacağını araştırmışlardır. Hazırlanan numunelere yapılan performans deney sonuçları, %30'a kadar doğal agreganın alternatifi olarak kullanımının beton mukavemetinde olumsuz bir etkisi olmadığı görülmüştür. Fakat %30'dan yüksek miktarlarda betonun dayanımında azalmalar meydana geldiğini belirlemişlerdir [110].

Al-Jabri (2018), üstyapı çeşitlerinde, FeCR'nin alt temel ve temellerde agrega olarak uygulanabilirliğini araştırmıştır. Bunun için ilk olarak fiziksel ve mekanik özelliklerini belirlemiştir. Daha sonra FeCR'nin doğal agregaya kıyasla daha iyi sonuç verdiğini ifade etmiştir. Atık bir malzeme olan FeCR'nin doğal agreganın yerine esnek ve rijit üstyapılarda, alt temel ve temellerde kullanılmasının uygun olacağını ifade etmiştir. Ek olarak, FeCR'nin bu şekilde değerlendirilmesinin çevresel kirliliği önemli ölçüde önlenebileceğini savunmaktadır [111].

Yıldırım (2019), yaptığı bu çalışmada, doğal taban numunesinin içerisindeki kaolin kilinin ağırlık oranınca FeCR'nu %0, %5, 10, %15, %20 ve %25 oranlarında karıştırarak katkılı numuneler hazırlamıştır. Daha sonra kaolin kilinin indeks özelliklerini belirlemiştir. Hazırladığı numunelere kompaksiyon deneyleri yaparak, optimum su muhtevasına sahip numunelerin kuru birim hacim ağırlıklarını belirledi. Karışım oranlarına belirlenmiş olan su muhtevasında preslenmiş her bir numune 1-7-28 gün sürelerle kür yapılmaya bırakılmıştır. Kür süresini tamamlayan numunelere Kaliforniya Taşıma Gücü (CBR) deneyleri uygulanarak taşıma gücündeki değişiklikler belirlenmiştir. Nihayetinde taşıma gücü oranı yetersiz olan zeminin yüksek taşıma gücüne ulaştığı belirtilmiştir. FeCR ve bağlayıcı kombinasyonu ile birlikte, yüksek CBR değeri nedeniyle stabilizasyon malzemesi olarak kullanılabileceği belirlenmiştir. Aynı zamanda puzolonik özelliğinden dolayı çimentonun taşıma kapasitesinin zaman içerisinde artması muhtemeldir [112].

Topaloğlu (2019), ferrokrom cüruf agregalarının geçirimli asfalt karışımlarında kullanımının tespit edilmesi amacıyla, KTŞ'de tanımlanan Tip-2, Tip-3, Tip-4 şeklinde üç çeşit gradasyon seçmiştir. FeCR ile hazırlanan karışım numunelerine ait tasarım kriterlerini incelemiştir. Karışım numuneleri monotip polimer bağlayıcı (PMB 76-16) kullanarak hazırlamıştır. Değişik asfalt içerikleriyle hazırlanmış olan numunelere permeabilite, dolaylı çekme mukavemeti, nem hasarına karşı direnç, boşluk analizi ve Cantabro aşınma kaybı gibi

tasarım deneylerini gerçekleştirmiştir. Deney sonuçlarından, Tip-2' ye ait numunelerin permeabilite ve boşluk ölçümleri en düşük limit değerlerinin epeyce aşağısında kaldığı görülmüştür. Ayrıca hidrolik geçirgenliğin en yüksek düzeyinin Tip-3 karışımlarında tespit edildiği belirtilmiştir. Deney sonunda Tip-3 ve Tip-4 karışımlarında birbirine yakın değerler belirlenmiştir. Hazırlanan karışımlara ait optimum bağlayıcı oranı sırasıyla %6.50 ve %6.00 olarak tespit edilmiştir. FeCR ve kireçtaşı agregasının sonuç değerleri kıyaslandığında, geçirimli asfalt karışımların tasarım kriterlerini fiziksel özellikleri açısından FeCR'nin iyileştirdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca geçirimli asfalt kaplamalarda agrega yerine kullanılabileceğini ortaya koymuştur [113].

Özdal (2019), bu çalışmada, bağlayıcı malzeme olarak Yüksek fırın cürufu (YFC) ve Elazığ ferrokrom cürufu (EFC) kullanarak geopolimer betonları üretmiştir. Hazırladığı numunelerin donma-çözülme tesirlerine karşı dayanımlarını incelemiştir. Bunun için EFC olarak ağırlık oranınca %0, %25, %50, %75 ve %100 oranlarında YFC ilave edilmiş ve 5 farklı türde geopolimerli beton numuneleri hazırlamıştır. 28 günlük kür periyodundan sonra geopolimer beton numuneleri 50 çevrimden 300 çevrime kadar suda donma-çözülme etkisine tabi tutulmuştur. Deney sonuçlarını incelediğinde, en yüksek basınç dayanımı değeri E0 grubu numunelerden elde edilmesine rağmen, EFC oranının artmasıyla birlikte basınç dayanımının düştüğünü gözlemlenmiştir [114].

Aslan (2022), çalışmada alkali aktivasyonlu cüruf bağlayıcıların uygulamalardaki kullanımına engel teşkil eden hızlı işlenebilirlik kaybı ve düşük priz süreleri problemlerinin çözümü için boraks ve süperakışkanlaştırıcı katkı kullanımını incelemiştir. Alkali aktive edilmiş harç üretimi için ağırlıkça %90, %80 ve %70 oranında Elazığ ferrokrom cürufu ve ağırlıkça %10, %20 ve %30 oranında F tipi uçucu kül kullanmıştır. Alkali aktivatör olarak katı fazda sodyum hidroksit (NaOH) (18 ve 22 molarite) ile sıvı fazda sodyum silikat (Na_2SiO_3) çözeltisi kullanmıştır. NaOH/ Na_2SiO_3 oranı 1/2 sabit değerinde tutulmuştur. Aktivatör/bağlayıcı oranı ise 0.35, 0.40 ve 0.45 olarak alınmıştır. Boraks ve süperakışkanlaştırıcı katkıları ağırlıkça %0, %3 ve %6 oranlarında tercih edilmiştir. Elde edilen deney sonuçları Taguchi metoduyla analiz edilmiş ve parametrelerin optimum seviyelerini belirlemiştir. Elde edilen verilere göre boraks ve süper akışkanlaştırıcı katkılarının alkali aktivasyonlu karışımlar üzerinde priz geciktirici etkisinin olduğu ve işlenebilirlik üzerinde olumlu katkılar sağladığını tespit etmiştir. En yüksek basınç dayanım değerini ise 24.27 MPa olarak elde etmiştir [115].

Tang vd. (2022), yaptıkları bu çalışmada, daha önce gerçekleştirmiş oldukları çalışmanın devamı niteliğinde, geopolimeri WMA’larda kullanarak Marshall tasarım yöntemine göre, bu bağlayıcılarla hazırlanan sıcak karışım numunelerinin yüksek sıcaklıklardaki performans özelliklerindeki etkileri dinamik stabilite deneyiyle tespit edilmek istenmiştir. Deney sonucuna göre, Marshall tasarım yöntemi ile hazırlanan karışım numuneleri içerisinde boşluk içeriğinin aynı yüzdede geopolimer katkılı bağlayıcı kullanılmasıyla %0.32 oranında azalma meydana geldiğini göstermiştir. Aynı zamanda geopolimer katkısının tekerlek izi oluşumuna karşı direnci arttırdığı söylenebilir. Yapılan bu çalışma sonuçlarında, ağırlık oranınca %3 oranında geopolimer katkısının partikül madde emisyonlarında ciddi ölçüde azalış meydana getirdiği de bulunmaktadır [116].

İbrahim vd. (2017), bu çalışmalarında, geopolimer modifiye edilmiş bağlayıcının su emilimini ve mekanik özelliklerini incelemiştir. Bunun için, B80/100 bağlayıcı içerisine ağırlık oranınca %3, %5, %7 ve %9 yüzdelerde geopolimer katkısı (karıştırma tekniği olarak eriyik karıştırma kullanılmıştır) ikame edilmiştir. Geopolimer katkısı için optimum oranın %5 olduğu belirlenmiştir. Geopolimer katkılı bağlayıcılar üzerinde darbe ve sertlik deneyleri yapılarak mekanik özellikleri incelenmiştir. Çalışma sonucunda, saf bağlayıcı numunelerine göre geopolimer katkılı bağlayıcı numunelerinin, sertliğini ve mukavemetini sırasıyla %82 ve %108'e kadar bir artış gösterdiği görülmüştür [117].

Sonuç olarak, FeCR katkılı geopolimerin BSK’larda kullanımının uluslararası literatürde geopolimer uygulamasının oldukça yeni ve sınırlı olduğu, ulusal literatürde ise hiç yer almadığı görülmektedir. Yapılmış olan bu çalışmalarda ise çoğunlukla geopolimer malzeme üretimi zemin iyileştirme ve beton çalışmalarında olduğu gibi işlemlere (kürleme vs.) maruz bırakılmış ve yapılan deneylerin hayli sınırlı olduğu belirlenmiştir. Bu tez çalışmasında ise, uygulanan prosedürlerden ve gerçekleştirilen sınırlı çalışmalardan farklı olarak, geopolimer üretimi sıcak karışım numunesi hazırlandığı esnada karışım içerisinde gerçekleştirilmeye çalışılmış ve elde edilen geopolimer katkılı karışım numuneleri Marshall stabilite, dinamik ve statik sünme, dolaylı çekme yorulma ve dolaylı çekme rijitlik modülü (ITSM) deneylerine maruz bırakılmıştır.

5. MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada, ferrokrom cürufundan (FeCR) elde edilen geopolimerin bitümlü sıcak karışımların (BSK) performansına etkileri araştırılmıştır. Bu amaç doğrultusunda, önce B50/70 bitümünün ve karışımda kullanılan kırmataş agreganın geleneksel özellikleri belirlenmiştir. Ardından, saf karışım numuneleri Marshall karışım tasarım yöntemine göre hazırlanmış ve optimum bitüm içeriği “OBİ” belirlenmiştir. Sonra, karışıma filler olarak eklenecek FeCR’nin (fillerin ağırlıkça %25, %50, %75 ve %100 oranlarında) ve alkali aktivatör (optimum FeCR’nin ağırlıkça %8’i) oranı tespit edilerek FeCR ve geopolimer (FeCR+AA) katkılı modifiye karışım numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan saf, FeCR ve geopolimer katkılı karışımların bitümlü sıcak karışımların performans özelliklerindeki etkilerini tespit etmek için BSK numunelerine statik ve dinamik sünme, Marshall stabilite ve akma, dolaylı çekme yorulma ve dolaylı çekme rijitlik modülü (ITSM) testleri uygulanmıştır.

5.1 Materyal

5.1.1 Agregas

Marshall karışım dizaynında kullanılan kırmataş kalker agregası Elazığ Karayolları 8. Bölge Müdürlüğünden temin edilmiştir (Şekil 5.1). Kullanılan agregas malzemesinin fiziksel özellikleri Çizelge 5.1’de, gradasyonu Çizelge 5.2’de verilmiştir. Agregaya ait gradasyon eğrisi ise Şekil 5.2’de verilmiştir.



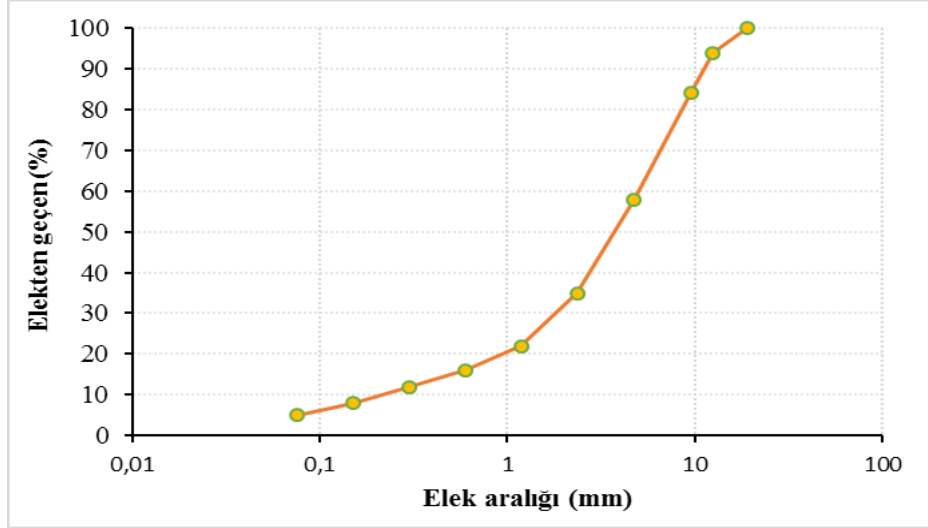
Şekil 5.1: Agregat

Çizelge 5.1: Agreganın fiziksel özellikleri.

Deney	Standart	Limit	Değer
Kaba agregat zahiri özgül ağırlık (gr/cm^3)	ASTM C 127	-	2.76
Kaba agregat hacim özgül ağırlık (gr/cm^3)		-	2.68
Kaba agregat su emme yüzdesi		Maks.2	0.98
İnce agregat zahiri özgül ağırlık (gr/cm^3)	ASTM C 128	-	2.83
İnce agregat hacim özgül ağırlık (gr/cm^3)		-	2.64
İnce agregat su emme yüzdesi		Maks.2	1.49
Filler zahiri özgül ağırlık (gr/cm^3)	ASTM D 854	-	2.68
Aşınma Kaybı (Los Angeles) (%)	ASTM C131	Maks.30	26
Donma Kaybı (MgSO_4) (%)	ASTM C88	Maks.10	6
Yassı ve uzun parçalar (%)	ASTM D 4791	Maks.10	6

Çizelge 5.2: Agregat malzemesine ait gradasyon.

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 5.2: Agrega gradasyon eğrisi.

5.1.2 Asfalt bağlayıcı

Bu çalışmada, B 50/70 penetrasyon sınıflı asfalt bağlayıcısı kullanılmıştır. Saf bağlayıcı (Şekil 5.3), Elazığ Karayolları 82. Şube Müdürlüğü asfalt üretim şantiyesinden tedarik edilmiştir. Bitümün özellikleri Çizelge 5.3’de verilmiştir.



Şekil 5.3: Saf bitüm (B50/70).

Çizelge 5.3: Saf bitümün özellikleri.

Deney	Standart	Limit	Sonuç
Penetrasyon (0.1mm)	EN 1426	50-70	50.6
Yumuşama noktası (°C)	EN 1427	46-54	53.8
Düktilite (cm)	TS 119	Min. 100	>100
Parlama noktası (°C)	EN 22719	Min. 230	245
Yanma noktası (°C)	-	-	258
Özgül ağırlık (gr/cm ³)	TS 1087	1.0 – 1.1	1.035
Viskozite (135°C)	ASTM D4402	-	487.5
Viskozite (165°C)	ASTM D4402	-	150
Karıştırma sıcaklığı (°C)	-	-	170
Sıkıştırma sıcaklığı (°C)	-	-	163

5.1.3 Ferrokrom cürufu (FeCR)

Bu çalışmada, katkı malzemesi olarak kullanılan ferrokrom cürufu Elazığ’ da bulunan Eti Krom ferrokrom üretim tesisinden (Şekil 5.4) temin edilmiştir. Ferrokrom cürufu (FeCR), ferrokrom üretimi yapan santrallerin elektrik-ark fırınlarının proses sonucunda ortaya çıkan atık bir maddedir (Şekil 5.5). Kullanılacak olan agrega boyutuna göre kırma ve sonrasında eleme işlemi gerçekleştirilir. Bununla birlikte, ferrokrom cürufunun genel özellikleri Çizelge 5.4’de verilmiştir.



Şekil 5.4: FeCR’ nin elde edilmesi.



Şekil 5.5: Ferrokrom cürufu (FeCR).

Çizelge 5.4: FeCR' nin kimyasal özellikleri [105].

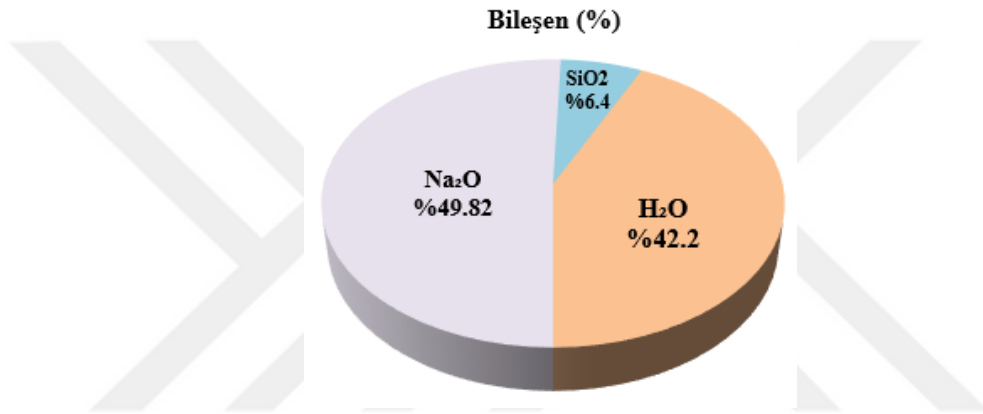
Birleşim (%)	FeCR
SiO ₂	33.80
Al ₂ O ₃	25.48
Fe ₂ O ₃	0.61
CaO	1.10
MgO	35.88
Cr ₂ O ₃	2.12

5.1.4 Alkali aktivatör (AA)

Çalışmada, geopolimer katkılı karışımlar hazırlanırken, ferrokrom cürufu katkılı agrega karışımı ve saf bitümün karıştırılması esnasında alkali aktivatör olarak sodyum silikat (cam suyu) eklenmiş ve karışım numuneleri hazırlanmıştır. Kullanılmış olan sodyum silikat'ın (Şekil 5.6), kimyasal bileşenleri Şekil 5.7'de ve fiziksel özellikleri Çizelge 5.5'de verilmiştir.



Şekil 5.6: Sodyum silikat.



Şekil 5.7: Sodyum silikat (cam suyu) içeriği.

Çizelge 5.5: Sodyum silikata ait özellikler.

Özellik	Sodyum silikat
Molekül formülü	Na ₂ SiO ₃
Molekül ağırlığı (g/mol)	182.18
Renk	Beyaz
pH	11.00– 12.65
Yoğunluk (g/cm ³)	1.36 – 1.44

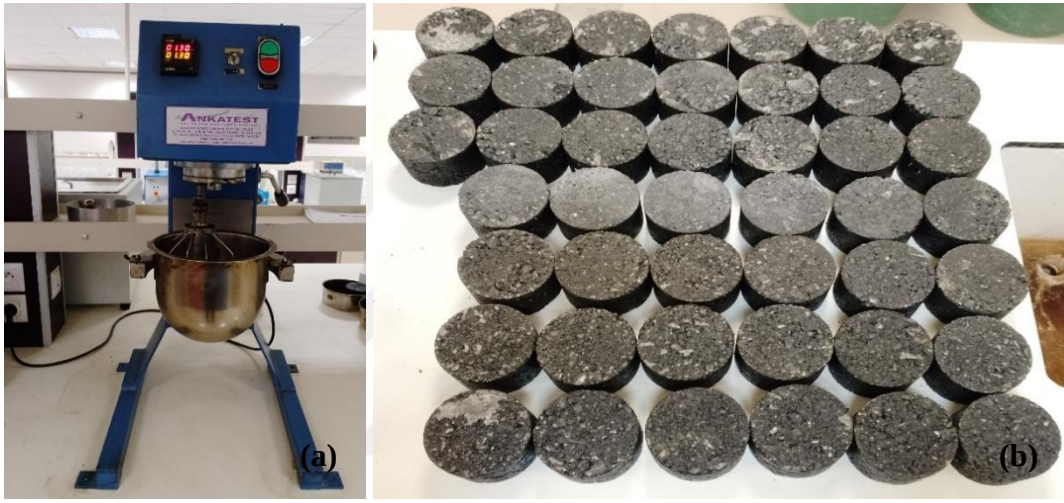
5.2 Metot

5.2.1 FeCR katkılı bitümlü sıcak karışımların hazırlanması

Çalışmada, ferrokrom cürufu katkısının sıcak asfalt karışımların performans özellikleri üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla ASTM D1559'a göre saf bitüm ile Marshall dizayn yöntemi esas alınarak sıcak karışım numuneleri hazırlanmıştır. Bunun için, ilk olarak saf B50/70 penetrasyon sınıflı bitüm kullanılarak karışım tasarımı için gerekli olan optimum

bitüm içeriği (OBİ) belirlenmiştir. Belirlenen OBİ baz alınarak, karışım içerisindeki filler yerine ağırlıkça %25, %50, %75 ve %100 oranlarında FeCR ikame edilerek FeCR katkılı karışım numuneleri hazırlanmıştır. Her bir karışım numunesinin hazırlanmasında bitüm ve 1200 gr agrega 170 °C sıcaklıkta ısıtılmıştır. Agrega ile bitüm mikser ile karıştırıldıktan sonra, yüksekliği 457 mm olan serbest tokmak vasıtasıyla numunenin her bir yüzeyine 75 vuruş olmak üzere toplamda 150 vuruş uygulanarak numuneler sıkıştırılmıştır. Çalışmada, tüm numuneler aynı işlem sırasına tabi tutulmuştur.

Çalışmada, saf ve ferrokrom cürufu katkılı sıcak asfalt karışımların hazırlanması aşamasında kullanılmış olan karıştırma cihazı ve hazırlanan briket numuneleri Şekil 5.8’de verilmiştir.



Şekil 5.8: (a) Karıştırma cihazı (b) briket numunelerinin bir kısmı.

5.2.2 Geopolimer katkılı bitümlü sıcak karışımların hazırlanması

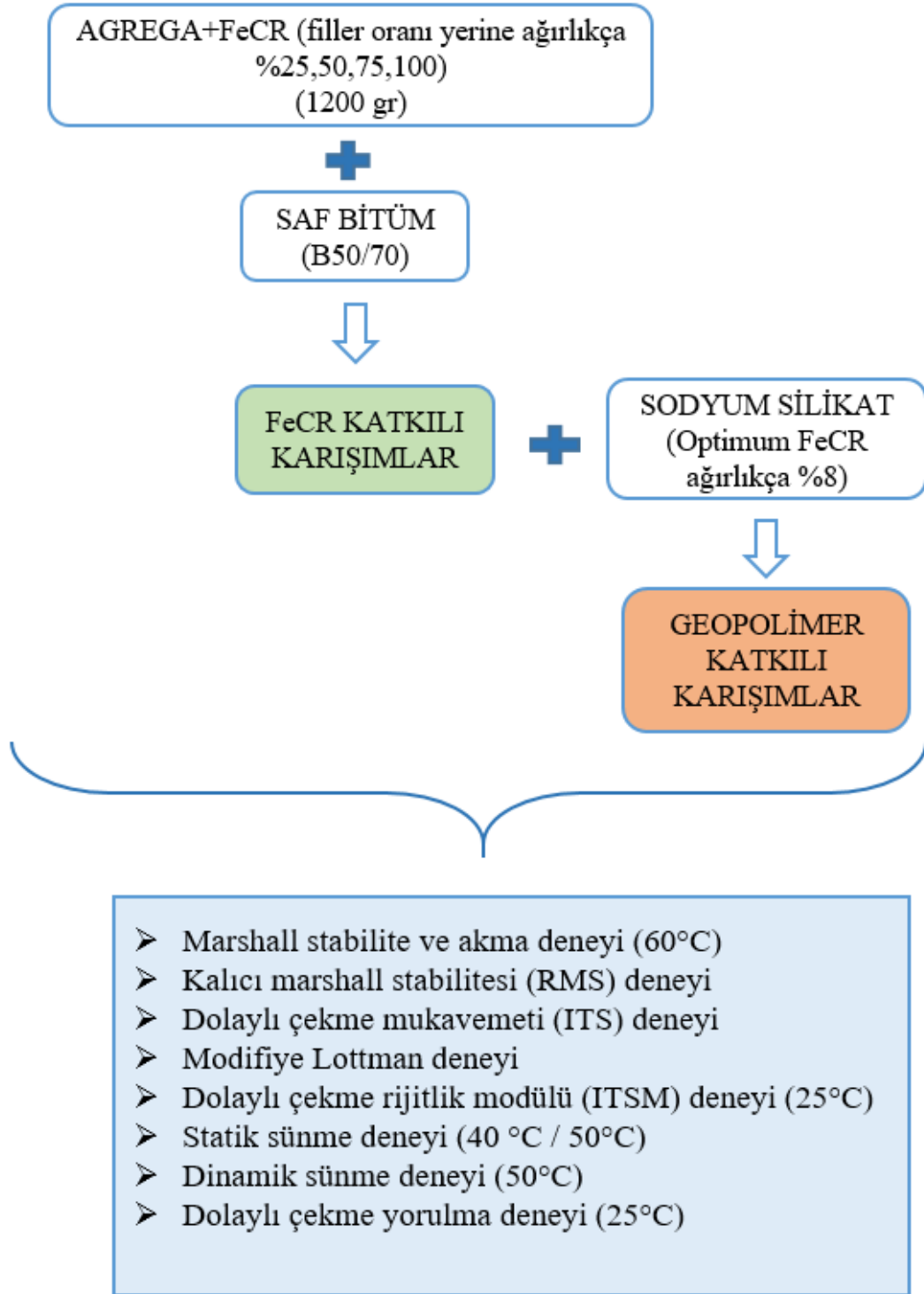
Çalışmada geopolimer katkılı karışım numuneleri elde etmek amacıyla ilk olarak optimum FeCR oranı (%50) tespit edilmiştir. Ardından bu oran esas alınarak bitüm içerisine FeCR’ye göre ağırlıkça %4, %6, %8 ve %10 oranlarında sodyum silikat (AA) ilave edilmiş ve Marshall karışım yöntemine göre karışım işlemi gerçekleştirilip geopolimer katkılı briket numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler, hem kimyasal hem de stabilite testine tabi tutularak optimum alkali aktivatör oranı (%8) olarak belirlenmiştir. Daha sonra bir dizi geopolimer katkılı karışım numuneleri hazırlamak için, yine OBİ esas alınmış ve %25, %50, %75 ve %100 FeCR ikameli ve %8 AA katkılı briket numuneleri hazırlanarak bu numuneler geopolimer katkılı numuneler olarak belirlenmiştir.

Yapılan bu çalışmada FeCR ve geopolimer ikameli BSK numuneleri ile saf numuneler Çizelge 5.6 olduğu gibi kodlanmıştır. Aynı zamanda, bu çalışmada saf, FeCR ve geopolimer

katkılı sıcak karışım numunelerine uygulanan işlemler Şekil 5.9’da verilen akış şeması adımları takip edilerek gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 5.6: Hazırlanan bütün karışım numunelerinin kodlamaları.

Karışım türü	Kodlama
B 50/70 + Agregat	S
B 50/70 + Agregat + %25 FeCR ikameli	F 25
B 50/70 + Agregat + %50 FeCR ikameli	F 50
B 50/70 + Agregat + %75 FeCR ikameli	F 75
B 50/70 + Agregat + %100 FeCR ikameli	F 100
B 50/70 + Agregat + %25 FeCR ikameli + %8 AA	G 25
B 50/70 + Agregat + %50 FeCR ikameli + %8 AA	G 50
B 50/70 + Agregat + %75 FeCR ikameli + %8 AA	G 75
B 50/70 + Agregat + %100 FeCR ikameli + %8 AA	G 100



Şekil 5.9: Sıcak karışım numuneleri için akış şeması.

6. DENEYSEL BULGULAR

Bu tez çalışmasında, saf, FeCR ve geopolimer ikameli sıcak karışım numunelerinin statik ve dinamik sünme, Marshall stabilite ve akma, dolaylı çekme yorulma ve dolaylı çekme rijitlik modülü (ITSM) deneyleri ile performans özellikleri belirlenmeye çalışılmıştır.

6.1 Sıcak Karışım Numunelerinin Hazırlanması

Çalışmada, Marshall karışım dizaynı kullanılarak hazırlanan numunelere her bir bağlayıcı yüzdesi için üçer adet numune hazırlandı. Hazırlanmış olan numuneler için seçilen bitümün oranı, kurutulmuş olan agreganın ağırlıkça yüzdesi (%4, %4,5, %5, %5,5 ve %6) alınarak belirlendi. Kaplarda tartılmış olarak hazırlanan agregalar 170 °C sıcaklıkta, saf asfalt ise karıştırma sıcaklığında (170 °C) etüvde ısıtıldı. Agregası hızlı bir şekilde etüvden çıkarılarak karıştırma kabınının içerisine dökülerek tam orta kısmına bir çukur açıldı. Ardından açılan çukura etüvde ısıtılan saf bitüm belli bir oranda döküldü. Agreganın tamamının saf bağlayıcı ile kaplayıncaya dek karıştırma cihazında karıştırıldı. Bu karıştırma işlemi yaklaşık olarak 1-2 dk içinde gerçekleştirildi. Agregası, bitüm ve kalıpların belirlenen sıcaklıkta ısıtılması Şekil 6.1’de verilmiştir.



Şekil 6.1: (a) Agreganın etüvde ısıtılması (b) bitüm ve kalıpların etüvde ısıtılması.

Karıştırma işlemi sonunda, öncesinde temizlenmiş ve 170°C ısıtılan kalıplara, karıştırılmış malzeme dökülmeden önce, kalıbın tabanına kalıbın çapı kadar kesilen aydinger kağıdı yerleştirildi. Malzeme içerisinde ayrışma olmayacak şekilde önceden ısıtılmış bir kürek kullanılarak malzeme kalıba yerleştirildi. Kalıba yerleştirilen malzeme sıcak cam çubuk ile hızlı bir şekilde 15 kere kenarlara ve 10 kere orta kısma olacak şekilde şişleme işlemi yapıldı. Numunenin yüzeyine yeniden aydinger kağıdı yerleştirildi ve numune, sıkıştırılması için Marshall tokmağının alt kısmına düzgün bir şekilde konuldu. Her bir numuneye 457 mm. yüksekten serbest şekilde düşen bir tokmakla ön yüzüne 75 kez, arka yüzüne 75 kez olacak şekilde toplamda 150 kez vuruş yapıldı. Şekil 6.2’de numunenin sıkıştırılması için kullanılmış olan Marshall tokmağı ve sıkıştırılmış numunelerin bir kısmı verilmiştir.

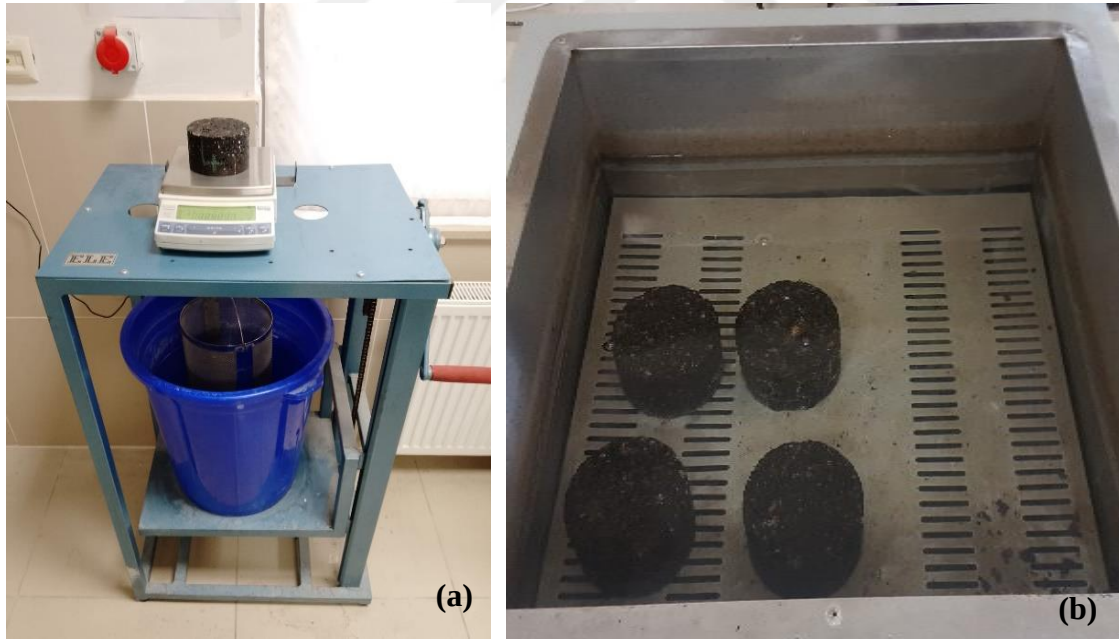
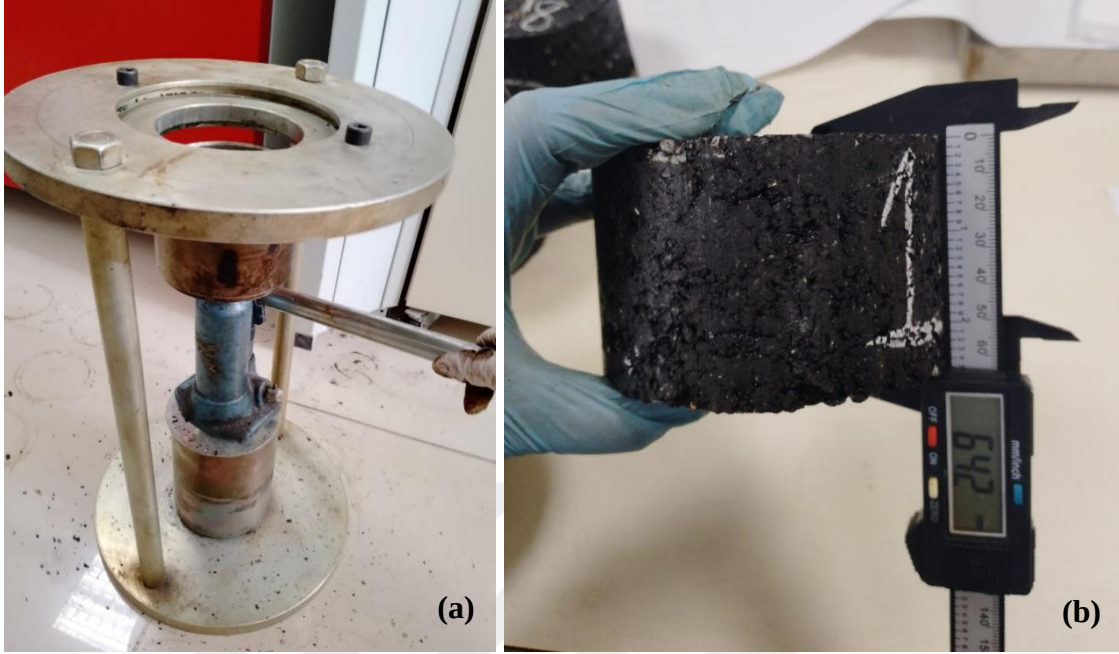


Şekil 6.2: (a) Numunenin Marshall tokmağında sıkıştırılması (b) kalıpta bekletilmesi.

Hazırlanmış olan briket numuneleri 24 saat kalıpta bekletildi ve ardından bir kriko yardımıyla kalıplardan çıkartıldı (Şekil 6.3a). Numuneler kalıptan çıkarıldıktan sonra üst ve alt yüzeyleri, spatula sayesinde daha düzgün bir yüzey elde edildi. Her bir numuneye ait yükseklik değerleri bir kumpas ile minimum üç farklı noktadan ölçülerek not edildi (Şekil 6.3b).

Yükseklikleri alınan briket numunelerinin ilk önce havadaki kuru ağırlıkları tartılarak kaydedildi. Ardından her bir numune Arşimet terazisinde sudaki ağırlıkları alınarak (Şekil 6.4a), sudaki numuneler alındı. Sudan çıkarılmış olan numuneler doygun bir duruma gelebilmesi için 3-5 dakika süre boyunca su banyosu içerisinde bütün yüzeyi suyla temas edecek şekilde su içerisine bırakıldı (Şekil 6.4b). Bu süreyi dolduran numuneler bir havlu

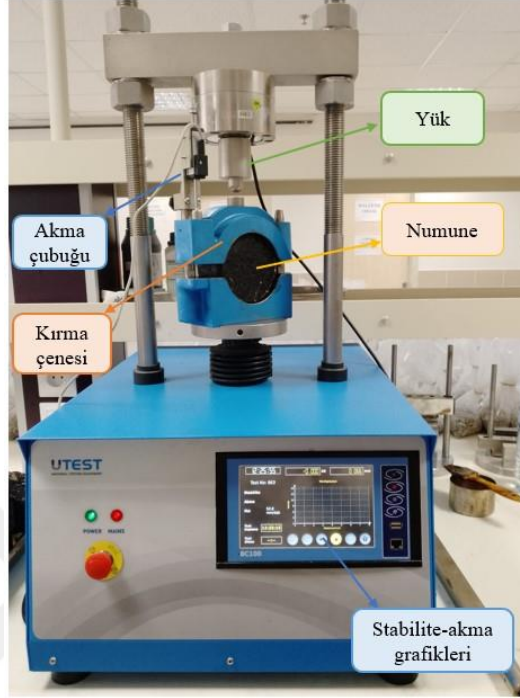
yardımları ile hiçbir yüzeyinde parlaklık olmayıncaya kadar kurutulup ardından tartıldı. Böylelikle numunenin suya doygun kuru yüzey ağırlığı tespit edildi.



Şekil 6.4: (a) Numunelerin arşiment terazisinde ağırlıklarının alınması (b) su banyosunda numunelerin bekletilmesi.

Deney için hazır durumda olan briket numunelerinin akma ve stabilite değerlerinin bulunabilmesi için her bir numune 60 °C sıcaklıkta, 30-40 dk. boyunca suda bekletildi. Suyun içinden çıkarılmış olan her bir numune Marshall stabilite cihazının içine düzgün bir

şekilde yerleştirildi (Şekil 6.5) ve akma çubuğu sabitlendi. Ardından cihaza gerekli değerler girilerek yükleme başlatıldı. Maksimum stabilite değeri ve bu değere denk gelen akma değeri Marshall cihazına otomatik şekilde gösterilerek kaydedildi.



Şekil 6.5: Numunelerin Marshall stabilite deneyine tabi tutulması.

6.2 Optimum Bitüm İçeriğinin Belirlenmesi

Optimum bitüm içeriğinin (OBİ) tespit edilmesi için karışım içerisinde kullanılması planlanan agrega oranı sabit tutulup, agreganın ağırlık değerinin %4 - %4,5 - %5 - %5,5 - %6 yüzdelerinde saf bağlayıcı ilave edilerek her bir yüzde için üçer tane, toplamda ise 15 tane numune hazırlandı. Her bir numunenin suda, doymun ve havadaki ağırlıkları belirlenerek, birim hacim ağırlıkları ve hacimleri hesaplandı. Ardından, Denklem 6.1-6.14 kullanılarak numunelerin çeşitli hacimsel özellikleri belirlenmiştir.

$$V = B - C \quad (6.1)$$

$$D_p = A/V \quad (6.2)$$

$$D_{port} = (D_{p1} + D_{p2} + D_{p3})/3 \quad (6.3)$$

$$W_a = (W_B/W_A) \times 100 \quad (6.4)$$

$$W_b = [(W_B/W_A + W_B)] \times 100 \quad (6.5)$$

$$G_{sb} = 100 / [(\%K/G_k - h) + (\%I/G_i - h) + (\%F/G_f - z)] \quad (6.6)$$

$$G_{sa} = 100 / [(\%K/G_k - z) + (\%I/G_i - z) + (\%F/G_f - z)] \quad (6.7)$$

$$D_t = 100 / [(100 - W_b/G_{se}) + (W_b/G_b)] \quad (6.8)$$

$$G_{se} = (G_{sb} + G_{sa})/2 \quad (6.9)$$

$$V_h = [(D_t - D_{port})/D_t] \times 100 \quad (6.10)$$

$$V_b = (P_{be} \times D_{port})/G_b \quad (6.11)$$

$$V_a = 100 - (V_h + V_b) \quad (6.12)$$

$$V_{ma} = 100 - V_a = (V_h + V_b) \quad (6.13)$$

$$V_f = (V_b/V_{ma}) \times 100 \quad (6.14)$$

Formüllerde;

W_a : Agregaya göre seçilen bağlayıcı %'si

W_b : Karışıma göre seçilen bağlayıcı %'si

W_A : Toplam agregaya ağırlığı (1200gr)

W_B : Bağlayıcı ağırlığı (agregaya göre)

A : Havadaki kuru ağırlık

B : Doygun-yüzey kuru ağırlık

C : Sudaki ağırlık

V : Numunenin hacmi

D_p : Numunenin pratik hacim özgül ağırlığı

D_{port} : Numunelerin ortalama pratik hacim özgül ağırlığı

D_t : Numunenin teorik maks. özgül ağırlığı

V_h : Numunedeki boşluk yüzdesi

V_b : Numunedeki efektif bitüm hacmi %'si

V_a : Numunedeki agregaya hacmi %'si

V_{ma} : Agregalar arasındaki boşluk %'si

V_f : V_{ma} 'nın bağlayıcı dolu boşluk %'si

P_{be} : Agregaya ağırlığına göre efektif bağlayıcı %'si

G_{sb} : Agregaya hacim özgül ağırlığı

G_{sa} : Agregaya zahiri özgül ağırlığı

G_{se} : Agregaya efektif özgül ağırlığı

G_b : Asfalt özgül ağırlık (gr/cm^3)

%K: Karışımdaki iri agregaya %'si

%İ: Karışımdaki ince agregaya %'si

%F: Karışımdaki filler %'si

Hazırlanmış olan numuneler içerisinde %4 oranında saf bitüm içeren 1. numuneye dair bütün hesaplar ve ölçümler aşağıda verilmiştir. Hazırlanmış olan briket numuneleri sırasıyla

Marshall Stabilite ve akma deneyine tabi tutularak belirlenen verilerin hepsi kaydedilmiştir. Opmimum bitüm içeriği için stabilite ve akma değerleri ile hacimsel hesaplamalarının bütün sonuçları Çizelge 6.1’de verilmiştir. Aynı zamanda, bulunan değerlerle bağlantılı olarak % bağlayıcı grafikleri Şekil 6.6’da verilmiştir.

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

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

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

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

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

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

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

$$V = 1240.73 - 708.62 = 532.1 \text{ cm}^3$$

$$D_p = 1233.8 / 532.1 = 2.319 \text{ gr/cm}^3$$

$$D_{p_{ort}} = (2.319 + 2.333 + 2.344) / 3 = 2.332 \text{ gr/cm}^3$$

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

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

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

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

$$V_h = [(2.527 - 2.332) / 2.527] \times 100 = 7.73$$

$$V_b = (3.85 \times 2.332) / 1.035 = 7.88$$

$$V_a = 100 - (7.73 + 7.88) = 84.38$$

$$V_{ma} = 100 - 84.38 = 15.62$$

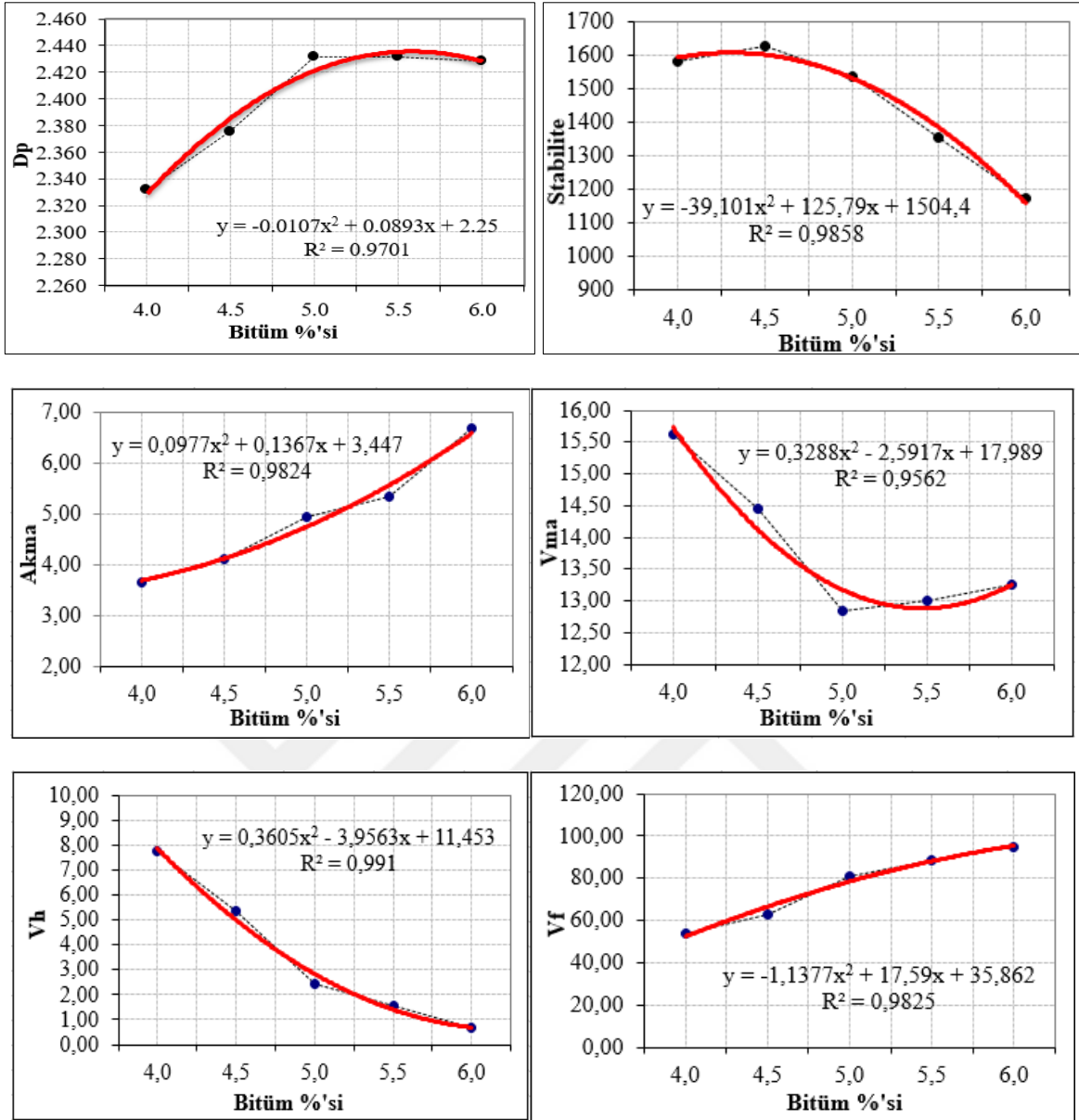
$$V_f = (7.88/15.62) \times 100 = 50.48$$

Çizelge 6.1: 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 ³)	Dp (gr/cm ³)	Dt (gr/cm ³)	Vh (%)	Vb (%)	Va (%)	Vma (%)	Vf (%)
				1	2	3	Ort										
1	4.0	3.85	48.00	65.3	64.8	65.3	65.13	1233.8	708.62	1240.73	532.1	2.319					
2				65.6	65.7	64.8	65.37	1237.3	709.66	1240	530.3	2.333					
3	3.64	3.50		64.6	65.3	65.4	65.1	1237.7	712.36	1240.42	528.1	2.344					
Ortalamalar																	
4	4.5	4.31	54.00	64.7	64.2	65	64.63	1243.1	721.07	1244.72	523.7	2.374					
5				63.4	65	64.3	64.5	1240.2	720.8	1241.04	520.2	2.384					
6	4.14	3.96		64.7	64.5	64.3	64.5	1245.6	720.67	1246.47	525.8	2.369					
Ortalamalar																	
7	5.0	4.76	60.00	64.4	63.7	63.7	63.93	1246.2	737.74	1249.94	512.2	2.433					
8				63.4	64.1	63.7	63.7	1246.2	736.03	1247.99	512	2.434					
9	4.64	4.42		64.1	63.8	63.6	63.83	1245.4	735.34	1248.15	512.8	2.429					
Ortalamalar																	
10	5.5	5.21	66.00	64.6	64.5	64.1	64.4	1254.7	742.28	1257.33	515.1	2.431					
11				64.2	64	64.6	64.3	1253.8	740.71	1254.23	513.5	2.430					
12	5.14	4.87		64.4	64.3	64.4	64.33	1254.2	741.5	1255.78	514.3	2.433					
Ortalamalar																	
13	6.0	5.66	72.00	64.5	64	64.2	64.23	1258.4	744.59	1259.66	515.1	2.443					
14				64.3	64.4	64	64.2	1256.5	743.57	1257.68	514.1	2.428					
15	5.64	5.32		64.4	64.2	64.1	64.23	1257.4	744.08	1258.67	514.6	2.424					
Ortalamalar																	
									2.428	2.460	1.30	12.48	86.22	13.78	90.55		

Çizelge 6.1 (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	3.53	16	0.970	1552
2				4.50	16.81	0.962	1617
3	3.64	3.50		2.94	16.12	0.970	1563
Ortalamlar				3.657			1577
4	4.5	4.31	54.00	3.92	16.59	0.982	1629
5				4.10	16.24	0.985	1599
6	4.14	3.96		4.28	16.77	0.985	1652
Ortalamlar				4.1			1627
7	5.0	4.76	60.00	4.87	15.48	1.000	1548
8				5.15	14.95	1.005	1503
9	4.64	4.42		4.74	15.4	1.003	1545
Ortalamlar				4.92			1532
10	5.5	5.21	66.00	5.41	13.53	0.987	1336
11				5.24	13.81	0.990	1367
12	5.14	4.87		5.33	13.67	0.991	1355
Ortalamlar				5.325			1352
13	6.0	5.66	72.00	6.49	11.9	0.992	1181
14				6.83	11.7	0.992	1161
15	5.64	5.32		6.66	11.8	0.991	1170
Ortalamlar				6.66			1170



Şekil 6.6: Elde edilen grafikler.

Çizelge 6.1 ve Şekil 6.6 ile belirlenen bütün sonuçlar incelendiğinde, grafikler içerisinde bitümle dolu boşluk oranının %70'e, boşluk oranının %4'e, hacim özgül ağırlığı ve stabilitenin maks. değere denk geldiği değerler alınmıştır. Bütün değerlerin aritmetik ortalaması alınıp, karışıma ait optimum bitüm içeriği % 4.75 olarak bulunmuştur. Çizelge 6.2'de OBİ'de kullanılmış olan hesaplar verilmiştir.

Çizelge 6.2: OBİ belirlenmesinde kullanılmış olan sonuçlar.

Kriterler	Sonuçlar
Dp (Maks.)	5.0
Stabilite (Maks.)	4.5
V _h (%4)	4.75
V _f (%70)	4.75
OBİ	%4.75

Elde edilen optimum bitüm içeriği yüzdesinden üç tane kontrol numuneleri hazırlandı ve bu numunelerin de yine aynı şekilde çeşitli hesaplamaları yapılmıştır. Belirlenen bütün değerlerin ‘Karayolları Teknik Şartnamesi’ (KTŞ)’ye göre uygunluğu karşılaştırılmıştır. Kontrollere ait sonuç değerleri Çizelge 6.3’de verilmiştir. Belirlenen sonuç değerlerinin KTŞ’de verilen asfalt betonu aşınma sınır değerlerini sağladığı görülmüştür.

Çizelge 6.3: Kontrol karışım numunelerinin sonuçları.

No	Wa (%)	Wb (%)	WB (gr)	Ort. yükseklik (mm)	A (hava) (gr)	C (su) (gr)	B (doy) (gr)	V (cm ³)	Dp (gr/cm ³)	
1	4.75	4.53	57.00	63.6	1242.2	719.87	1243.00	523.1	2.374	
2				63.43	1243.3	722.36	1244.01	521.7	2.383	
3	4.39	4.19		63.53	1238.6	720.14	1239.99	519.9	2.383	
Ortalama									2.380	
No	Dt (gr/cm ³)	Vh (%)	Vb (%)	Va (%)	Vma (%)	Vf (%)	Akma (mm)	Stb. (kN)	Dz. Fak.	Dz. Stb. (kN)
1							4.01	15.28	1.008	1540
2							3.54	15.61	1.013	1582
3							3.06	15.95	1.010	1610
Ort	2.499	4.75	9.80	85.45	14.55	66.40	3.54			1577
KTŞ		3-5			>14	65-75	2-4			>900

Elde edilen %4.75 değeri baz alınarak, saf, FeCR katkılı ve geopolimer katkılı bitümlü sıcak karışım numuneleri hazırlanmıştır. Çalışma için hazırlanmış olan tüm katkılı briket numunelerinin saf karışım (S) ile kıyaslanabilmesi için %4.75 oranı bütün numunelerde sabit tutulmuştur.

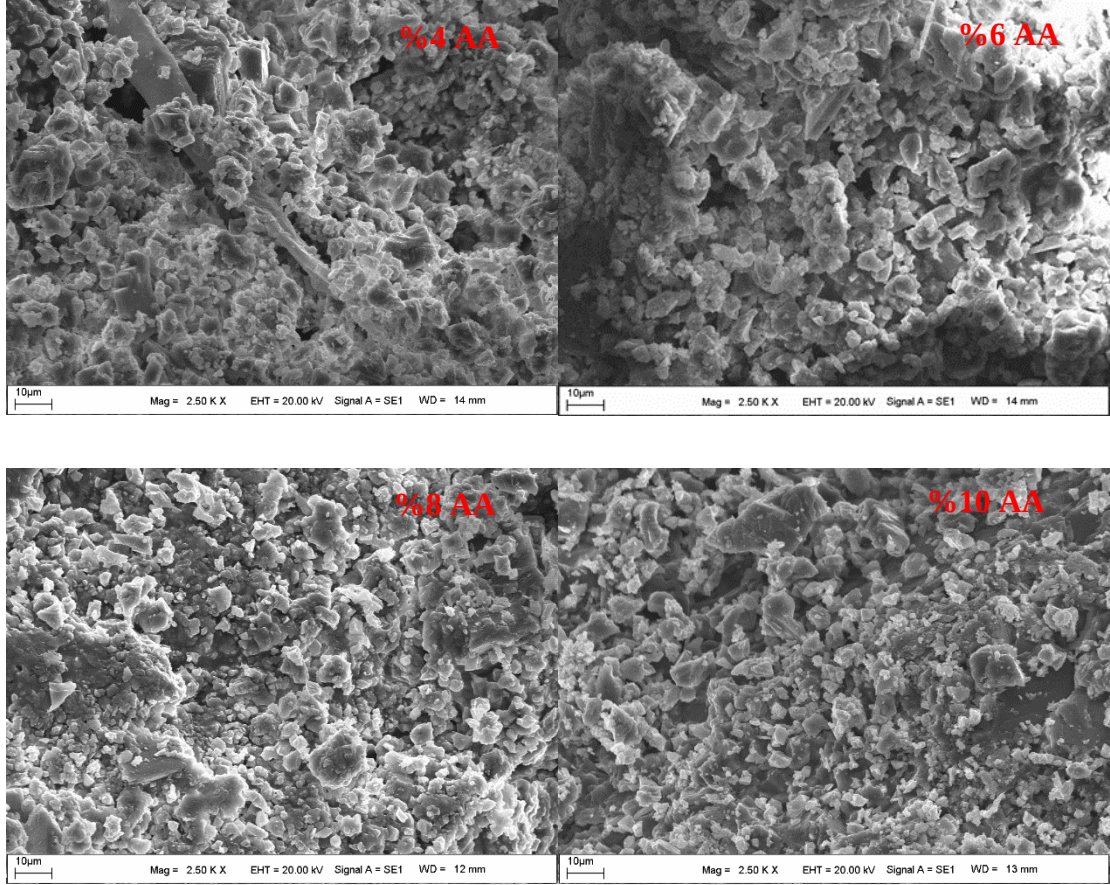
6.3 FeCR ve Geopolimer Katkılı BSK Numunelerinin Hazırlanması

Çalışmada, belirlenen OBİ ve Marshall karışım dizaynı kullanılarak, ilk olarak ferrokrom cürufunun filler malzeme olarak sıcak karışımda kullanılabilirliğini belirleyebilmek

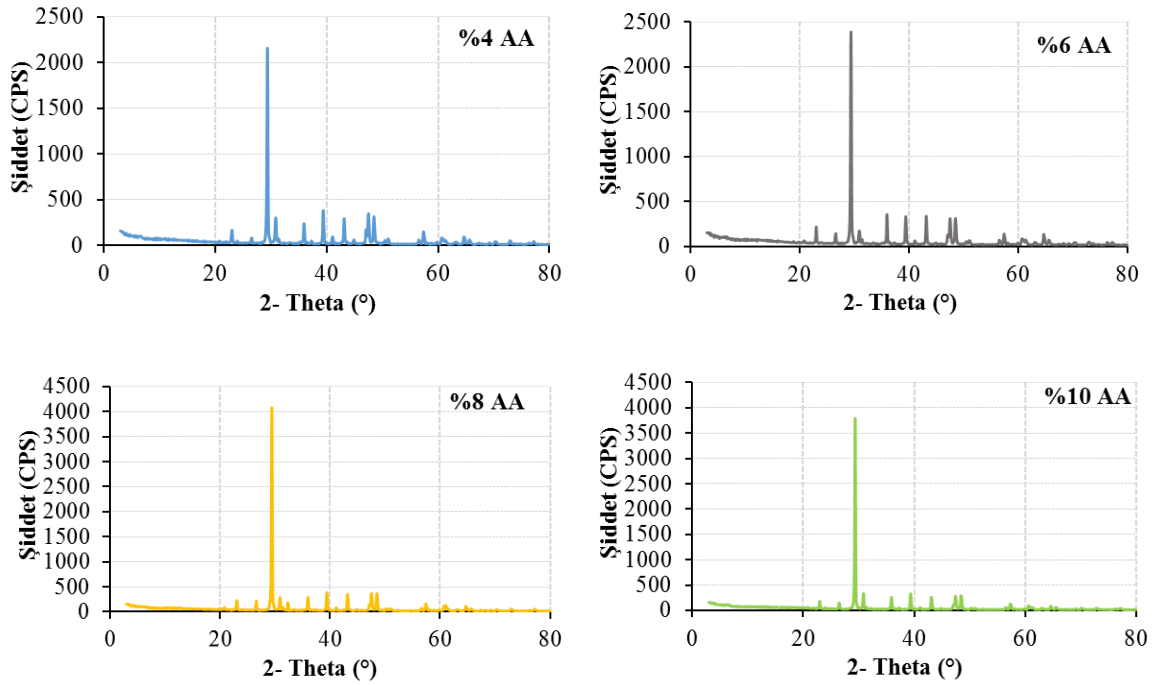
amacıyla sıcak karışımdaki filler oranı ağırlıkça %25, %50, %75 ve %100 oranlarında azaltılarak bunun yerine aynı oranlarda ferrokrom cürufu ikame edilerek cüruf ilaveli BSK numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan saf ve cüruf ikameli tüm briket numuneleri Marshall stabilite ve akma deneyine tabi tutulmuştur. Elde edilen deney sonuçları değerlendirildiğinde, cüruf ikamesiyle sıcak karışım numunelerinin stabilite değerlerinin %8,1 kadar artış gösterdiği ve bunun %50 cüruf ikameli numunelerden elde edildiği görülmüştür.

FeCR katkısı ile asfalt kaplamaların trafik yükleri altında iken kaplamalarda meydana gelebilecek kalıcı deformasyonlara karşı direcini daha da arttırmak amacıyla %50 FeCR katkılı agrega karışımına saf B50/70 bitüm ile karıştırılma esnasında alkali aktivatör (sodyum silikat) ikame edilmiştir.

Alkali aktivatörün optimum oranını belirlemek için öncelikle sıcak karışımdaki %50 FeCR'nin ağırlığı oranında %4, %6, %8 ve %10 oranlarında sodyum silikat (AA), briket numunesi hazırlandığı esnada bitüm içerisine hemen önce eklenerek karıştırma işlemi yapılmıştır. Buradan, hazırlanan geopolimer (bitüm+agrega+FeCR+AA) numuneler Marshall stabilite ve akma deneyine tabi tutulmuştur. Deney sonucuna göre en yüksek stabilite değeri %8 oranında sodyum silikat katkılı numunelerden elde edilmiştir. Ayrıca, AA'nın etkisini tam olarak belirlemek amacıyla hazırlanan briket numuneleri SEM ve XRD analizine tabi tutulmuş ve elde edilen sonuçlara göre de en uygun alkali oranının %8 olduğu kimyasal analizlerle de desteklenmiştir. Geopolimer katkılı karışım numunelerinin SEM görüntüleri Şekil 6.7'de, XRD deseni ise Şekil 6.8' de verilmiştir.



Şekil 6.7: SEM görüntüleri.



Şekil 6.8: XRD deseni.

SEM görüntüleri incelendiğinde, %4 ve %6 AA oranlarında agrega, AA, FeCR ve bitüm fazları ayrı ayrı heterojen birimler şeklinde görülmektedir. Ancak, %8 AA oranında, AA'nın bitümle tam reaksiyona girerek homojen bir yapı oluşturduğu görülmektedir. Bununla birlikte, %10 AA kullanılması durumunda yine homojen bir yapı oluştuğu ancak yüksek miktardaki AA sebebiyle SEM görüntülerindeki parlak kısımlar, söz konusu numunelerde yapısal değişikliklerden dolayı yanma meydana geldiğini göstermektedir. XRD verileri incelendiğinde düşük AA konsantrasyonunda (%4 ve %6 AA) oluşan pik en düşük seviyede olup AA, kalsit ile reaksiyona girmiş olabilir. En yüksek pikin olduğu %8 AA ilavesinde AA, bitüm ile reaksiyona girdiği için kalsit piki yüksek çıkmaktadır. Alkali aktivatörün sıvı fazda olduğu ve sıcaklık ile bitüm etkileşiminin daha fazla olması sonucu reaksiyonun gerçekleştiği ifade edilebilir. %10 AA konsantrasyonunda kalsit pikinin %8 AA ilavesinden bir miktar düşük çıkması ortam koşullarında AA'nın hem kalsit hem de bitüm ile reaksiyona girmesi ile açıklanabilir. Sonuç olarak SEM ve XRD verileri birlikte değerlendirildiğinde en uygun AA miktarının %8 AA olduğu görülmektedir.

6.4 Marshall Karışım Numunelerine Uygulanan Performans Deneyleri

Bu tez çalışmasında, geopolimer ve FeCR katkılarının BSK kaplamaların performans özellikleri üzerindeki etkisini tespit etmek için saf, FeCR ve geopolimer katkıları ile hazırlanan BSK numunelerine (Şekil 6.9) Marshall stabilite ve akma, dolaylı çekme yorulma, dolaylı çekme rijitlik modülü (ITSM) ve statik ve dinamik sünme deneyleri uygulanmıştır. Hazırlanmış olan briket numunelerine uygulanan deneyler ve numune sayıları Çizelge 6.4'de verilmiştir. Aynı zamanda, yapılan bütün deneyler ile belirlenen sonuçlar ve değerlendirmeler sırasıyla verilmiştir.



Şekil 6.9: Hazırlanan BSK numunelerinin bir kısmı.

Çizelge 6.4: Performans deneyleri için hazırlanan numune sayıları.

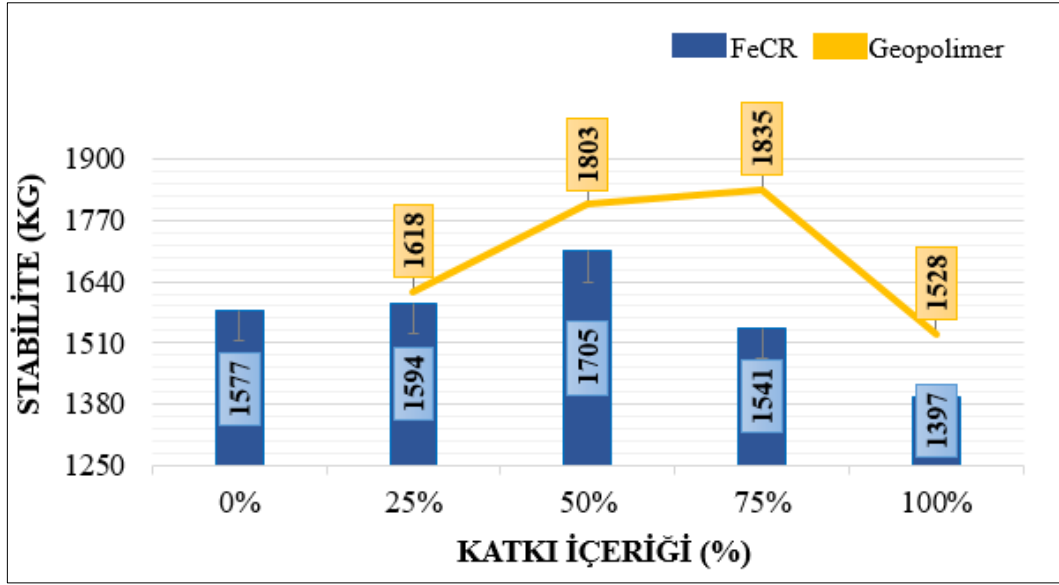
Karışım türü	Marshall stabilite ve akma	ITSM	Statik Sünme (40°C)	Statik Sünme (50°C)	Dinamik sünme	Yorulma (3500 N)	Yorulma (4000 N)
S	3	3	3	3	3	3	3
F 25	3	3	3	3	3	3	3
F 50	3	3	3	3	3	3	3
F 75	3	3	3	3	3	3	3
F 100	3	3	3	3	3	3	3
G 25	3	3	3	3	3	3	3
G 50	3	3	3	3	3	3	3
G 75	3	3	3	3	3	3	3
G 100	3	3	3	3	3	3	3
TOPLAM : 189 ADET							

6.4.1 Marshall stabilite ve akma deney sonuçları

Bu çalışmada saf, FeCR ve geopolimer ilave edilerek hazırlanmış olan BSK numunelerinin çeşitli hacimsel ve fiziksel özellikleri Çizelge 6.5’de verilmiştir. Briket numuneleri üzerinde uygulanan Marshall Stabilite ve akma deneyi sonuçlarından stabilite sonuçları Şekil 6.10’da, akma sonuçları ise Şekil 6.11’de verilmiştir. Tüm karışım numunelerinin sertlik ve deformasyonlara karşı dirençlerinin tespiti için hesaplanan Marshall Oranı (MQ) değerleri de Şekil 6.12’de verilmiştir.

Çizelge 6.5: Numunelerin özellikleri.

Karışım türü	Ortalama yükseklik (mm)	A (hava) (gr)	C (su) (gr)	B (doy) (gr)	Dp (gr/cm ³)	Dt (gr/cm ³)	Vh (%)
S	63.93	1251.40	735.29	1254.92	2.408	2.49	3.56
F 25	64.00	1252.10	736.04	1254.62	2.414	2.49	3.27
F 50	63.80	1253.70	737.40	1255.96	2.413	2.49	3.19
F 75	64.10	1253.90	734.01	1256.03	2.402	2.49	3.24
F 100	64.30	1253.50	733.88	1255.29	2.404	2.49	3.42
G 25	64.63	1254.70	734.36	1256.82	2.401	2.49	3.68
G 50	64.90	1255.10	733.84	1256.45	2.402	2.49	3.67
G 75	64.60	1256.20	735.10	1257.80	2.403	2.49	3.65
G 100	64.85	1255.90	732.65	1256.70	2.396	2.49	3.88

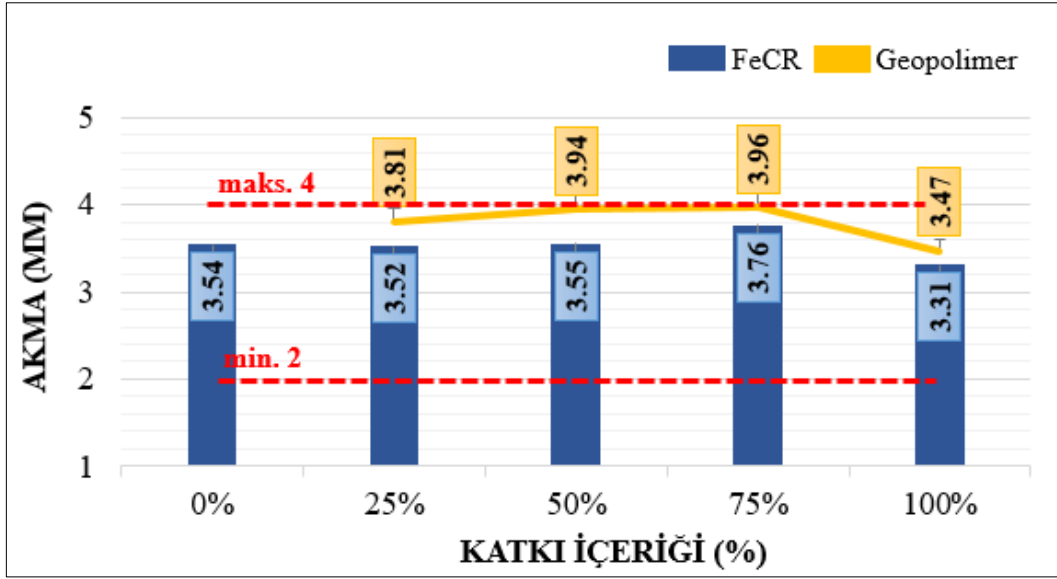


Şekil 6.10: Karışım numunelerinin stabilite değerleri.

Şekil 6.10 incelendiğinde BSK numunelerinin stabilite değerleri, FeCR ile birlikte geopolimer katkısının da ilave edilmesiyle karışım numunelerinin stabilite değerlerinde değişiklikler meydana geldiği görülmüştür. Meydana gelen bu değişimlerden ilk olarak FeCR katkılı karışımların saf karışım numunelerine göre sırasıyla %1.1 ve %8.1 artma; %2.3 ve %11.4 azalma şeklindedir. Geopolimer katkılı karışım numunelerinin ise saf karışıma kıyasla sırasıyla %2.6, %14.3 ve %16.36 artış; %3.11 azalma olduğu tespit edilmiştir. FeCR katkılı karışım numuneleri arasında en yüksek stabilite değeri %8.1 artış ile %50 ferrokrom cürufu katkılı karışım numunesinde görülmektedir. Fakat geopolimer katkısı ilavesiyle en yüksek stabilite değerinin %16.36 artış ile %75 geopolimer katkılı numuneden elde edildiği görülmüştür. Bunun sebebi ise AA'nın FeCR ile kimyasal etkileşim oluşturmasıdır.

Bütün stabilite sonuçları göz önüne alındığında, geopolimer ile hazırlanan karışım numunelerinin FeCR katkılı numunelere kıyasla daha yüksek sonuçlar verdiği ve en yüksek sonucun ise %75 geopolimer ilaveli karışım numunelerinden elde edildiği görülmektedir.

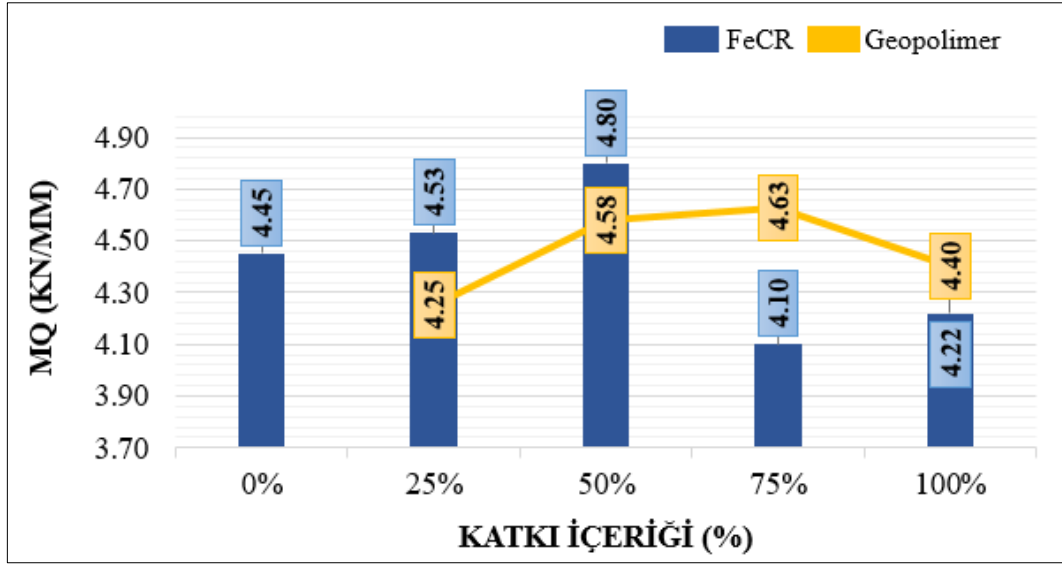
Stabilite değerinin yüksek olması BSK kaplamaların üzerine gelen yüklerden dolayı meydana gelen kalıcı deformasyonlara karşı gösterdiği mukavemetin yüksek olduğu anlamına gelmektedir. Dolayısıyla geopolimer katkısıyla hazırlanan numunelerin kalıcı deformasyonlara karşı daha yüksek dayanım göstereceği ve hazırlanan yüzdelere içerisinde en yüksek dayanımın %75 geopolimer katkı ilaveli karışım numunelerinin göstereceği söylenebilir.



Şekil 6.11: Karışım numunelerinin akma değerleri.

Şekil 6.11’de, öncelikle FeCR katkılı sıcak karışımların akma değerleri incelendiğinde, saf karışıma kıyasla sırasıyla %0.6 azalma, %0.3 ve %6.2 artış, %6.5 azalma şeklindedir. Geopolimer katkısıyla hazırlanan karışım numunelerinin akma değerleri ise saf karışıma kıyasla sırasıyla %7.6, %11.3 ve %11.6 artış, %2 azalma şeklinde olduğu belirlenmiştir. Sıcak karışımın akma değeri, bitümlü sıcak karışım kaplamanın trafik yükleri altındaki kırılma esnasındaki davranışını ifade eder. FeCR katkılı karışımların akma değeri sonuçlarına bakıldığında, en yüksek değer %6.2 artış ile %75 oranındaki katkılı numunelerde görülmüştür. Geopolimerin ilave edilmesiyle en yüksek akma değerinin yine %75 oranındaki katkılı numune olduğu fakat artışın %11.6 oranında olduğu görülmüştür. Bu sonuçlar değerlendirildiğinde, FeCR ve geopolimer ikameli sıcak karışımların hemen hemen aynı davranış sergileyebileceği söylenebilir.

Şekil 6.12’de görüldüğü üzere katkılı karışımların MQ değerleri, FeCR katkı oranı ve geopolimer katkısı ile değişiklik göstermiştir. FeCR katkılı numunelerin saf karışıma kıyasla %50 FeCR katkılı numunede pik verdiği, fakat geopolimer katkılı numunelerde %75 oranında pik olduğu görülmektedir. MQ değeri, sıcak karışımların kayma gerilmelerine karşı direncinin bir ölçüsü olarak değerlendirilmektedir. Elde edilen sonuçlara göre, geopolimerin ilave edilmesiyle birlikte en yüksek MQ değeri %75 FeCR katkı oranına çıktığı ve bu oranda da kayma gerilmelerine ve kalıcı deformasyonlara karşı yüksek bir direnç göstereceği ifade edilebilir.



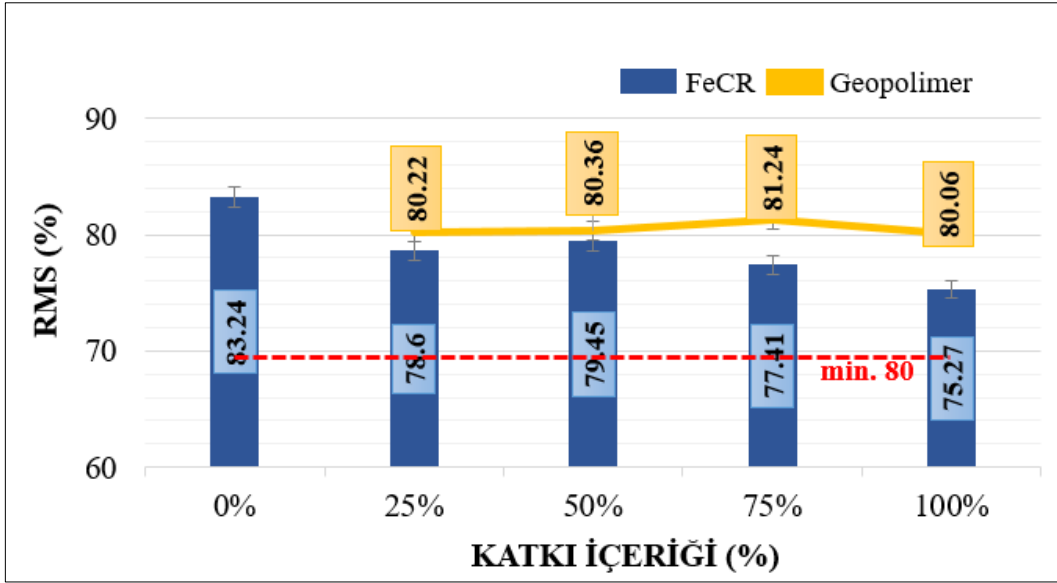
Şekil 6.12: Karışım numunelerinin MQ değerleri.

6.4.2 Kalıcı marshall stabilitesi (RMS) deney sonuçları

Saf, geopolimer ve FeCR katkısıyla hazırlanan BSK numunelerine ne hasarına karşı dayanımını tespit edebilmek amacıyla RMS deneyine maruz bırakılmıştır. Numunelerin özellikleri Çizelge 6.6'da, deney sonunda tespit edilen veriler ise Şekil 6.13'de verilmiştir.

Çizelge 6.6: Numunelerin özellikleri.

Karışım türü	Ortalama yükseklik (mm)	A (hava) (gr)	B (su) (gr)	C (doy) (gr)	Dp (gr/cm ³)	Dt (gr/cm ³)	Vh (%)
S	64.03	1252.80	733.10	1254.13	2.404	2.49	3.57
F 25	64.40	1253.80	732.50	1254.40	2.402	2.49	3.64
F 50	64.10	1252.40	731.60	1253.50	2.400	2.49	3.75
F 75	64.20	1250.60	730.70	1251.72	2.400	2.49	3.72
F 100	64.40	1251.38	730.85	1252.52	2.399	2.49	3.78
G 25	64.87	1254.90	732.65	1255.70	2.399	2.49	3.77
G 50	64.30	1253.80	731.50	1254.65	2.397	2.49	3.87
G 75	64.60	1255.10	733.70	1256.35	2.401	2.49	3.68
G 100	64.70	1255.50	733.86	1256.84	2.401	2.49	3.71



Şekil 6.13: Tüm numunelerin RMS değişimleri.

Şekil 6.13 incelendiğinde, katkı içeriği artışı ile birlikte her iki gruptaki numunelerde de saf karışıma kıyasla RMS değerinde azalma meydana geldiği görülmektedir. RMS değeri ile sıcak karışımların nem hasarına karşı gösterdiği direnç belirlenmektedir. RMS deney sonuçlarına göre, FeCR katkılı karışım numunelerinin RMS değerleri saf karışıma kıyasla sırasıyla %5.6, %4.6, %7 ve %9.6 oranlarında azalma meydana gelmiştir. Geopolimer katkılı karışımların RMS değerleri ise FeCR katkılı karışımlara kıyasla arttığı fakat saf karışıma kıyasla sırasıyla %3.6, %3.5, %2.4 ve %3.8 azalma meydana gelmiştir. Deney sonuçları göz önüne alındığında, geopolimer ikameli karışım numunelerinin FeCR katkılı karışımlara göre nem hasarına karşı daha yüksek dayanım göstereceği ve dayanım açısından en verimli karışım numunelerinin %75 geopolimer ikameli karışım numunelerinden elde edildiği ifade edilebilir. Ancak saf karışımla kıyaslandığında FeCR ve geopolimer ikameli karışımların nem direncinin az da olsa azaldığı tespit edilmiştir.

6.4.3 Dolaylı çekme mukavemeti (ITS) ve Modifiye Lottman deney sonuçları

Hazırlanan BSK numunelerine önce ITS deneyi, ardından Modifiye Lottman deneyi uygulanmıştır. Bu deney AASHTO T283 standardına göre, saf, FeCR ve geopolimer katkılı sıcak karışım numuneleri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Nem hasarının belirlenmesi amacıyla ilk olarak, 7 ± 0.5 boşluğa sahip ve optimum bağlayıcı oranında (%4.75) briket numuneleri iki grup olacak şekilde hazırlanmıştır. Birinci grup briket numuneleri, su banyosunda (25°C sıcaklıktaki) 2 saat bekletildikten sonra dakikada 50.8 mm'lik hızla yüklemeye tabi tutulmuştur. Yükleme sonunda numuneler kırılmıştır.

Birinci grup numuneler, “koşullandırılmamış” olarak adlandırılmıştır ve aynı zamanda bu gruptaki numunelerden elde edilen veriler “ITS_{kuru}” olarak hesaplanmıştır.

Diğer gruptaki numuneler ise ilk olarak vakum işlemi uygulanmış daha sonra numunede bulunan boşluklar %70-80 oranında suyla doldurulmuştur. Daha sonra bu briket numuneleri streç filmle sarılarak boşluk kısımlarına dolan suyun stabil şekilde durması sağlama alınmıştır. Ardından bu briket numuneleri, ilk olarak -18°C sıcaklıkta 16 saat boyunca dondurucuda, daha sonra 60°C sıcaklıktaki su banyosu içerisinde 24 saat boyunca tutulmuştur. Bu işlemlerden sonra, son olarak bu briket numuneleri 25°C sıcaklıkta su banyosunda da 2 saat boyunca bekletilmiştir. Süre sonunda su banyosundan çıkarılan numuneler dakikada 50.8 mm’lik hızla yüklemeye tabi tutularak kırılmıştır. Bu gruptaki numuneler de “koşullandırılmış” numune şeklinde adlandırılmış ve belirlenen veriler de “ITS_{yaş}” olarak hesaplanmıştır.

Şartlandırılmamış ve şartlandırılmış numunelerin özellikleri Çizelge 6.7 - Çizelge 6.9’da, ITS değerlerinin katkı ve geopolimer oranına bağlı olarak değişimi Şekil 6.14 ve Şekil 6.15’de, ITSR verilerinde olan değişiklikler ise Şekil 6.16’da verilmiştir.

Çizelge 6.7: Şartlandırılmamış numunelerin özellikleri.

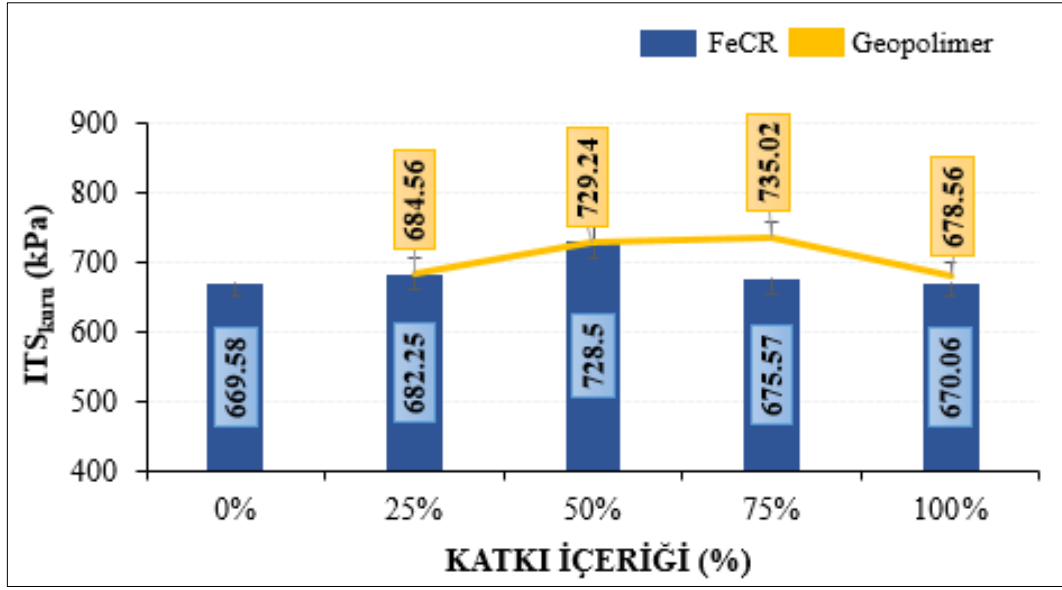
Karışım türü	Ortalama yükseklik (mm)	A (hava) (gr)	B (su) (gr)	C (doy) (gr)	Dp (gr/cm ³)	Dt (gr/cm ³)	Vh (%)
S	63.95	1250.50	729.85	1251.60	2.397	2.49	3.87
F 25	64.30	1251.30	730.24	1252.50	2.396	2.49	3.90
F 50	64.50	1249.65	729.15	1251.20	2.394	2.49	3.97
F 75	64.30	1250.10	730.26	1251.60	2.398	2.49	3.82
F 100	64.40	1249.80	729.43	1251.93	2.392	2.49	4.06
G 25	64.75	1252.50	730.86	1253.84	2.395	2.49	3.94
G 50	64.70	1253.60	731.65	1254.75	2.396	2.49	3.87
G 75	64.90	1253.80	731.80	1254.45	2.399	2.49	3.78
G 100	64.50	1252.80	730.49	1253.38	2.396	2.49	3.89

Çizelge 6.8: Şartlandırılmış FeCR katkılı numunelere ait özellikler.

Karışım türü	No	Numune yüksekliği (mm)			Vakum				Dp (gr/cm ³)	Dt (gr/cm ³)	Vh (%)	Vsu (cm ³)	Doygunluk (%)	Maks. yük (kg)	ITS _{yaş} (kPa)
		1	2	3	Ort	A (hava) (gr)	C (su) (gr)	B (doy) (gr)	B (gr)	V (cm ³)					
S	1	63.70	63.60	63.85	63.72	1248.14	730.16	1258.25	1273.61	528.09	2.363	25.47	75.23	6.53	603.34
	2	64.00	63.80	63.70	63.83	1249.86	731.26	1259.85	1274.85	528.59	2.365	24.99	73.74	6.06	595.13
	3	63.80	64.00	63.80	63.90	1249.03	730.32	1259.76	1275.35	529.44	2.359	26.32	77.54	5.84	600.70
Ortalamalar															
F 25	1	63.80	63.60	63.80	63.73	1246.87	728.46	1256.14	1271.96	527.68	2.363	25.09	72.03	5.05	430.15
	2	63.74	63.60	63.78	63.71	1247.39	727.86	1257.72	1273.20	529.86	2.354	25.81	73.79	5.20	425.47
	3	63.85	64.00	63.90	63.92	1248.33	728.12	1258.05	1274.35	529.93	2.356	26.02	74.38	5.36	415.60
Ortalamalar															
F 50	1	63.80	63.60	63.65	63.68	1243.50	730.65	1253.60	1267.47	522.95	2.378	24.35	77.10	5.15	453.45
	2	63.50	63.80	63.50	63.60	1246.40	730.12	1256.50	1269.42	526.38	2.368	23.02	72.42	5.56	440.20
	3	63.70	63.50	63.80	63.67	1245.16	729.85	1255.32	1269.06	525.47	2.370	23.90	75.31	5.85	465.45
Ortalamalar															
F 75	1	63.80	63.70	63.80	63.77	1247.44	730.95	1257.28	1272.02	526.33	2.370	24.58	75.80	5.60	410.13
	2	63.45	63.67	63.50	63.54	1248.14	731.65	1259.25	1271.86	527.60	2.366	23.72	72.97	5.84	418.86
	3	64.10	64.06	63.88	64.01	1248.65	731.80	1258.58	1272.42	526.78	2.370	23.77	73.24	5.45	407.04
Ortalamalar															
F 100	1	63.47	63.54	63.88	63.63	1249.25	732.50	1259.35	1273.15	526.85	2.371	23.90	74.04	5.54	400.26
	2	63.57	63.43	63.45	63.48	1250.45	733.86	1261.28	1274.12	527.42	2.371	23.67	73.25	5.48	405.86
	3	63.70	63.62	63.80	63.71	1251.87	732.67	1261.63	1275.02	528.99	2.367	23.15	71.43	5.35	411.23
Ortalamalar															
														72.91	405.78

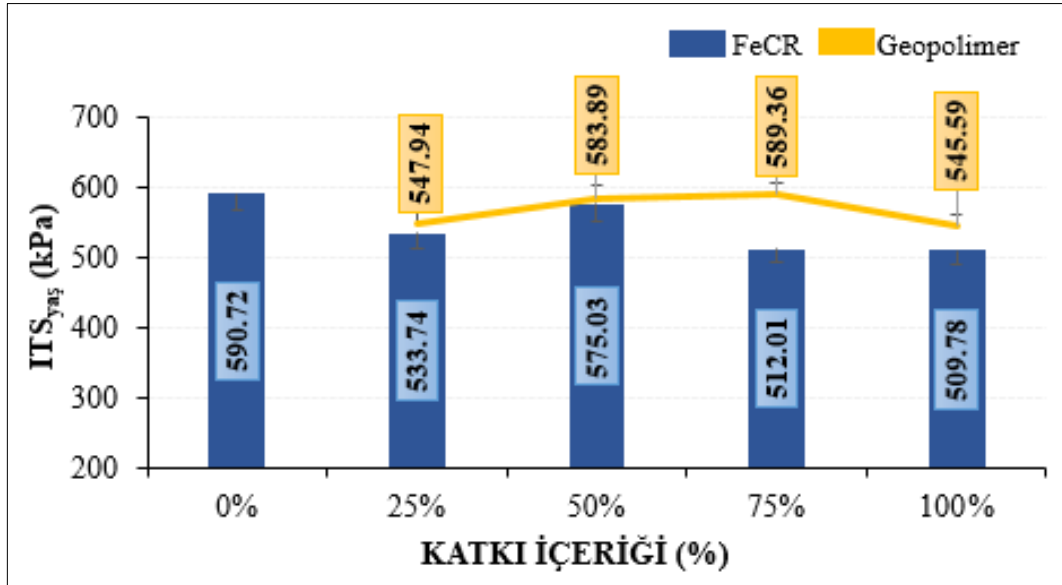
Çizelge 6.9: Şartlandırılmış geopolimer katkılı numunelere ait özellikler.

Karişım türü	No	Numune yüksekliği (mm)			Vakum				D _t (gr/cm ³)	V _h (%)	V _{su} (cm ³)	Doygunluk (%)	Maks. yük (kg)	ITS _{yaş} (kPa)
		1	2	3	Ort	A (hava) (gr)	C (su) (gr)	B (doy) (gr)	B (gr)	V (cm ³)	D _p (gr/cm ³)			
S	1	63.70	63.60	63.85	63.72	1248.14	730.16	1258.25	1273.61	528.09	2.363	25.47	75.23	603.34
	2	64.00	63.80	63.70	63.83	1249.86	731.26	1259.85	1274.85	528.59	2.365	24.99	73.74	595.13
	3	63.80	64.00	63.80	63.90	1249.03	730.32	1259.76	1275.35	529.44	2.359	26.32	77.54	600.70
Ortalamalar														
G 25	1	63.80	64.00	63.85	63.88	1248.15	730.15	1258.08	1273.15	527.93	2.364	25.00	72.04	453.25
	2	64.06	64.14	64.02	64.07	1249.12	729.50	1259.70	1274.87	530.20	2.356	25.75	73.88	430.56
	3	63.85	64.00	63.70	63.85	1250.10	729.12	1260.02	1275.06	530.90	2.355	24.96	71.52	430.01
Ortalamalar														
G 50	1	64.10	64.30	64.15	64.18	1244.50	731.20	1254.30	1267.45	523.10	2.379	22.95	74.17	470.85
	2	64.02	63.90	63.96	63.96	1246.50	730.80	1256.20	1269.63	525.40	2.372	23.13	74.42	462.51
	3	63.84	63.90	63.85	63.86	1245.30	730.65	1255.40	1268.02	524.75	2.373	22.72	73.19	458.23
Ortalamalar														
G 75	1	63.85	63.72	63.80	63.79	1249.62	733.65	1259.20	1272.31	525.55	2.378	22.69	71.78	480.03
	2	63.75	63.80	63.75	63.77	1250.00	732.86	1260.05	1272.68	527.19	2.371	22.68	71.52	475.26
	3	64.00	63.95	64.02	63.99	1250.05	733.04	1260.85	1273.64	527.81	2.368	23.59	74.31	460.86
Ortalamalar														
G 100	1	64.05	64.00	63.90	63.98	1251.05	734.15	1261.45	1274.85	527.30	2.373	23.80	74.42	400.06
	2	63.80	63.85	63.80	63.82	1252.23	733.94	1262.45	1275.52	528.51	2.369	23.29	72.66	412.05
	3	64.00	64.12	64.00	64.04	1252.68	734.45	1262.68	1275.61	528.23	2.371	22.33	71.57	428.65
Ortalamalar														
													72.89	413.59



Şekil 6.14: Karışım numunelerinin ITS_{kuru} değişimleri.

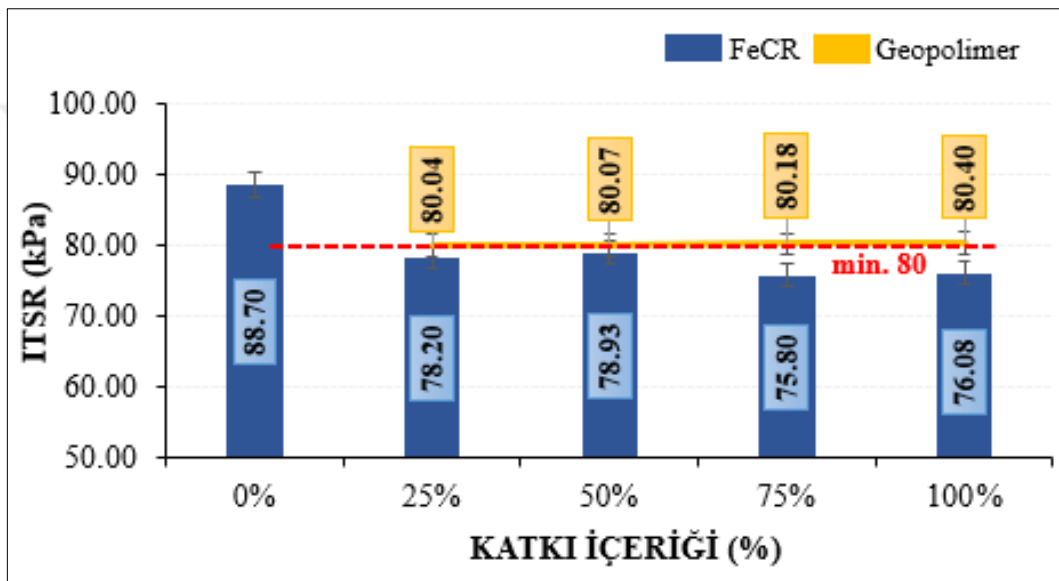
Bütün briketlere ait ITS_{kuru} verilerine bakıldığında, FeCR ve geopolimer katkıli karışımların saf karışımlara kıyasla ITS değerlerinde artış olduğu ve en yüksek değer artışının geopolimer katkıli karışımlarda meydana geldiği görülmektedir. FeCR katkıli karışımların ITS_{kuru} değerleri saf karışıma kıyasla sırayla %2.5, %9.5, %1.5 ve %0.7 oranında artış meydana gelirken geopolimer katkıli karışımların ise %2.85, %9.6, %10.4 ve %2 oranında artış meydana geldiği görülmüştür.



Şekil 6.15: Karışım numunelerinin ITS_{yaş} değişimleri.

Bütün sıcak karışım numunelerine ait ITS_{yaş} değerleri Şekil 6.15'e bakıldığında, çoğunlukla FeCR ve geopolimer ikameli sıcak karışım numunelerinin saf karışım numunelerine göre

ITS_{yaş} verilerinde azalma meydana gelmektedir. FeCR ikameli karışımların ITS_{yaş} verilerinde ortaya çıkan azalma saf karışım numunelerine kıyasla sırasıyla %9.6, %2.7, %13.3 ve %13.7 oranlarında, geopolimer ikameli karışımlarda ise %7.2, %1.2, %0.2 ve %7.6 oranlarında meydana gelmiştir. Şekil 6.14 ve Şekil 6.15'deki veriler beraber incelendiğinde, geopolimer katkılı karışımların FeCR katkılı karışımlara göre daha iyi ITS değerleri sağlayacağı söylenebilir. Deney sonuçları değerlendirildiğinde, bazik durumdaki FeCR'nin, agrega ve asidik durumdaki asfalt bağlayıcı arasında etkili bir bağlanma niteliği sağladığı, fakat geopolimer (AA) katkısı ile daha etkili bir bağlanma niteliği oluşturarak ITS verilerini iyileştirdiği kanısına ulaşılmıştır.



Şekil 6.16: Karışım numunelerinin ITS değerleri.

Şekil 6.16'da, katkı oranındaki artış ile karışım numunelerinin ITS değerlerinin saf karışıma göre azaldığı görülmektedir. ITS değerlerinde, FeCR ikameli karışım numunelerinin saf karışım numunelerine kıyasla %11.8, %11, %14.5 ve %14.2 oranında, geopolimer katkılı karışımların ise %9.8, %9.7, %9.6 ve %9.4 oranında azalma meydana geldiği görülmektedir. Yüksek ITS verileri, karışımların su kaynaklı deformasyonlara karşı gösterdiği dayanımın yüksek olduğunu göstermektedir. Deney sonuçlarına göre, saf karışıma kıyasla bütün katkılı karışımların suya karşı direncinin azaldığı, fakat geopolimer katkılı karışımların FeCR katkılı karışımlara göre suyun etkilerine karşı nispeten daha iyi bir dayanım göstereceği söylenebilir. Bu da, geopolimer ikameli karışımlarda bitüm+FeCR+AA'nın güçlü bir kimyasal reaksiyon oluşturması ve agregayla bağlayıcının birleşimi sonucunda güçlü bir kohezyon ve adezyon sağlamasının sunucu olduğu değerlendirilmektedir.

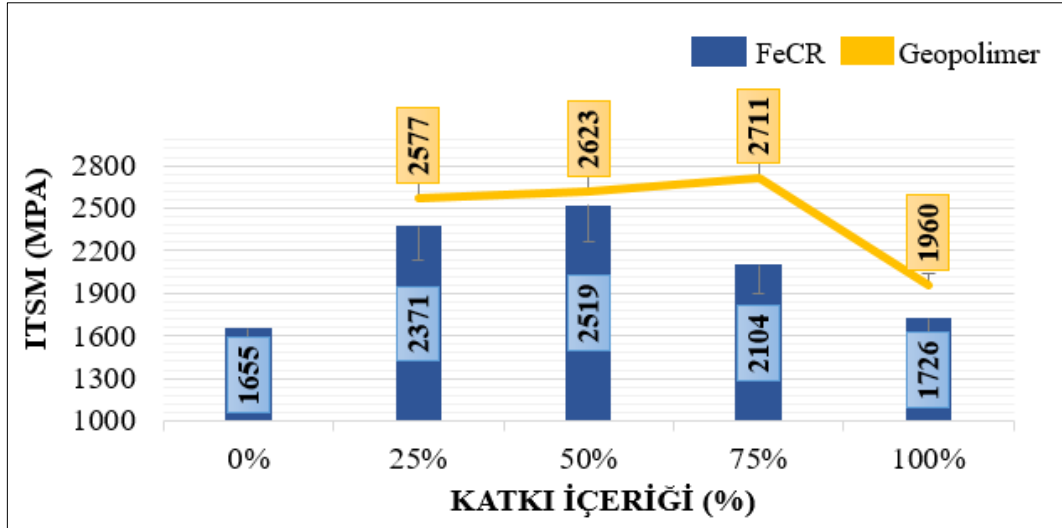
6.4.4 Dolaylı çekme rijitlik modülü (ITSM) deney sonuçları

BS DD 213 standardına göre yapılan ITSM deneyi, saf, geopolimer ve FeCR katkısı ile hazırlanmış olan numuneler üzerinde yapılmıştır. Bütün numuneler 25 °C sıcaklıktaki IPS deney kabini içinde deneye tabi tutulmuştur. Deney başlangıcında önce 5 kere esas yükleme yapılmıştır. Böylece karışım numunelerinin dinamik yükler altındaki esnekliği belirlenmiştir. Deney bilgisayarında numunelere ait; poisson oranı 0.35, hedef deformasyon 5 µm, yük artış süresi 124 ms ve yük periyodu 3000 ms olarak işaretlenmiştir. Yatay eksen 5 µm deformasyon oluşturacak olan yük cihaz tarafından otomatik olarak belirlenmektedir. Deneyde numune üzerine gelen 5 darbeden sonraki ITSM değeri bilgisayar tarafından otomatik olarak bulunmaktadır. Hazırlanmış olan numunelere ait gerekli özellikler Çizelge 6.10'da, 25 °C'de ITSM değerinin sıcak karışımlardaki katkı değişimlerine göre verileri Şekil 6.17'de verilmiştir.

Çizelge 6.10: Numunelere ait fiziksel özellikler (25 °C).

Karışım türü	Yükseklik (Hort)(mm)	A (hava) (gr)	B (su) (gr)	C (doy) (gr)	Dp (gr/cm ³)	Dt (gr/cm ³)	Vh (%)
S	64.30	1249.84	728.65	1251.22	2.392	2.49	4.07
F 25	64.40	1250.40	729.52	1251.60	2.395	2.49	3.94
F 50	64.10	1249.80	727.34	1250.73	2.388	2.49	4.22
F 75	64.65	1251.40	730.42	1252.07	2.399	2.49	3.78
F 100	64.40	1250.75	730.25	1251.68	2.399	2.49	3.79
G 25	64.75	1252.35	732.36	1253.84	2.402	2.49	3.67
G 50	64.65	1253.20	732.85	1254.22	2.404	2.49	3.59
G 75	64.90	1252.65	732.72	1253.80	2.404	2.49	3.58
G 100	64.95	1253.40	733.30	1254.17	2.406	2.49	3.48

Şekil 6.17'deki değerler incelendiğinde, saf karışıma kıyasla FeCR ve geopolimer katkılı numunelerin rijitlik modülü verilerinde büyük ölçüde değişimler olduğu görülmektedir. Meydana gelen bu değişimler, ilk olarak FeCR katkılı karışımların saf karışıma kıyasla sırasıyla %43.3, %52.2, %27.13 ve %4.3 artış şeklindedir. Bu sıcak karışım numunelerinden en yüksek ITSM değerini %50 FeCR katkılı numunelerden elde edilmiştir.



Şekil 6.17: ITSM değerinin farklı katkı oranlarındaki değişimleri.

Geopolimer katkılı karışım numunelerinin ise saf karışıma kıyasla sırasıyla %55.71, %58.5, %63.8 ve %18.4 oranlarında yüksek bir artma olduğu tespit edilmiştir. Geopolimer katkılı numunelerin en yüksek ITSM değerinin ise %75 geopolimer katkılı numunelerden elde edildiği görülmektedir. Bulunan ITSM değeri, BSK'ların hareketli yükler altındaki rijitliğinin belirlenmesinde yardımcı olur. FeCR katkısının saf karışıma kıyasla %50 katkı oranında kaplamada dinamik yüklerin etkisi altında daha rijit bir davranış sergileyeceği söylenebilir. Geopolimer ilave edilen FeCR katkılı numunelerin ITSM değerine bakıldığında ise %75 katkı oranına sahip numunelerin en yüksek ITSM değerini verdiği ve böylelikle bu oranda tüm karışımlara göre hareketli yükler altında daha rijit bir davranış göstereceği ifade edilebilir.

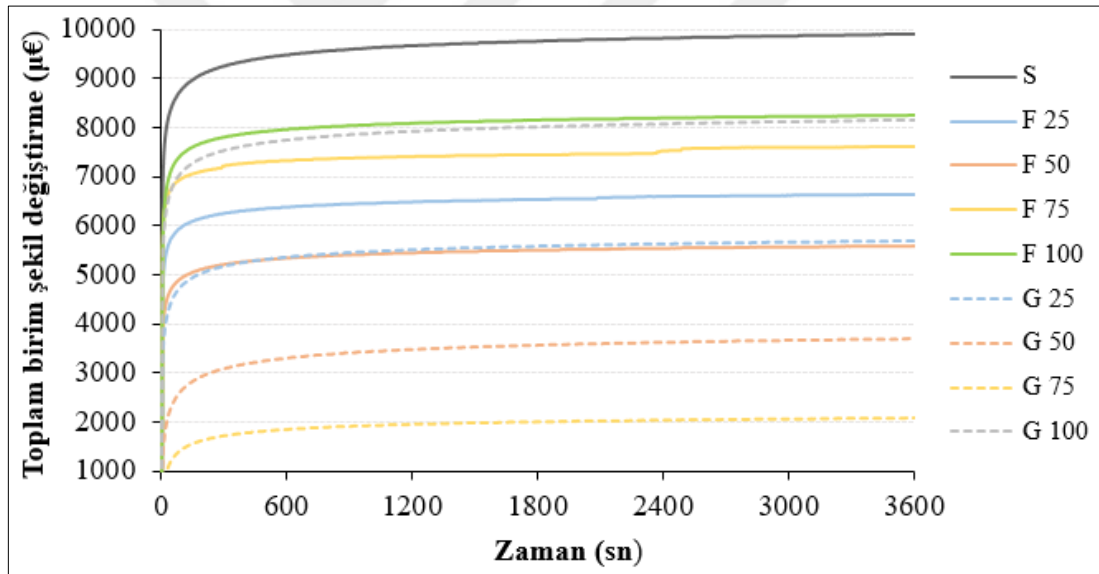
6.4.5 Statik sünme deney sonuçları

Saf, geopolimer ve FeCR katkılı numunelere yapılan statik sünme deneyi 40 °C ve 50 °C'de IPC deney kabiniinde uygulanmıştır. Her bir numune üzerinde deney yapılmadan önce deneyin yapılacağı sıcaklıkta 3 saat boyunca cihaz içerisinde şartlandırılmaya bırakılmıştır. Bu süre bitiminde, numune cihaza yerleştirilip, ilk 10 dakika 20 kPa ön yükleme yapılmıştır. Daha sonra numuneye bağlanan LVDT çubuklarındaki değerler sıfırlanıp 200 kPa'lık esas yükleme yapılmaya başlanmıştır. Esas yükleme 1 saat boyunca devam ettirilmiştir. Statik sünme deneyi boyunca cihaz her 4 saniyede bir oluşan düşey deformasyonları kaydetmiştir. Aynı zamanda sünme sertliği değerini de otomatik şekilde belirleyerek kaydetmiştir. Sıcak karışım numunelerinden 40°C'deki statik sünme deneyine maruz bırakılan numunelere ait fiziksel özellikleri Çizelge 6.11'de verilmiştir.

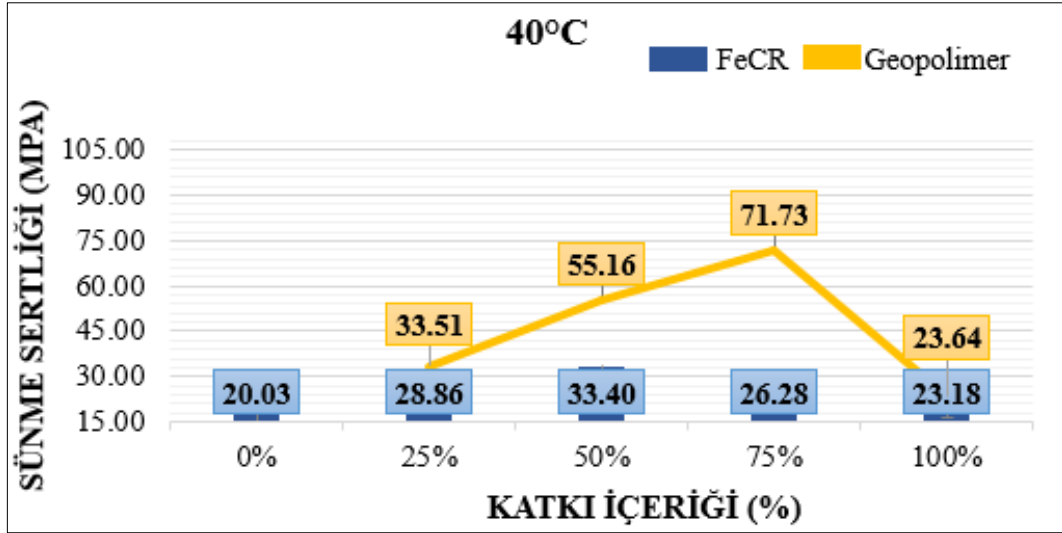
Deney sonucunda numunelerin toplam birim şekil değiştirme – zaman grafiği Şekil 6.18’de, sünme sertliğinin katkı oranına bağlı olarak gösterdiği değişiklikler ise Şekil 6.19’da verilmiştir.

Çizelge 6.11: Numunelere ait fiziksel özellikleri (40°C).

Karışım türü	Ortalama yükseklik (mm)	A (hava) (gr)	B (su) (gr)	C (doy) (gr)	Dp (gr/cm ³)	Dt (gr/cm ³)	Vh (%)
S	63.83	1249.21	728.75	1250.36	2.395	2.49	3.94
F 25	64.50	1250.65	729.64	1251.92	2.395	2.49	3.95
F 50	64.30	1251.25	730.26	1252.30	2.397	2.49	3.86
F 75	64.60	1250.45	730.13	1251.68	2.398	2.49	3.83
F 100	64.12	1250.00	729.70	1251.43	2.396	2.49	3.90
G 25	64.36	1252.24	731.35	1253.09	2.400	2.49	3.73
G 50	64.50	1253.62	732.30	1254.57	2.400	2.49	3.72
G 75	64.70	1252.50	731.20	1253.63	2.397	2.49	3.84
G 100	64.00	1253.62	732.34	1254.30	2.402	2.49	3.66



Şekil 6.18: Numunelerin 40°C’deki toplam birim şekil değiştirme-zaman değişimleri.



Şekil 6.19: 40°C’deki sünme sertliği değerinin katkı oranlarındaki değişimleri.

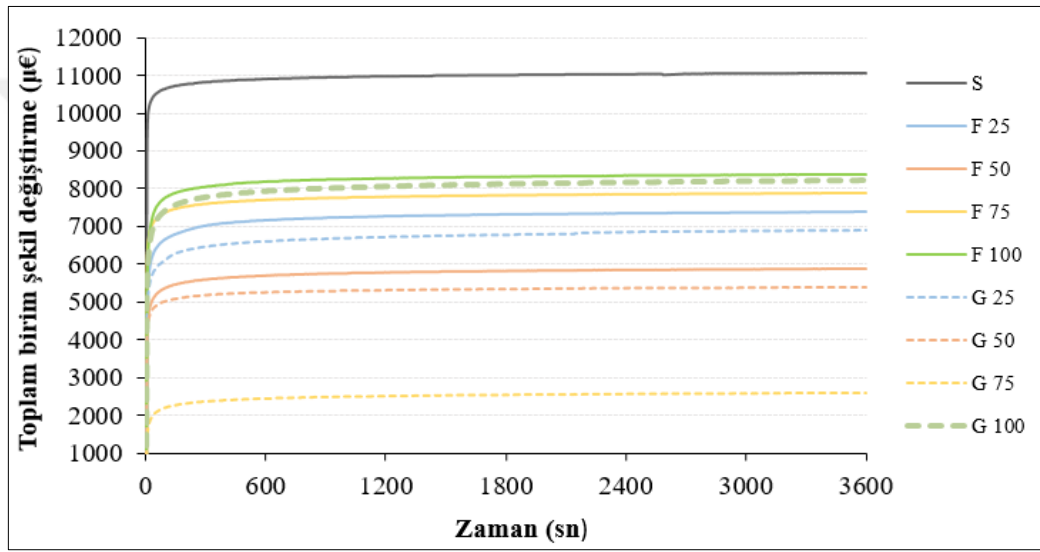
Şekil 6.19’deki değerler incelendiğinde, 40°C’de hem FeCR hem de geopolimer katkısının ilave edilmesiyle hazırlanan sıcak karışım numunelerinin, saf numunelere oranla sünme sertliği değerinin daha yüksek olduğu görülmektedir. FeCR ile hazırlanan numunelerin değerlerinde, saf karışım numunelerine kıyasla sırasıyla %44.1, %66.8, %31.2 ve %15.7 gibi bir artış meydana gelmiştir.

Bu sonuçlara bakıldığında, en yüksek sünme sertliği değerindeki artış %50 FeCR katkısı ile hazırlanan numunelerden elde edildiği ve bu değerde %66.8 artış olduğu görülmektedir. Fakat geopolimer ilave edilmesi sonucunda hazırlanan numunelerin sünme sertliği değerleri de, yine saf karışım numunelerine kıyasla sırasıyla %67.3, %175.4, %258.1 ve %18 oranında artış şeklinde ciddi anlamda yükselme meydana gelmiştir. Geopolimer katkılı karışımların sünme sertliği değerleri incelendiğinde, en yüksek değer %75 oranındaki geopolimer katkılı karışım numunelerinden elde edildiği ve artış oranının %258.1 olduğu belirlenmiştir.

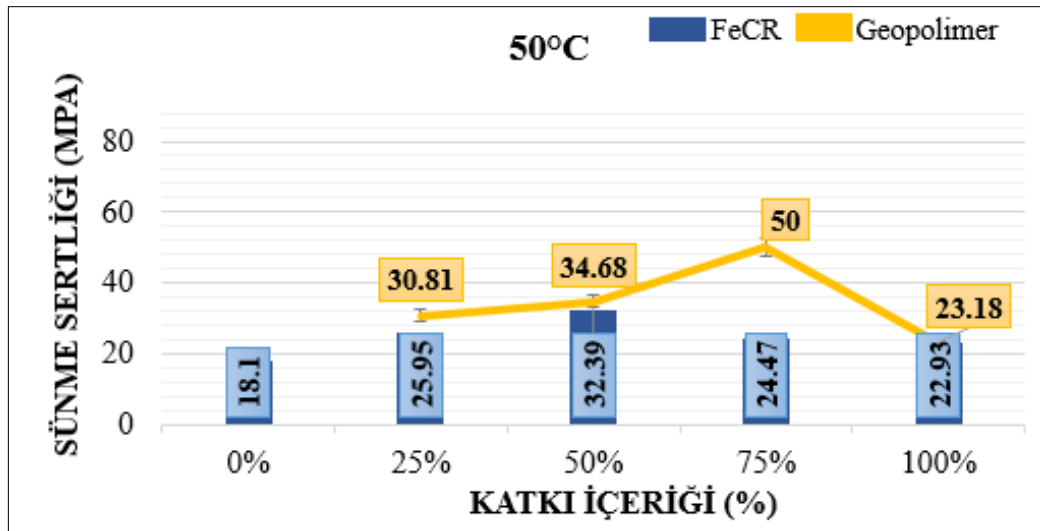
İkinci bir deney sıcaklığı olan 50°C’de gerçekleştirilen statik sünme deneyinde kullanılan numunelere ait fiziksel özellikler Çizelge 6.12’de verilmiştir. Ayrıca numunelerin toplam birim şekil değiştirme – zaman grafiği Şekil 6.20’de ve sünme sertliğinin katkı oranına bağlı olarak gösterdiği değişiklikler ise Şekil 6.21’de verilmiştir.

Çizelge 6.12: Numunelere ait fiziksel özellikleri (50°C).

Karışım türü	Ortalama yükseklik (mm)	A (hava) (gr)	B (su) (gr)	C (doy) (gr)	Dp (gr/cm ³)	Dt (gr/cm ³)	Vh (%)
S	63.90	1250.42	729.14	1251.65	2.393	2.49	4.01
F 25	63.80	1249.67	727.65	1250.62	2.390	2.49	4.15
F 50	64.10	1251.12	730.14	1252.34	2.396	2.49	3.90
F 75	64.20	1252.26	730.68	1253.47	2.395	2.49	3.92
F 100	64.30	1251.81	731.18	1253.14	2.398	2.49	3.80
G 25	64.60	1253.47	728.46	1254.16	2.384	2.49	4.36
G 50	64.30	1253.62	732.32	1254.17	2.402	2.49	3.64
G 75	64.60	1254.01	733.45	1255.29	2.403	2.49	3.61
G 100	64.00	1253.72	732.63	1255.14	2.399	2.49	3.76



Şekil 6.20: Numunelerin 50°C'deki toplam birim şekil değiştirme-zaman değişimleri.



Şekil 6.21: 50°C'deki sünme sertliği değerinin katkı oranlarındaki değişimleri.

50°C’de gerçekleştirilen statik sünme deneyi sonucunda elde edilen Şekil 6.16 ve Şekil 6.21 incelendiğinde, ilk olarak FeCR katkılı karışım numunelerin saf karışıma kıyasla sırasıyla %43.4, %78.9, %35.2 ve %26.7; geopolimer katkılı karışımlar ise yine sırasıyla %49.5, %91.6 %176.2 ve %28.1 oranlarında artış meydana gelmiştir. Hem FeCR hem de geopolimer katkılı karışım numunelerinin saf karışım numunelerine oranla, sünme sertliğinin 50°C’de daha yüksek bir sonuç verdiği fakat 40 °C sıcaklık verilerine kıyasla biraz daha az sünme sertliği değerlerinin elde edildiği söylenebilir.

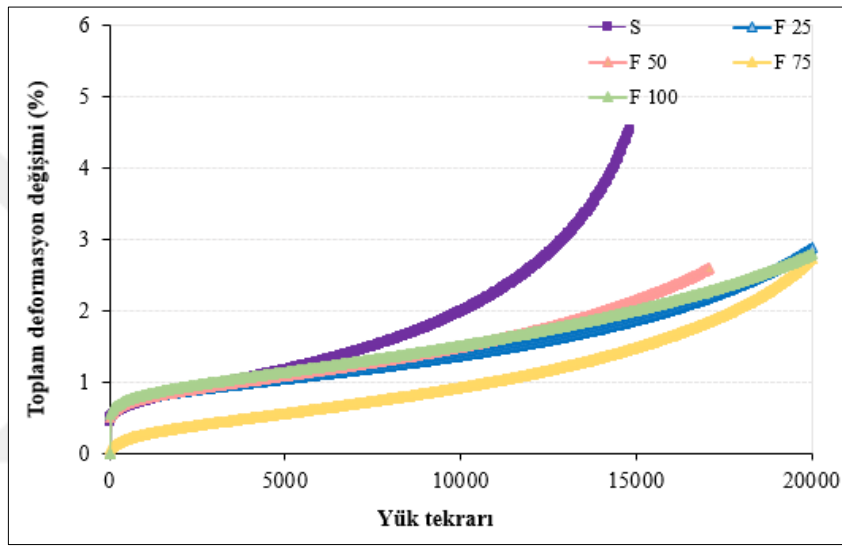
Bu sonuçlara göre, yapılan iki sıcaklık değerinde de, geopolimer katkısıyla hazırlanan karışım numunelerinin verdiği sünme sertliği sonuçları ve FeCR katkılı numunelerin sonuçları kıyaslandığında geopolimer katkılı karışımlarda daha yüksek sünme sertliği değerlerine ulaşıldığı görülmektedir. FeCR katkılı karışımlarda en yüksek değerin %50 FeCR katkı oranında verdiği, fakat geopolimer katkılı numunelerde ise en yüksek değerin %75 oranında olduğu görülmektedir. Sünme sertliği değerinin yüksek olması; geopolimer ilave edilen BSK kaplamada oluşabilecek kalıcı deformasyonlara karşı gösterdiği direnci arttırarak, karışımdaki katkı ile agreganın daha iyi bir adezyon sağlamasına katkı sağlar. Yüksek sıcaklıklarda %50 FeCR katkılı karışımdaki pik değerinin geopolimer ilavesiyle %75 FeCR oranına yükselmesi, bu karışımların tekerlek izi oluşumuna karşı dayanımını daha da arttırdığını söylemek mümkündür.

6.4.6 Dinamik sünme deney sonuçları

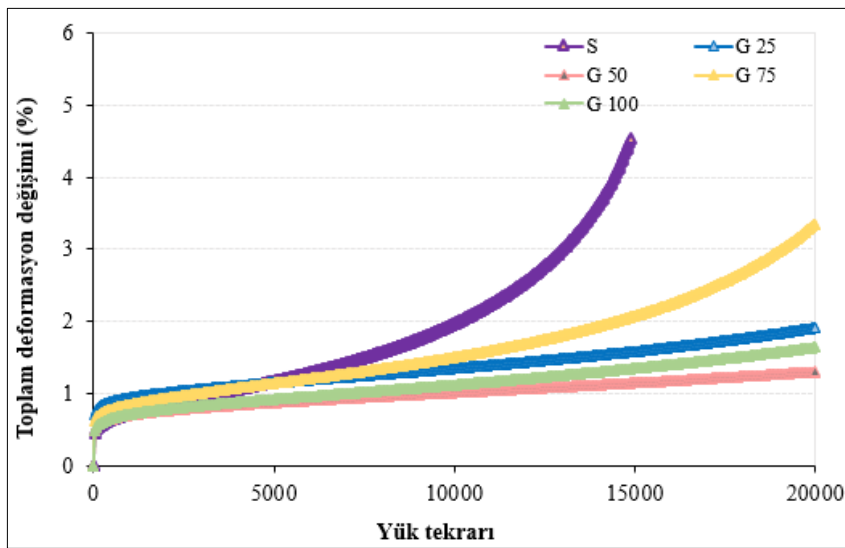
Saf, geopolimer ve FeCR ikameli numunelere yapılan dinamik sünme deneyi 50 °C’de IPC deney cihazında uygulanmıştır. Deneyde haversine yükleme şartı seçilerek, her numune ana yüklemeden önce 10 dk. boyunca 10 kPa ön yüklemeye tabi tutuldu. Daha sonra, saptırıcı gerilimi 500 kPa ve temas gerilimi 10 kPa’lık sinüzoidal bir yüklemeye maruz bırakıldı. Dinlenme süresi 500 ms, yükleme periyodu ise 1000 ms olarak seçildi. Deneyde numunelere 20.000 vuruş yapıldıktan sonra deney sonlandırılmıştır. Deneyde kullanılan karışım numunelerinin özellikleri Çizelge 6.13’de verilmiştir. Bu karışım numunelerinde oluşan toplam deformasyon değişimi – yük tekrarı verileri ise Şekil 6.22 ile Şekil 6.23’de verilmiştir.

Çizelge 6.13: Karışım numunelerinin fiziksel özellikleri.

Karışım türü	Ortalama yükseklik (mm)	A (hava) (gr)	B (su) (gr)	C (doy) (gr)	Dp (gr/cm ³)	Dt (gr/cm ³)	Vh (%)
S	63.90	1249.16	728.53	1250.08	2.395	2.49	3.93
F 25	64.20	1249.64	728.64	1250.68	2.394	2.49	3.98
F 50	64.30	1250.65	729.32	1251.58	2.395	2.49	3.95
F 75	64.10	1251.30	727.68	1251.95	2.387	2.49	4.27
F 100	64.20	1249.97	728.27	1250.61	2.393	2.49	4.01
G 25	64.45	1251.25	730.40	1252.48	2.397	2.49	3.87
G 50	64.60	1252.47	731.36	1253.74	2.398	2.49	3.83
G 75	64.20	1252.49	731.52	1253.78	2.398	2.49	3.81
G 100	64.40	1252.78	730.91	1254.03	2.395	2.49	3.94



Şekil 6.22: Saf ve FeCR katkılı numunelerin toplam deformasyon ilişkisi-yük tekrarı.

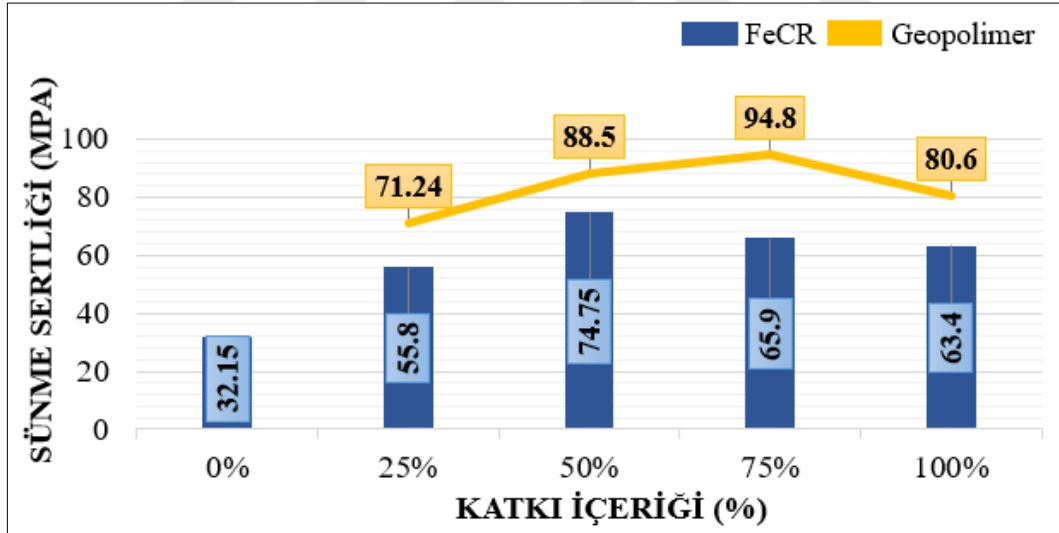


Şekil 6.23: Saf ve geopolimer katkılı numunelerin toplam deformasyon -yük tekrarı.

Şekil 6.22 ile Şekil 6.23'e beraber bakıldığında, saf karışım ve FeCR ikameli karışım numunelerinde deformasyonun başlangıç esnasında hızla artış gösterdiği ve bu artmanın doğrusal bir şekilde ilerlediği görülmektedir. Aynı zamanda, geopolimer ikameli karışım numunelerinin deformasyonu ise saf karışım ve FeCR ikameli karışım numunelerine kıyasla daha yavaş arttığı söylenebilir. Bununla birlikte, saf karışım numunelerine bakıldığında, numune meydana gelen artış ile birlikte üçüncü bölgede bozulmaya başlamıştır. Ardından, hızla tekrar artış eğilimi göstermiştir.

Deney, FeCR ve geopolimer katkılı karışımlarda ise karışım numuneleri üçüncü bölgeye geçtiğinde sonlandırılmıştır. Bulunan tüm sonuçlar incelendiğinde, saf karışım ile FeCR ve geopolimer ikameli numunelerin belirli bir yük tekrar sayısına kadar benzer davranış göstermediği görülmektedir. Saf karışım numuneleri deneye 15000 yük tekrar sayısına gelinceye dek devam edilmiştir. Bundan dolayı, FeCR ve geopolimer katkılı karışımların saf karışım numuneleriyle doğru bir şekilde kıyaslanabilmesi için sünme sertliğinde 15000 yük tekrarındaki veriler baz alınmıştır.

Hesaplanan katkı oranına göre sünme sertliği değerlerinin değişimi Şekil 6.24'de verilmiştir.

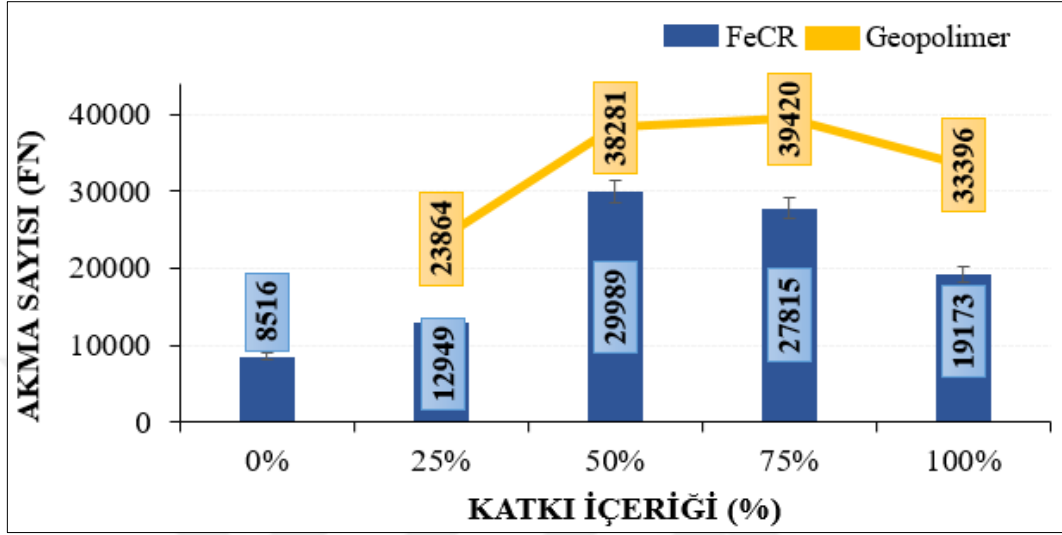


Şekil 6.24: Numunelere ait sünme sertliği değişimleri.

Şekil 6.24'e bakıldığında, sünme sertliği değerlerinde saf karışıma kıyasla, katkı oranı artışı ile önemli ölçüde bir artış meydana geldiği görülmektedir. Meydana gelen artışlar FeCR ikameli karışım numunelerinde saf numunelere kıyasla sırasıyla, %73.6, %132.5, %105 ve %97.2 gibi ciddi oranlarda meydana gelirken, geopolimer katkılı karışım numunelerinin ise %121.6, %175.3, %194.9 ve %150.7 gibi epey yüksek oranlarda meydana gelmiştir. Deneydeki tüm sonuçlara bakıldığında, saf karışıma kıyasla geopolimer katkılı karışım

numunelerinin (özellikle %75 oranında) yüksek sıcaklıklardaki bölgelerde tekrarlı yüklerin oluşturduğu kalıcı deformasyonlara karşı gösterdiği direnç çok daha yüksektir.

Bu deneyde, BSK'ların sünme sertliği ve yük tekrarı değerleri kullanılarak akma sayısı (FN) değerleri de tespit edilmiştir. Belirlenen FN verileri Şekil 6.25'de verilmiştir.



Şekil 6.25: Karışım numunelerine ait FN değerleri.

BSK'ların tekerlek izine karşı dayanımı ile alakalı olan FN değeri, sünme sertliği ve yük tekrar sayısı değerlerinin çarpılması ile yük tekrarı sayısının grafiğinden elde edilmektedir. Bulunan sonuçlar incelendiğinde, saf karışım numunelerine kıyasla FeCR ikameli numunelerin akma değerlerinde %52.1, %252.15, %226.6 ve %125.1 oranlarında artış gösterirken, geopolimer katkılı numunelerde ise bu artışlar %180.2, %349.5, %362.9 ve %292.2 gibi yüksek oranlarda meydana gelmiştir.

Deneydeki tüm sonuçlara bakıldığında, tekerlek izi oluşumuna karşı en yüksek direnç gösteren numunelerin %75 geopolimer katkılı karışım numuneleri olduğu söylenebilir. Bu sonuca göre, geopolimer (bitüm+FeCR+AA) oluşumunun agrega ile iyi bir yapışma yeteneği göstermesidir. Böylelikle karışım içerisinde iyi bir adezyon kuvveti oluşur. Aynı zamanda, bağlayıcının yüksek sıcaklık dayanımının artış göstermesi nedeniyle geopolimer ikameli BSK'nın deformasyon direncinde artış meydana geleceği şeklinde değerlendirilmektedir.

6.4.7 Dolaylı çekme yorulma deney sonuçları

Saf, FeCR ve geopolimer ikameli sıcak karışım numunelerinin orta sıcaklıklardaki yorulmaya karşı dirençlerini tespit etmek için bütün karışım numuneleri 3500N ve 4000N

gerilme seviyelerinde, 25°C sıcaklıkta yorulma deneyine maruz bırakılmıştır. Deney başlatılmadan önce bütün karışım numuneleri IPC cihazının iklimlendirme kabini içerisinde 3 saat boyunca 25°C sıcaklıkta koşullandırılmak üzere bırakılmıştır. Numune 3 saat bittiğinde, cihaz içerisindeki aparata yerleştirilmiştir. Ardından numuneye paralel olacak şekilde düşey deformasyonu tespit etmek için LVDT’ler bağlanarak ayarlanmıştır. Bu deneyde, yükleme periyodu değeri 1.5 sn alınmıştır. Bu da 0.124 sn. yük etki süresi ve 1.376 sn. dinlenme süresi şeklinde ayarlanmıştır.

Yorulma deneyi sonunda, karışım numunelerinin yük tekrar sayıları ile bu tekrara karşılık gelen düşey deformasyon değerleri tespit edilmiştir. Ayrıca numunenin kırıldığı andaki en yüksek yük tekrar sayısı “N_{maks}” ve en yüksek yük tekerrür sayısındaki deformasyonlar ise “δ_{maks}” olarak adlandırılmaktadır. Yorulma deneyi sonunda her numune için, bulunan veriler kullanılarak yük tekrar sayısı – deformasyon grafikleri çizilmiştir. Bu grafiklerden II. ve III. bölge yerleri belirlenmiştir. Daha sonra, belirlenen bu bölgeler üzerinde teğet çizgileri çizilmiş ve doğru denklemleri elde edilmiştir. Elde edilen bu iki denklem birbirine eşitlenir ve kesişim noktasından yorulma değeri “N_f” bulunmuştur. Ardından, karışım numunelerinin belirlenen “N_f” değerine karşılık gelen deformasyon miktarları “δ_f” belirlenmiştir. Ayrıca, çizilen grafikler üzerinde, yük deformasyon eğrisinde II. Bölgede, çatlak başlangıcı yük tekrar sayıları “N_i” değeri (eğimin artmaya başladığı nokta olan) belirlenmiştir. Ayrıca, bu değere denk gelen deformasyon miktarı da “δ_i” belirlenmiştir. Grafiklerden, çatlak ilerlemesi yük tekrar sayısı olan “N_p” değeri, I. bölgenin bitimindeki çatlak başlangıcı yük tekrar sayısı ile “N_f” değerinin farkı ile bulunmuştur. “N_i-N_f” değerlerinde çatlağın her bir mm ilerleyebilmesi için gereken yük tekrar sayıları “r_p” değeri Denklem (6.15) yardımıyla hesaplanmıştır.

$$r_p = \frac{N_p}{\delta_f - \delta_i} \quad (6.15)$$

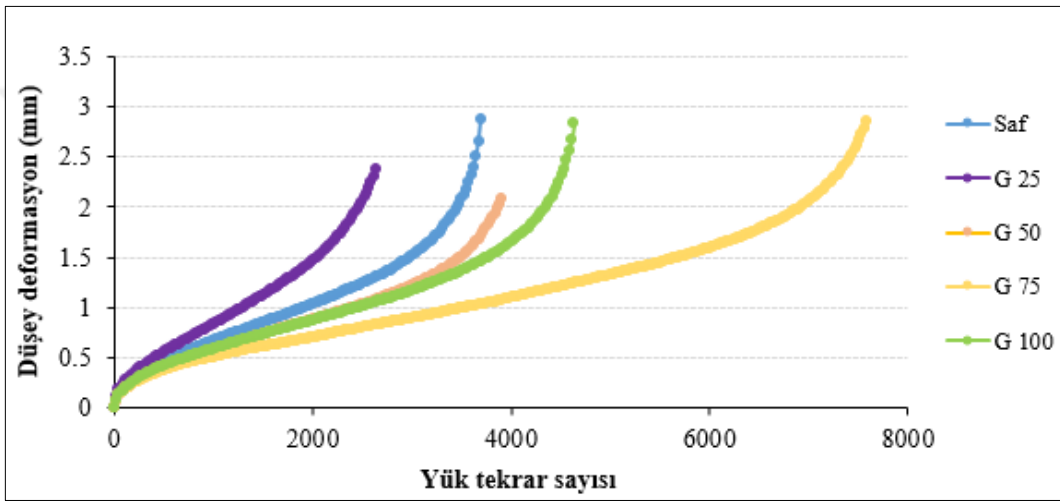
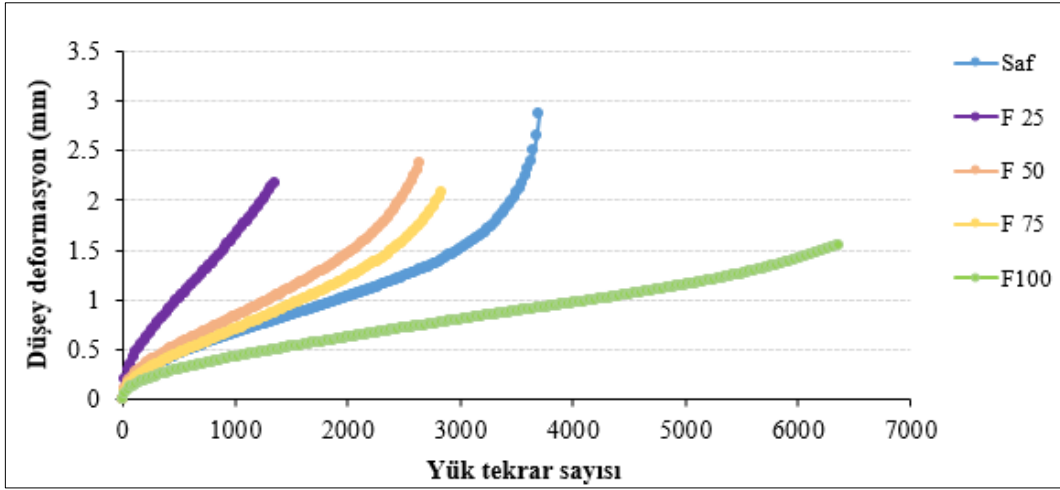
Saf, FeCR ve geopolimer ikameli sıcak karışım numunelerine ait özellikler Çizelge 6.14 ve Çizelge 6.15’de, her iki gerilme seviyesindeki yük tekrar sayısı ve deformasyon arasındaki ilişki Şekil 6.26 ile Şekil 6.27’de verilmiştir. Karışım numunelerinin yine her iki gerilme seviyelerindeki (3500N ve 4000N) belirlenen sonuçları Çizelge 6.16’da verilmiştir.

Çizelge 6.14: Karışım numunelerinin özellikleri (3500N).

Karışım türü	Ortalama yükseklik (mm)	A (hava) (gr)	B (su) (gr)	C (doy) (gr)	Dp (gr/cm ³)	Dt (gr/cm ³)	Vh (%)
S	63.80	1249.78	728.91	1251.03	2.394	2.49	3.99
F 25	63.90	1249.85	728.85	1251.24	2.393	2.49	4.03
F 50	64.20	1250.63	730.28	1251.85	2.398	2.49	3.82
F 75	64.10	1250.89	730.45	1251.92	2.399	2.49	3.78
F 100	64.30	1250.34	729.55	1251.01	2.398	2.49	3.82
G 25	64.70	1251.45	729.47	1252.17	2.393	2.49	4.02
G 50	64.60	1252.27	730.58	1253.46	2.395	2.49	3.94
G 75	64.80	1252.35	730.63	1253.58	2.395	2.49	3.94
G 100	64.50	1251.60	729.56	1253.03	2.391	2.49	4.09

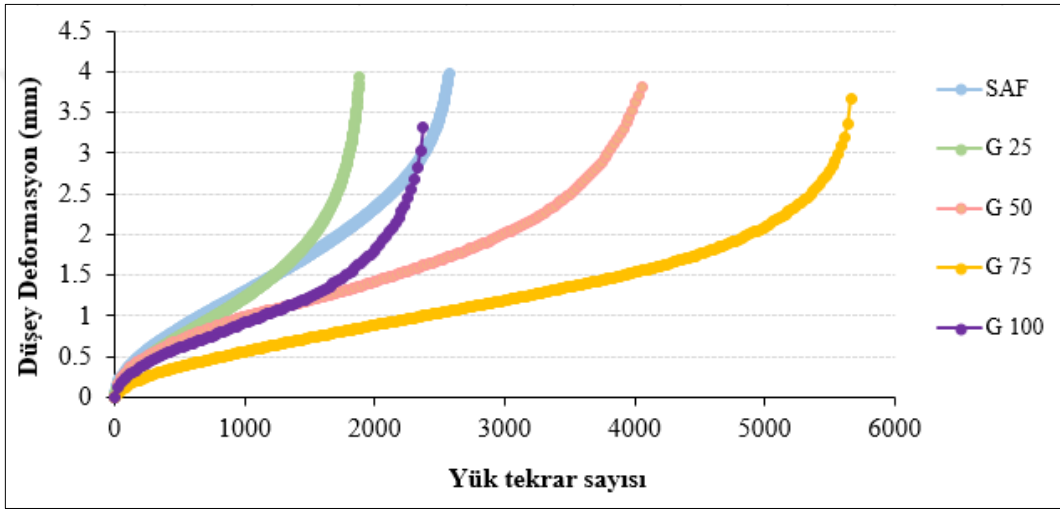
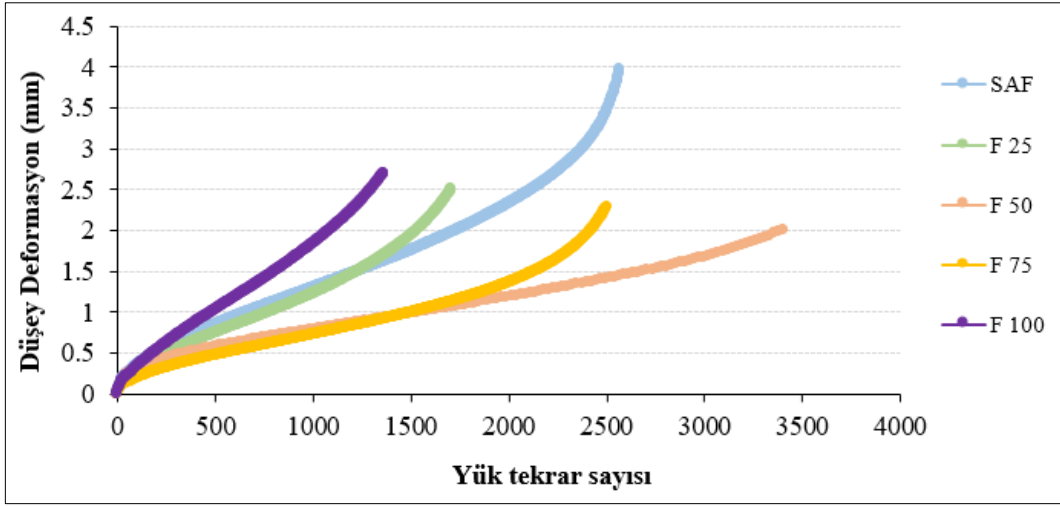
Çizelge 6.15: Karışım numunelerinin özellikleri (4000N).

Karışım türü	Ortalama yükseklik (mm)	A (hava) (gr)	B (su) (gr)	C (doy) (gr)	Dp (gr/cm ³)	Dt (gr/cm ³)	Vh (%)
S	64.10	1249.60	728.42	1250.68	2.393	2.49	4.03
F 25	64.30	1250.15	729.25	1251.66	2.393	2.49	4.01
F 50	63.90	1249.80	729.43	1251.93	2.392	2.49	4.06
F 75	64.10	1249.02	728.27	1250.54	2.392	2.49	4.07
F 100	64.20	1250.66	729.56	1251.31	2.397	2.49	3.85
G 25	64.50	1251.25	729.89	1252.85	2.393	2.49	4.03
G 50	64.60	1252.41	731.62	1253.15	2.400	2.49	3.74
G 75	64.70	1252.36	730.54	1253.37	2.395	2.49	3.92
G 100	64.40	1252.80	730.49	1253.38	2.396	2.49	3.89



Şekil 6.26: 3500N gerilme altında numunelere ait düşey deformasyon- yük tekrar sayısı ilişkisi.

Şekil 6.26 değerlendirildiğinde, 3500N gerilme seviyesinde saf karışım numunelerine göre FeCR ve geopolimer ikameli karışım numunelerinin katkı oranı arttıkça yük tekrar sayılarının çoğunlukla artış gösterdiği görülmektedir. Aynı zamanda, FeCR oranı arttıkça FeCR ikameli karışım numunelerinin düşey deformasyon değerlerinin genel olarak azaldığı görülmektedir. Fakat geopolimer katkılı karışım numunelerinin ise düşey deformasyon değerlerinin düzensiz olduğu görülmektedir.



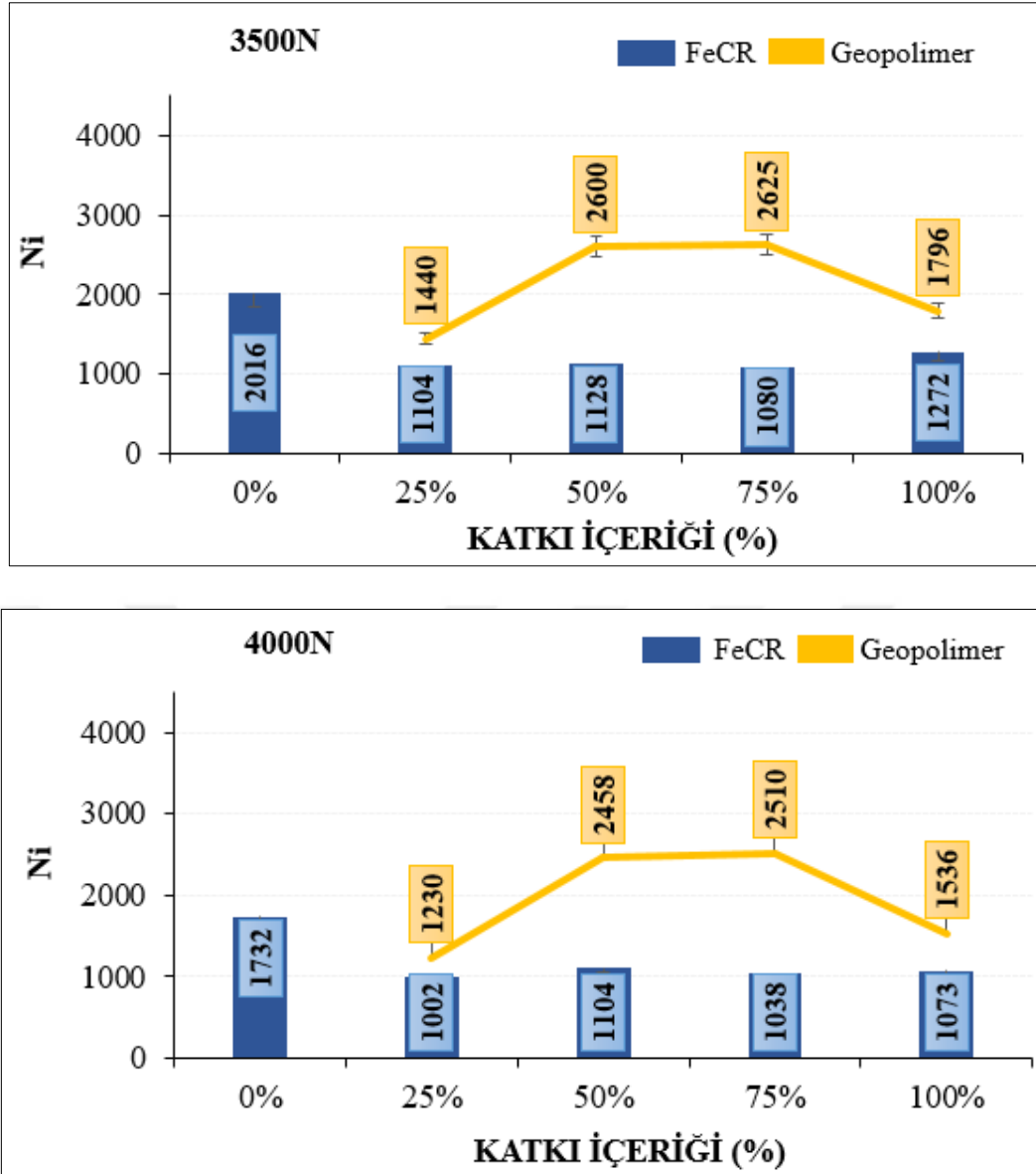
Şekil 6.27: 4000N gerilme altındaki ait düşey deformasyon- yük tekrar sayısı değişimi.

Şekil 6.27’de bakıldığında, 4000N gerilme seviyesinde FeCR katkısının artmasıyla birlikte saf karışım numunelerine kıyasla FeCR ve geopolimer ikameli karışım numunelerinin genel olarak yük tekrar sayılarında artma olduğu söylenebilir. Ayrıca, bu karışımların düşey deformasyon değerlerinde azalma olduğu görülmektedir.

Çizelge 6.16: Farklı gerilme seviyelerinde meydana gelen yorulma test sonuçları.

Karışım türü		Deneye maruz bırakılan 3 karışım numunesinin ortalama değerleri							
		Ni	δi	Nf	δf	Np	Nmak	δmak	rp
S	3500N	2016	1.038	2352	1.717	336	3696	2.868	2526.32
	4000N	1732	1.522	2000.99	1.701	268.99	2571	3.673	1502.74
F 25	3500N	1104	1.592	1342.25	1.980	238.25	1344	2.172	614.05
	4000N	1002	1.424	1234.85	1.704	232.85	1710	2.503	831.61
F 50	3500N	1128	1.114	1566.36	2.006	438.36	2640	2.377	491.43
	4000N	1014	1.527	1370.22	1.890	266.22	3408	2.012	733.39
F 75	3500N	1080	0.743	1322.47	1.140	242.47	2832	2.078	610.76
	4000N	1038	0.962	1184.25	1.705	146.25	2502	2.278	196.84
F 100	3500N	1272	0.484	1503.15	0.571	231.15	6350	1.554	2656.90
	4000N	1073	0.975	1230.42	1.316	157.42	1365	2.703	461.64
G 25	3500N	1440	1.650	1607.45	2.007	167.45	2640	2.377	469.05
	4000N	1230	1.694	1579.65	2.225	349.65	1830	3.188	658.47
G 50	3500N	2600	1.235	2944.68	1.516	344.68	3912	2.408	1226.62
	4000N	2458	1.767	2735.32	1.960	277.32	3936	3.369	1436.89
G 75	3500N	2625	1.864	3217.81	2.011	592.81	7656	2.925	4032.72
	4000N	2510	2.175	2885	2.324	375.00	5664	3.876	2516.78
G 100	3500N	1796	1.841	2051.46	1.967	255.46	4632	2.831	2027.46
	4000N	1536	1.865	1745.46	1.998	209.46	2376	3.325	1574.89

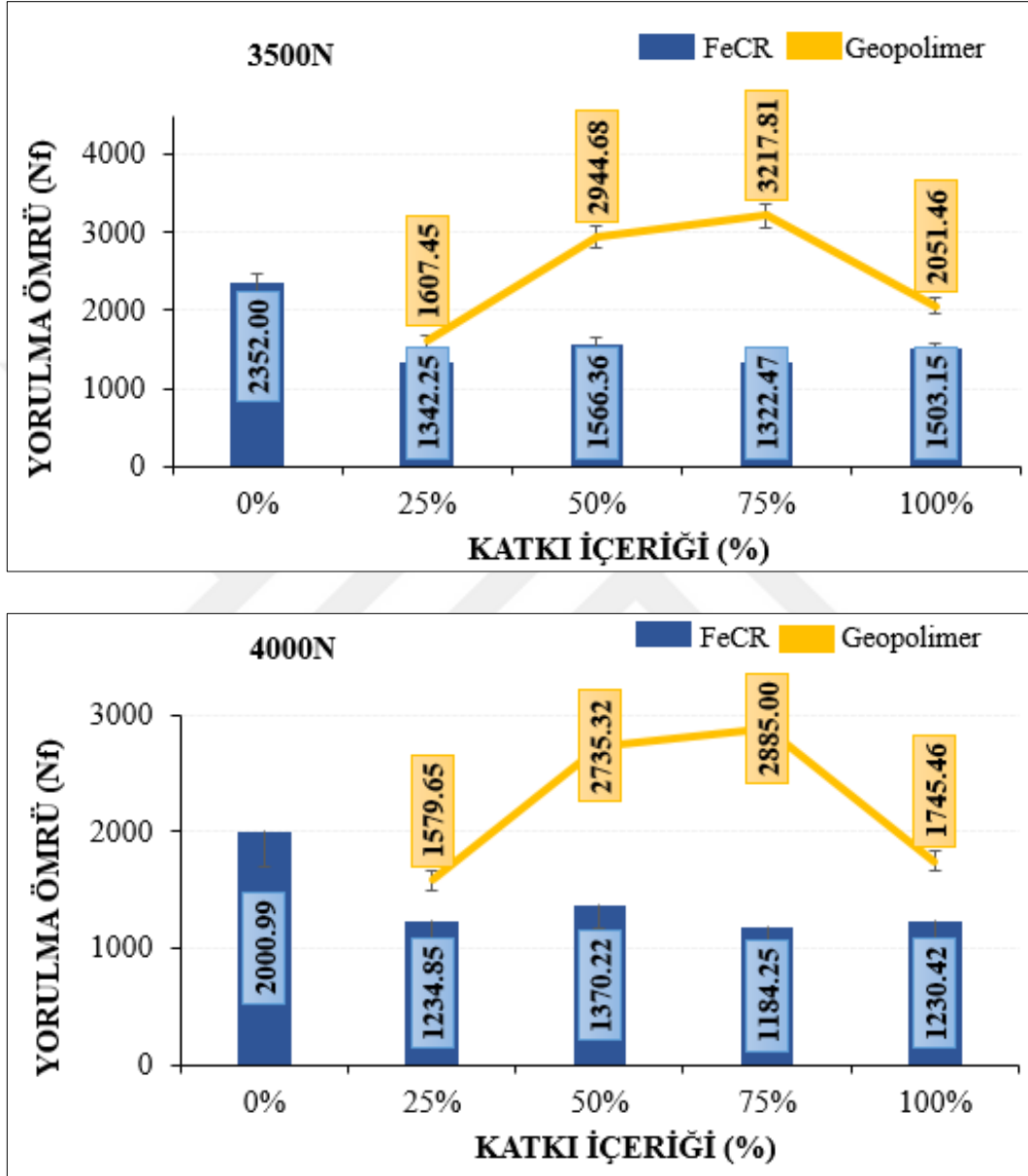
Her iki gerilme (3500N ve 4000N) seviyelerinde 3 briket numunesinden belirlenen çatlağın meydana geldiği ‘yük tekrar sayılarının (Ni)’ ortalamasının katkı oranına kıyasla gösterdiği değişiklikler Şekil 6.28’de, ‘yorulma ömrünün (Nf)’ ortalamasının katkı oranına kıyasla göstermiş olduğu değişiklikler ise Şekil 6.29’da verilmiştir. Çatlağın ilerlemesi için gereken yük tekrar sayısı “Np” ortalamasının katkı oranına kıyasla gösterdiği değişiklikler Şekil 6.30’da, en yüksek yük tekrar sayılarının “Nmaks” ortalamasının katkı oranına kıyasla gösterdiği değişiklikler ise Şekil 6.31’de verilmiştir.



Şekil 6.28: Ni – katkı içeriği değişimi.

Şekil 6.28’deki grafiğe bakıldığında, 3500N ve 4000 N gerilme seviyelerinde FeCR katkılı karışım numunelerinin çatlak başlangıcı yük tekrar sayısı değeri ‘Ni’, saf karışım numunelerine kıyasla azalma meydana geldiği görülmektedir. Fakat aynı gerilme seviyelerinde saf karışıma kıyasla geopolimer katkılı karışım numunelerinin Ni değerlerinde genel olarak artış gösterdiği görülmektedir. Yine saf karışıma kıyasla 3500N gerilme seviyesinde, FeCR katkılı karışım numunelerinde oluşan farklar %45.2, %44, %46.4 ve %36.9 oranlarında azalma, geopolimer katkılı karışımların ise %28.6 azalma, %28.97 ve %30.2 artış, %10.9 azalma meydana gelmiştir. 4000N gerilme seviyesinde FeCR ikameli karışım numunelerindeki değişimler saf karışımlara kıyasla %42.1, %36.3, %40.1 ve %38 oranlarında azalma, geopolimer karışımların ise sırasıyla %29.0 azalma, %41.92 ve %44.92

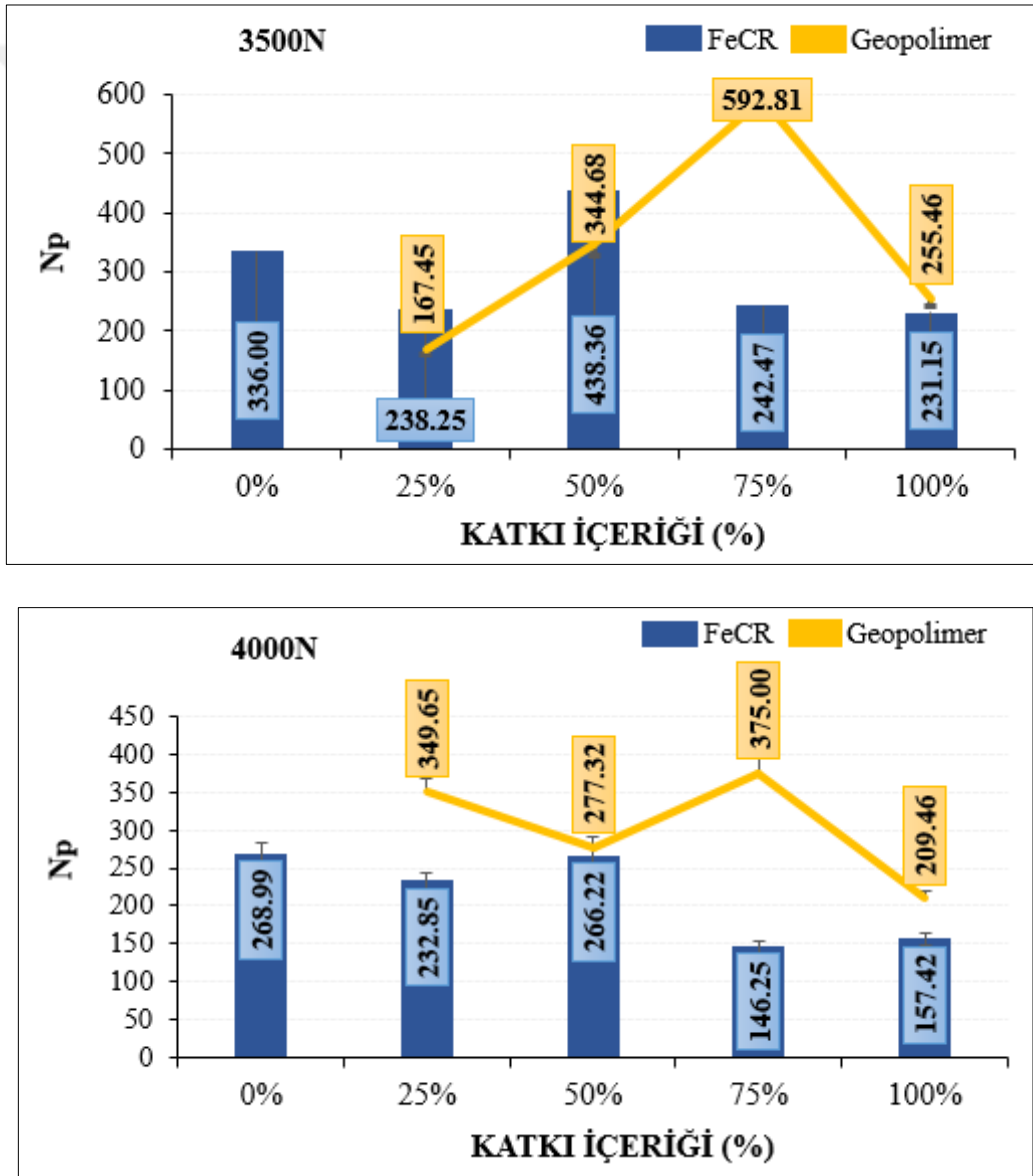
artış, %11.3 oranında azalma şeklindedir. Bütün sonuçlar göz önüne alındığında, saf ve FeCR katkılı karışım numunelerine kıyasla geopolimer katkılı karışım numunelerinde çatlak meydana gelmesi için gerekli olan yük tekrar sayısının daha yüksek bir değerde (özellikle %75 geopolimer oranına sahip) olması gerektiği sonucuna varılabilir.



Şekil 6.29: Nf – katkı içeriği ilişkisi.

Şekil 6.29'a bakıldığında, 3500N ve 4000N gerilme seviyelerinde FeCR katkılı karışımların yorulma ömründe azalma meydana geldiği, geopolimer katkılı karışım numunelerinin ise genel olarak arttığı söylenebilir. 3500N gerilme seviyesinde, FeCR ikameli karışım numunelerinde oluşan değer farklılıkları saf karışım numunelerine göre sırasıyla %42.9, %33.4, %43.8 ve %36.1 oranlarında azalma, geopolimer katkılı karışımların ise %31.7

azalma, %25.2 ve %36.81 oranlarında artış, %12.8 oranında azalma meydana gelmiştir. 4000N gerilme seviyesinde ise FeCR katkılı karışım numunelerinde sırasıyla %38.3, %31.5, %40.8 ve %38.5 oranlarında azalma, geopolimer katkılı karışımların ise sırasıyla %21.1 azalma, %36.7 ve %44.18 oranlarında artış, %12.8 oranında azalma şeklindedir. 3500N ve 4000N gerilme seviyelerindeki katkı içeriğiyle meydana gelen değişimlere bakıldığında, en uzun yorulma ömrünü veren karışımın numunelerinin %75 geopolimer katkılı karışım numunelerinden elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre, geopolimer katkısı bağlayıcı ile reaksiyona girerek asfaltın içinde iyi bir dağılım özelliği göstermektedir. Ek olarak, geopolimer+asfalt karışımı agrega ile karıştırıldığında iyi bir yapışma özelliği göstermesi nedeniyle olduğu değerlendirilmektedir.



Şekil 6.30: Np – katkı içeriği değişimi.

Şekil 6.30 incelendiğinde, çatlak ilerleme yük tekrar sayısının gerilme seviyesinde artma meydana geldiği anda değiştiği görülmektedir. Buradaki ‘Np’ değeri, ‘Nf – Ni’ değerinden elde edilir. Çatlak ilerlemesi için 3500N gerilme seviyesinde gerekli olan yük tekrar sayısında en yüksek değere sahip karışımlar %75 geopolimer katkıli karışımlardır. 4000N gerilme seviyesinde de en yüksek olduğu karışımlar yine %75 geopolimer katkıli karışımlardır.

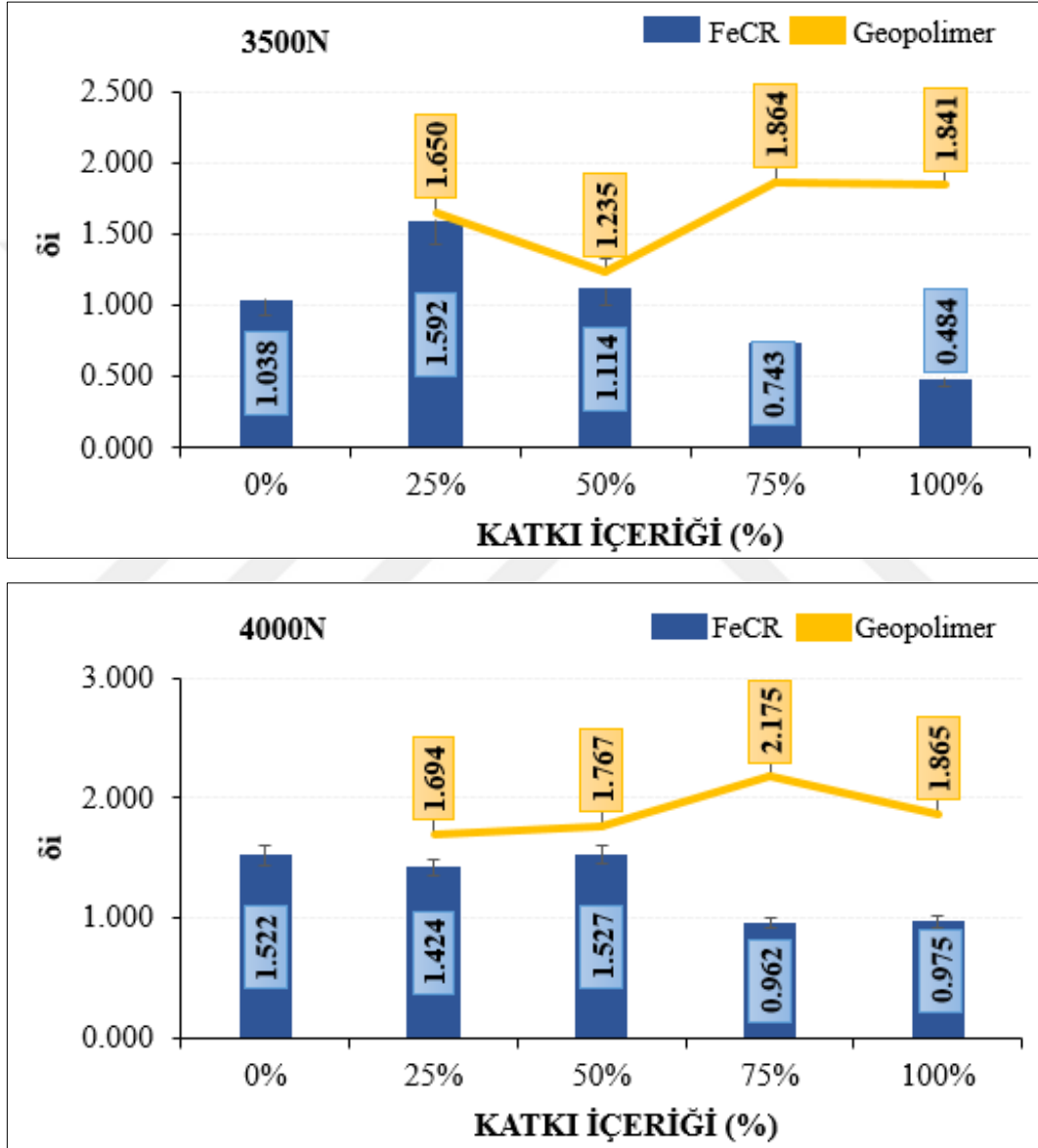


Şekil 6.31: Nmaks – katkı içeriği değişimi.

Şekil 6.31’e bakıldığında, her iki gerilme seviyesindeki bu sonuçlara göre, FeCR ve geopolimer katkıli karışım numunelerinin en yüksek yük tekrar sayısı (Nmaks) değerlerindeki değişiklikler saf karışımla kıyaslandığında, geopolimer katkıli karışımların (özellikle %75 oranında) daha iyi bir sonuç verdiği söylenebilir.

Nf, Ni ve Nmaks değerlerinin sonuçları beraber incelendiğinde, geopolimer katkısının kullanımıyla birlikte karışımların yorulma ömrü değerlerinde artma meydana geldiği görülmektedir. Her iki gerilme seviyelerinde de en yüksek yorulma ömrü değerinin %75 geopolimer katkılı karışımlarda olduğu belirlenmiştir.

Çatlağın oluşmasındaki deformasyonlar “ δi ” değeri ortalamasının katkı oranıyla olan ilişkisi Şekil 6.32’de verilmiştir.

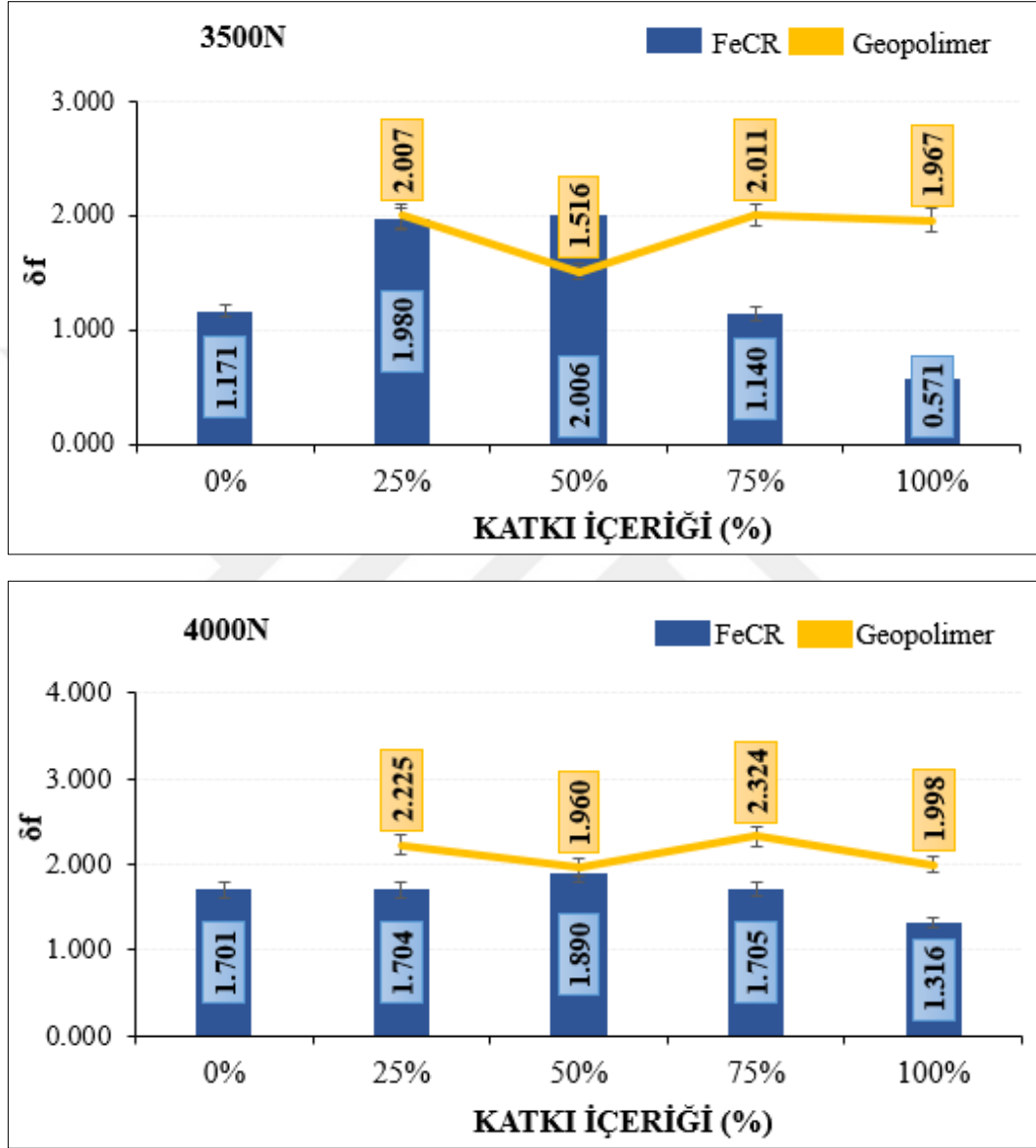


Şekil 6.32: δi – katkı oranına göre değişimi.

Şekil 6.32’ye bakıldığında, karışım numunelerinin ‘ δi ’ değerlerinde, gerilme seviyesi arttıkça genel olarak bir artma meydana gelmektedir. δi değeri, çatlak başlangıcı yük tekrar sayısındaki deformasyon oranını ifade eden bir değerdir. Deney sonuçları incelendiğinde,

saf ve FeCR ikameli karışım numunelerine kıyasla geopolimer katkıli karışım numunelerinde daha az δf değerleri olduğu görülmektedir.

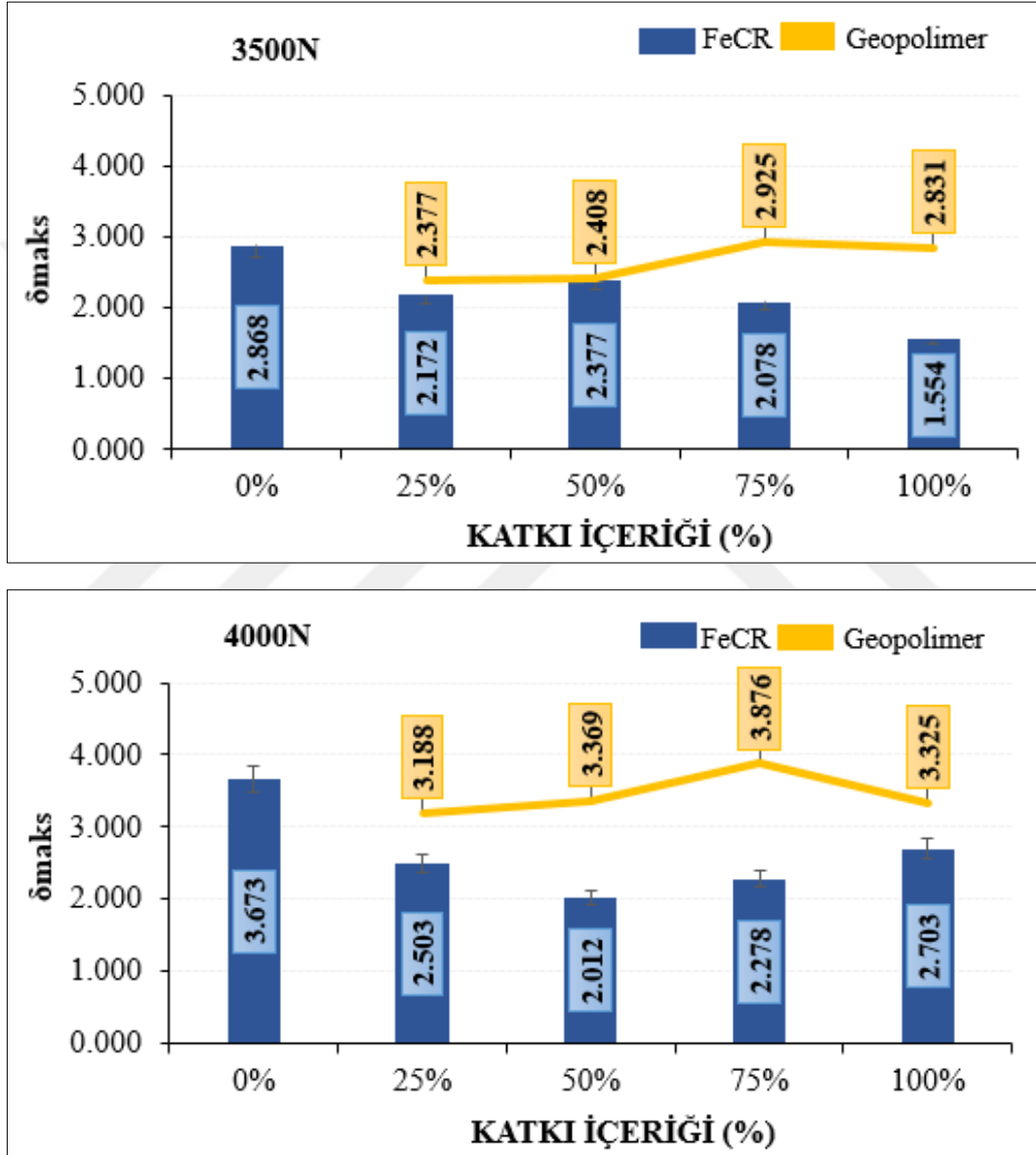
Yorulma ömründeki (Nf) deformasyon miktarlarının “ δf ” değerlerinin ortalamasının katkı artışına bağlı olarak değişimleri Şekil 6.33’de verilmiştir.



Şekil 6.33: δf – katkı içeriği ilişkisi.

Şekil 6.33’de, gerilme seviyesinde artma oldukça saf karışım numunelerine kıyasla FeCR ve geopolimer katkıli karışım numunelerinin yorulma ömrü değerine karşılık gelen düşey deformasyon değerlerinde artış olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, gerilme seviyesinin artmasıyla birlikte karışım numunelerinin yük tekrar sayılarının neredeyse azaldığı söylenebilir. Ancak bu azalmaya rağmen geopolimer katkıli karışım numunelerinin genel olarak saf karışım numunelerine kıyaslandığında hemen hemen aynı oranlarda düşey

deformasyon değerlerinin olduğu görülmekte ve belirlenen bu sonuç olumlu olarak değerlendirilmektedir. Elde edilen sonuçlara göre, geopolimer katkısının BSK içerisinde homojen bir şekilde karışmasından kaynaklanmaktadır. Böylelikle geopolimer katkılı sıcak karışım kaplamada daha az deformasyon meydana geleceği şeklinde değerlendirilmektedir. Maksimum yük tekrar sayılarındaki deformasyon miktarlarının “ δ_{maks} ” ortalamasının katkı artış oranına bağlı olarak değişimleri ise Şekil 6.34’de verilmiştir.



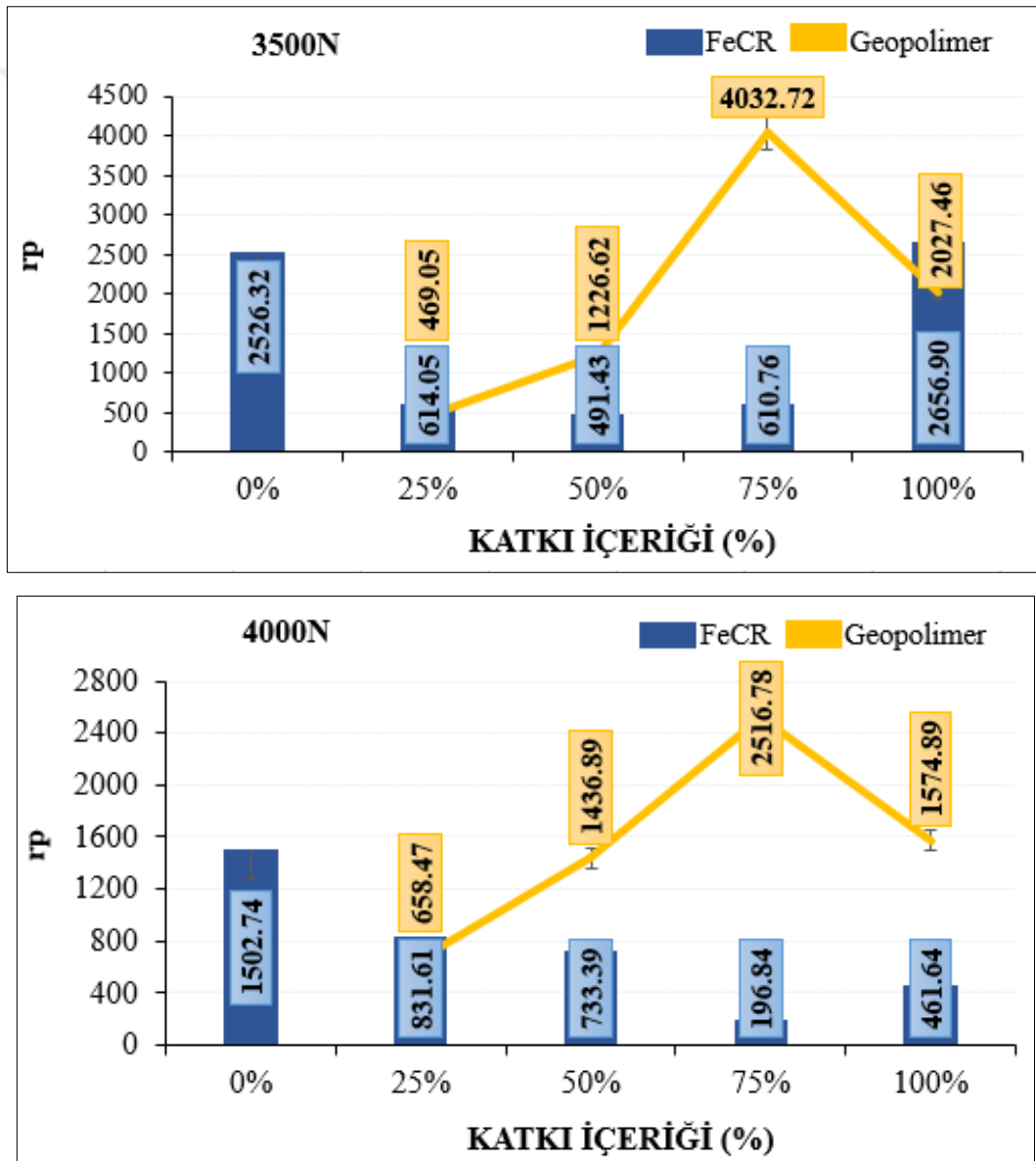
Şekil 6.34: δ_{maks} – katkı içeriği ilişkisi.

Şekil 6.34 incelendiğinde, saf karışımla kıyaslandığında FeCR ve geopolimer katkısının kullanılmasıyla sıcak karışım numunelerinin en yüksek yük tekrar sayısındaki düşey deformasyon (δ_{maks}) verilerinde değişiklikler olduğu görülmektedir. Maksimum ‘ δ_{maks} ’

değeri her iki (3500N ve 4000N) gerilme seviyelerinde de saf karışım numunelerine kıyasla %75 geopolimer oranında elde edilmiştir.

δf , δm_{aks} ve δi değerlerinden bulunan sonuçlar beraber incelendiğinde, FeCR ve geopolimer katkılı karışım numunelerinde çoğunlukla saf karışım numunelerine kıyasla daha düşük deformasyonların oluşacağı söylenebilir. Bu yüzden bu karışımlarla hazırlanan BSK kaplamalarda daha gevrek bir kırılma davranışı sergileyeceği ifade edilebilir.

Çatlak meydana geldikten sonraki yorulma ömrü değerine gelene kadar olan her 1 mm deformasyon için gereken yük tekrar sayını simgeleyen çatlak ilerleme oranı verilerinin “rp” katkı artış oranına bağlı olarak değişimi ise Şekil 6.35’da verilmiştir.



Şekil 6.35: rp – katkı içeriği değişimi.

Şekil 6.35'deki grafikler değerlendirildiğinde, 3500N ve 4000N gerilme seviyesinde %75 geopolimer katkılı numunelerde saf ve FeCR katkılı karışım numunelerine kıyasla çatlak ilerleme oranının (rp) arttığı görülmektedir. Böylelikle, geopolimerin BSK'ların yorulma çatlağı oluşmasından dolayı yapılacak olan tekrar inşa edilme veya bakım-onarım ihtiyaçlarını geciktirebileceği söylenebilir.

Bütün sıcak karışımların performans deney sonuçları beraber incelendiğinde, saf karışım numunelerine göre FeCR ikameli karışım numunelerinin performans özelliklerinde oldukça ciddi iyileşmeler meydana geldiği ifade edilebilir. Fakat en yüksek performans özelliklerine sahip olan karışım numunelerinin geopolimer katkılı karışımlarda olduğu ve özellikle %75 geopolimer katkılı numunelerde en yüksek değerlerin elde edildiği görülmüştür. Karışım deneyleri sonuçları ve kimyasal analizlerin sonuçları beraber incelendiğinde, bütün sonuçların bitüm+FeCR+AA karışmasıyla ortaya çıkan geopolimerin sıcak karışım içinde etkili bir kimyasal etkileşimde bulunduğu ve bağlayıcılık özelliğini arttırdığı görülmüştür. Dolayısıyla agregayla birlikte daha güçlü bir adezyon sağladığı için gerçekleştiği değerlendirilmektedir.

7. SONUÇLAR

Bu çalışmada, endüstriyel bir atık olan Ferrokrom cürufu (FeCR)'nun bitümlü sıcak karışımlarda geopolimer olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu amaçla yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir:

1. Stabilité sonuçlarına bakıldığında, FeCR katkılı karışım numuneleri arasında en yüksek stabilité değeri %8.1 artış ile %50 ferrokrom cürufu katkılı karışım numunesinde görülmektedir. Fakat geopolimer katkısı ilavesiyle en yüksek stabilité değerinin %16.36 artış ile %75 geopolimer katkılı numuneden elde edilmiştir. Bütün stabilité sonuçları göz önüne alındığında, geopolimer ile hazırlanan karışım numunelerinin FeCR katkılı numunelere kıyasla daha yüksek sonuçlar verdiği ve en yüksek sonucun ise %75 geopolimer ilaveli karışım numunelerinden elde edildiği görülmektedir. Bu sonuç, geopolimer ikameli asfalt kaplamaların trafik yükleri altında iken kaplamalarda meydana gelebilecek kalıcı deformasyonlara karşı daha dirençli olduğunu göstermektedir.

2. Akma değerlerine bakıldığında, hem FeCR hem de geopolimer katkısı ile hazırlanan kaplamaların, saf karışım ile hazırlanan kaplamalara göre neredeyse benzer davranış sergileyeceği söylenebilir.

3. MQ değerleri incelendiğinde, FeCR katkılı numunelerin saf karışıma kıyasla %50 FeCR katkılı numunede pik verdiği, fakat geopolimer katkılı numunelerde %75 oranında pik olduğu görülmektedir. Elde edilen sonuçlara göre, geopolimerin ilave edilmesiyle birlikte saf karışıma kıyasla en yüksek MQ değeri geopolimer katkılı numunelerde %7.9 oranında artış ile %75 FeCR katkı oranına çıktığı ve bu oranda da kayma gerilmelerine ve kalıcı deformasyonlara karşı yüksek bir direnç göstereceği ifade edilebilir.

4. RMS deney sonuçlarına göre, FeCR katkılı karışımlara kıyasla geopolimer katkılı karışım numunelerinin suyun etkisine göstereceği dirençte artma meydana gelmiştir ve en yüksek dayanım değerlerinin %75 geopolimer ikameli karışım numunelerinden elde edilmiştir. Bu durumda, geopolimer katkılı karışım numunelerinin FeCR ikameli numunelere göre nem hasarına karşı daha yüksek dayanım göstereceği ve dayanım açısından en iyi karışımların %75 geopolimer ikameli karışım numuneleri olduğu ifade edilebilir.

5. ITS ve Modifiye Iottman deney sonuçlarına göre, saf karışımlara kıyasla bütün katkıli karışımların suya karşı direncinin azaldığı, fakat geopolimer katkıli karışımların FeCR katkıli karışımlara göre suyun etkilerine karşı daha iyi bir dayanım göstereceği söylenebilir. Bu da, geopolimer ikameli karışım numunelerinde bitüm+FeCR+AA'nın etkili şekilde kimyasal bir reaksiyon oluşturmaları ve bitümün agregayla karışması sonucu güçlü bir kohezyon ve adezyon sağlaması nedeniyle olduğu değerlendirilmektedir.

6. ITSM deney sonuçlarına göre, saf karışımlara kıyasla FeCR ikameli sıcak karışım numunelerinin en yüksek ITSM değeri %52.2 artış oranıyla %50 FeCR katkıli numunelerden elde edilirken, geopolimer ilave edilen FeCR katkıli numunelerin ise %63.8 artış oranıyla %75 geopolimer katkıli numunelerden elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre, geopolimerin sıcak karışımların rijit davranışında çoğunlukla bir artma oluşturduğu söylenebilir. Sıcak karışımın rijitlik değerinin artmış olması, geopolimer ikameli BSK kaplamaların kalıcı deformasyonlara karşı daha dirençli bir davranış göstereceği şeklinde ifade edilebilir.

7. Statik sünme deney (40°C ve 50°C sıcaklıklarında) sonuçlarına göre, saf karışıma kıyasla, bütün karışımların sabit yükler altında deformasyonlara karşı gösterdiği en yüksek direnç, %258.1 ve %176.2 artış oranlarında %75 geopolimer katkıli numunelerde görülmüştür. Bu sonuçlara göre, geopolimer katkıli numunelerin yüksek sıcaklıktaki bölgelerdeki kaplamaların tekerlek izi oluşumuna karşı dayanımı arttırmak için kullanılabilirliğinin uygunluğunu göstermiştir.

8. Dinamik sünme deney sonucuna göre, katkı yüzdesinin artmasıyla birlikte FeCR ikameli karışım numunelerinde, saf numunelere kıyasla sırasıyla %132.5 artışla %50 FeCR oranında oluşurken, geopolimer katkıli numunelerin ise %194.9 artışla %75 FeCR katkıli numunelerde daha yüksek miktarlarda meydana gelmiştir. Deney sonuçlarına bakıldığında, saf karışım numunelerine kıyasla geopolimer katkıli karışım numunelerinin (özellikle %75 oranında) yüksek sıcaklıklardaki bölgelerde tekrarlı yüklerin oluşturduğu kalıcı deformasyonlara karşı direnci çok daha yüksek elde edilmiştir.

9. Yorulma deney sonuçlarına göre, geopolimer katkısı arttıkça yorulma ömrünün arttığı ve en yüksek yorulma ömrünün %75 geopolimer katkıli karışımlardan elde edildiği görülmüştür. Bu durum, geopolimer ilaveli karışımlarla elde edilen BSK kaplamaların tekrarlı yükler altındaki yorulma ömrünün daha uzun olduğunu göstermektedir.

Sonuç olarak, bir atık ürünü olan FeCR katkısı kullanılarak üretilen geopolimerin sıcak karışımların mekanik özelliklerinde önemli oranda gelişmeler sağladığı görülmüştür.

Bununla birlikte, bir endüstriyel atık olan bu katkının karayolu mühendisliğinde geopolimer üretiminde kullanılmasının bu atığın çevreye vermiş olduğu zararı en aza indireceği ve literatüre önemli bir katkı sağlayabileceği düşünülmektedir.



KAYNAKLAR

- [1] **Umar F, Yayla N.** (1997). Yol İnşaatı, İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul, 287s.
- [2] **Adıgüzel M.** (2019). Ulaştırma Yatırımlarının Büyümeye Etkisi: Türkiye Örneği (1988-2017), Yüksek Lisans Tezi, Yalova Üniversitesi.
- [3] **Kaya S.** (2008). Türkiye’de Ulaştırma Sektörünün Genel Görünümü ve Sorunları, AR-GE Bülten.
- [4] **Akgüngör AP, Demirel A.** (2004). Türkiye’deki Ulaştırma Sistemlerinin Analizi ve Ulaştırma Politikaları, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 10(3): 423-430.
- [5] **URL-1,** <http://www.kgm.gov.tr/Sayfalar/KGM/SiteTr/Kurumsal/YolAgi.aspx> (2024). Karayolları Genel Müdürlüğü Resmi İnternet Sitesi.
- [6] **Geçkil T.** (2008). Siyah Karbonun Bitümlü Sıcak Karışımların Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi.
- [7] **İssi S.** (2019). Zeytin Posası (Prina)’Nın Bitüm Ve Bitümlü Sıcak Karışımların Özelliklerine Etkisinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi.
- [8] **Tunç A.** (2007). Yol Malzemeleri ve Uygulamaları, Ankara.
- [9] **Tam VWY, Tam CW.** (2006). A review on the viable technology for construction waste recycling, Resources, Conservation and Recycling, 47(3): 209-221.
- [10] **Erol B.** (2008). Atık Malzemelerin Yol İnşaatlarında Temel Malzemesi Olarak Kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- [11] **İlgar R.** (2020). Geri Dönüşüm Olgusu Ve 5.,6.,7. Ve 8. Sınıf Öğrencilerinin Geri Dönüşüme Yönelik Duyarlılıkları, Çanakkale İli Örneği, Türk Akademik Araştırmalar Dergisi, 5(4): 493-510.
- [12] **Tunç A.** (2004). Esnek Kaplama Malzemeleri El Kitabı, Asil Yayın Dağıtım, İstanbul, 352s.
- [13] **Anonim.** (2001). Asfalt ve Uygulamaları, İSFALT Bilimsel Yayınları, İstanbul, 280s.
- [14] **Whiteoak D.** (2004). Shell Bitüm El Kitabı, İSFALT Bilimsel Yayınları, İstanbul, 334s.
- [15] **Karayolu Teknik Şartnamesi.** (2013). Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara, 525s.
- [16] **Anonim.** (2002). Asfalt El Kitabı, İSFALT Bilimsel Yayınları, İstanbul, 573s.
- [17] **İnce CB.** (2019). Geri Kazanılmış Polietilen Tereftalat (Pet)’In Bitüm ve Bitümlü Sıcak Karışımların Özelliklerine Etkisinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi.
- [18] **İnce CB, Geçkil T.** (2022). Effects of recycled PET and TEOA On Performance Characteristics Of Bitumen, *Gradevinar*, 74(2): 105–114.

- [19] **Çeloğlu ME.** (2020). Tarımsal Biyokütlelerden Elde Edilen Ürünlerin Bitümlü Sıcak Karışımlarda Kullanılabilirliğinin Araştırılması, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi.
- [20] **Kırbaş H.** (1999). Asfalt Kaplamalarda Bozulma Sebepleri ve Oluşan Yüzeysel Soyulmalar İle Çatlakların Modern Malzemelerle Onarım Yöntemleri, Dumlupınar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, 3-5.
- [21] **Blazejowski K, Zlotowska M, Nagorski R, Tutka P.** (2021). The Influence of Highly Modified Asphalt Binder on Pavement Fatigue Life Prediction - Selected Problems, Scopus Preview, 67(4): 605-624
- [22] **Khan N, Karim F, Qureshi QBAIL, Mufti SA, Rabbani MBA, Khan MS, Khan D.** (2023). Effect of Fine Aggregates and Mineral Fillers in the Permanent Deformation of Hot Mix Asphalt, Sustainability, 15(13): 10646.
- [23] **Majidifard H, Jahangiri B, Rath P, Buttlar WG.** (2021). Development of a Balanced Cracking Index for Asphalt Mixtures Tested in Semi-circular Bending with Load-LLD Measurements, Measurement, 173:108658.
- [24] **Fahri M, Ali S, Aliha MRM.** (2020). Impact of Freeze-thaw Cycles on Low Temperature Mixed Mode I/II Cracking Properties of Water Saturated Hot Mix Asphalt: An Experimental Study, Construction and Building Materials, 261: 119939.
- [25] **Karimi HR, Khedri E, Aliha MRM, Shaker H, Haghighatpour PJ.** (2023). Repair Efficiency Evaluation for Cracked Asphalt Mixture Pavement in Different Ambient Temperatures Using Bitumen and Polymer Concrete as Repair Materials, Construction and Building Materials, 369: 130556.
- [26] **Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü.** (2021). Bitümlü Sıcak Karışım Kaplamalar Çatlak Kapama Rehberi.
- [27] **Zumrawi MME, Edrees SAS.** (2016). Comparison of Marshall and Superpave Asphalt Design Methods for Sudan pavement mixes, International Journal of Scientific and Technical Advancements, 2(1): 29-35.
- [28] **Zeiada W, Liu H, Ezzat H, Al-Khateeb GG, Underwood BS, Shanableh A, Samarai M.** (2022). Review of The Superpave Performance Grading System and Recent Developments in The Performance-Based Test Methods for Asphalt Binder Characterization, Construction and Building Materials, 319: 126063.
- [29] **Polaczyk P, Han B, Huang B, Jia X, Shu X.** (2018). Evaluation of The Hot Mix Asphalt Compactability Utilizing The Impact Compaction Method, Construction and Building Materials, 187: 131-137.
- [30] **Maupin GW.** (1998). Comparison of Several Asphalt Design Methods, Virginia Transportation Research Council (VTRC), VTRC-98-R15.
- [31] **Xu B, Chen J, Zhou C, Wang W.** (2016). Study on Marshall Design Parameters of Porous Asphalt Mixture Using Limestone as Coarse Aggregate, Construction and Building Materials, 124: 846-854.
- [32] **Ahmedzade P, Alataş T, Geçkil T.** (2007). Siyah Karbonun Asfalt Karışımların Mekanik Özellikleri Üzerindeki Etkisi, Sigma Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, 25(2): 179-189.

- [33] **Islam MR, Hossain MI, Tarefder RA.** (2015). A Study of Asphalt Aging Using Indirect Tensile Strength Test, *Construction and Building Materials*, 95: 218-223.
- [34] **İnce CB.** (2023). Çöp Atıklarından Elde Edilen Geopolimerlerin Sıcak Karışım Asfalt Kaplamalarda Kullanımının Araştırılması, Doktora Tezi, İnönü Üniversitesi.
- [35] **Arabani M, Tahami SA.** (2017). Assessment of Mechanical Properties of Rice Husk Ash Modified Asphalt Mixture, *Construction and Building Materials*, 149: 350-358.
- [36] **Ele.** (1994). Universal Materials Testing Apparatus for Asphalt and Unbound Specimens, Hertfordshire, UK.
- [37] **Alataş T, İstek A.** (2020). Farklı Katkılarla Hazırlanan Asfalt Karışımların Sünme Performanslarının İncelenmesi, *DÜMP Mühendislik Dergisi*, 11(2): 745-758.
- [38] **Goh SW, 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.
- [39] **Jomoor NB, Fakhri M, Keymanesh MR.** (2019). Determining The Optimum Amount of Recycled Asphalt Pavement (RAP) in Warm Stone Matrix Asphalt Using Dynamic Creep Test, *Construction and Building Materials*, 228: 116736.
- [40] **Cheng H, Liu J, Sun L, Liu L, Zhang Y.** (2021). Fatigue Behaviours of Asphalt Mixture at Different Temperatures in Four-Point Bending and Indirect Tensile Fatigue Tests, *Construction and Building Materials*, 273: 121675.
- [41] **Wen H.** (2001). Fatigue Performance Evaluation of Westrack Asphalt Mixtures Based on Viscoelastic Analysis of Indirect Tensile Test, North Carolina State University ProQuest Dissertation & Theses.
- [42] **Özcan Ş.** (2008). Polipropilen Fiber Katkısının Bitümlü Karışımların Statik Sünme Davranışına Etkisinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi.
- [43] **Aslam MS, Huang B, Cui L.** (2020). Review of Construction and Demolition Waste Management in China and USA. *Journal of Environmental Management*, 264: 110445.
- [44] **Güllü G.** (2022). Kentsel Dönüşüm Atıkları Yönetim Modeli, İstanbul Sabahattin Zaim Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 4(2): 161-170.
- [45] **Bilgili MY.** (2020). Katı Atık Yönetiminde Kullanılan Bazı Kavramlar ve Açıklamalar, *Avrasya Terim Dergisi*, 2(8): 88-97.
- [46] **Brito RC, Barros RM, Santos IF, Filho GL, Silva SP.** (2021). Municipal solid waste management and economic feasibility for electricity generation from landfill gas and anaerobic reactors in a Brazilian state. *Environmental Technology & Innovation*, 22: 101453.
- [47] **Andriani D, Atmaja TD.** (2019). The potentials of landfill gas production: a review on municipal solid waste management in Indonesia, *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 21: 1572-1586.
- [48] **Çevre ve Şehircilik Bakanlığı.** (2022a). Atıklar.

- [49] **Tezel Ö.** (2020). Sürdürülebilir Atık Yönetimi Uygulamalarında Dünya Ve Türkiye Karşılaştırması: Edikab Örneği, *Social Sciences Research Journal (SSRJ)*, 2(9): 35-48.
- [50] **Çevre ve Orman Bakanlığı.** (2010). Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik.
- [51] **Özel S.** (2018). Türkiye’de Depolama Alanlarının Sürdürülebilir Çevre Koruma ve Çevresel Etkilerine İlişkin Bir Değerlendirme. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 13: 31-38.
- [52] **Kartalkanat S.** (2013). Kentsel Dönüşüm Uygulamaları Neticesinde Çıkan Atık Malzemelerin Yol Üstyapısında Kullanılabilirliği: Üsküdar Örneği, *Yüksek Lisans Tezi, Bahçeşehir Üniversitesi*, 130s.
- [53] **Buzkan C, Erman O.** (2020). Yapısal Atıkların Geri Dönüşüm Sorunu ve Türkiye’deki Durumun Mevzuat Bakımından Değerlendirilmesi, *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 6(1):76-89.
- [54] **Bostanci SC, Limbachiya M, Kew H.** (2018). Use of Recycled Aggregates for Low Carbon and Cost Effective Concrete Construction, *Journal of Cleaner Production*, 189: 176-196.
- [55] **Maddalena R, Roberts JJ, Hamilton A.** (2018). Can Portland Cement be Replaced by Low-Carbon Alternative Materials? A Study on the Thermal Properties and Carbon Emissions of Innovative Cements. *Journal of Cleaner Production*, 186: 933-942.
- [56] **Ioannidou D, Meylan G, Sonnemann G, Habert G.** (2017). Is Gravel Becoming Scarce? Evaluating the Local Criticality of Construction Aggregates, *Resources, Conservation and Recycling*, 126: 25-33.
- [57] **Mishra B, Mishra RS.** (2015). A Study on Use Industrial Wastes in Rural Road Construction. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 4(11): 10387-10398.
- [58] **Mishra M.** (2016). Use of Industrial Waste Materials in Road Construction, *International Journal for Reserach in Applied Science & Engineering Technology*, 4(11): 191-194.
- [59] **Braga AM, Silvestre J, Brito J.** (2017). Compared Environmental and Economic Impact from Cradle to Gate of Concrete with Natural and Recycled Coarse Aggregates, *Journal of Cleaner Production*, 162: 529-543.
- [60] **Jullien A, Proust C, Martaud T, Rayssac E, Ropert C.** (2012). Variability in the Environmental Impacts of Aggregate Production. *Resources, Conservation and Recycling*, 62: 1-13.
- [61] **Aravind KS, Das A.** (2007). Industrial Waste in Highway Construction, *Technical Report, Indian Institute of Technology Kanpur*.
- [62] **Bozyiğit R, Karaaslan T.** (1998). Çevre Bilgisi, *Nobel Yayın Dağıtım*, 135-137.
- [63] **Sayar Ş.** (2012). Sakarya İli Entegre Atık Yönetimi ve Ambalaj Atıklarının Geri Dönüşümü, *Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi*.
- [64] **Koyuncu DM.** (2019). Kocaeli’nde Evsel Atıklar İçin Yakma Yoluyla Bertaraf Alternatifinin Emisyonlar Açısından Değerlendirilmesi, *Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi*.

- [65] **Bahadıroğlu A, Atay BN, Kabakçı SB.** (2022). Agricultural Residues in Turkey: Energy Potential and Evaluation of Existing Biomass Power Plants, *Journal of Agricultural Sciences*, 32(1): 119-131.
- [66] **Kuş E, Yıldırım Y, Kuş AÇ, Demir B.** (2016). Agricultural Biomass Potential and Energy Equivalent of Iğdır Province, *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 6(1): 65-73.
- [67] **Polat M.** (2020). Türkiye'nin Tarımsal Atık Biyokütle Enerji Potansiyelindeki Değişim, *Toprak Su Dergisi*, 19-24.
- [68] **Polat M.** (2020). Geçit Kuşağı Tarımsal Araştırma Enstitüsü Görev Alanı Dahilinde Bulunan İllerin Tarımsal Atık Biyokütle Enerji Potansiyelinin Belirlenmesi, *Eskişehir Teknik Üniversitesi Bilim Ve Teknoloji Dergisi*, 8(1): 133-142.
- [69] **Koçer N, Saatçı Y.** (2007). Elazığ'daki Hayvansal Atıkların Biyoenerji Potansiyeli, *Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları Dergisi*, 5(2): 119-124.
- [70] **Barlaz MA.** (2006). Forest Products Decomposition In Municipal Solid Waste Landfills, *Waste Management*, 26(4): 321-333.
- [71] **Suarez JA, Luengo CA.** (2003). Coffee Husk Briquettes: A Renewable Energy Source, *Energy Sources*, 25(10): 961-967.
- [72] **Karakaplan S.** (2010). İnsan sağlığı Ve Toprak Verimliliği Açısından Kanalizasyon Suyu, *Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 13: 1-2.
- [73] **Dikici M.** (2020). Büyükşehirlerin Kanalizasyon Hatlarının Etkili İşletmesi, *İstanbul Örneği*, *ALKÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 3(1): 29-43.
- [74] **Pehlivan E, Yazıcı M, Güner G.** (2014). Endüstriyel Katı Atıklar ve Geri Kazanım, 2. International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science (ISITES2014), 18-20.
- [75] **Aravind KS, Das A.** (2012). Possible Use of Some Waste Materials in Road Construction, *The Masterbuilder*, 3(42): 44-48.
- [76] **Bhanuprasad V, Ganesh B.** (2017). Industrial Waste Materials Application in Highway Construction, *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 47: 486-494.
- [77] **Çağlar GA.** (2007). Endüstriyel Atık Malzemelerin Karayollarında Kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- [78] **Prasad DSV, Raju GVR, Kumar MA.** (2009). Utilization of Industrial Waste in Flexible Pavement Construction, *The Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 13(1): 1-12.
- [79] **Azanov BK.** (2014). Recommendations on the use of Industrial Wastes in Road Construction, *Metallurgist*, 58(1): 91-94.
- [80] **Karle S, Modh D, Shah M.** (2016). Use of Recycled Material in Road Construction: Literature Review, *International Journal of Engineering Science and Computing*, 6(5): 5550-5551.
- [81] **Mäkikyrö M.** (2004). Converting Raw Materials Into the Products - Road Base Material Stabilized with Slag-Based Binders, Academic Dissertation, University of Oulu.

- [82] **Wu S, Xue Y, Ye Q, Chen Y.** (2007). Utilization of Steel Slag as Aggregates for Stone Mastic Asphalt (SMA) Mixtures. *Building and Environment*, 42: 2580-2585.
- [83] **Yılmaz A, Sütaş İ.** (2008). Ferrokrom Cürufunun Yol Temel Malzemesi Olarak Kullanımı, *İMO Teknik Dergi*, 294: 4455-4470.
- [84] **Yılmaz A.** (2002). Antalya Ferrokrom İşletmesinin Elektrik-Ark Fırını Cüruflarının ve Baca Tozu Atıklarının Asfalt Betonunda Kullanılabilirliğinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Akdeniz Üniversitesi.
- [85] **Fares AI, Sohel KMA, Al-Jabri K, Al-Mamun A.** (2001). Characteristics of Ferrochrome Slag Aggregate and Its Uses as A Green Material in Concrete-A Review, *Construction and Building Materials*, 294: 123552.
- [86] **Niemela P, Kauppi M.** (2007). Production, Characteristics and Use of Ferrochromium Slags, *Innovations in Ferro Alloy Industry-INFACON XI*. 171-179.
- [87] **Pariser HH, Backeberg NR, Masson OCM, Bedder JCM.** (2018). Changing Nickel and Chromium Stainless Steel Markets-A Review, *INFACON XV: Internatinol Ferro-Alloys Congress*, 118: 563-568.
- [88] **Jiao M, Rong Z, Zhang L.** (2004). A Critical Review of The Material Characteristics, Utilizations, Limitations, and Advanced Applications of Ferrochrome Slag, *Construction and Building Materials*, 426: 131680.
- [89] **Tang N, Deng Z, Dai JG, Yang K, Chen C, Wang Q.** (2018). Geopolymer as an additive of warm mix asphalt: Preparation and properties, *Journal of Cleaner Production*, 192: 906-915.
- [90] **Luhar S, Luhar I.** (2020). Additive Manufacturing in the Geopolymer Construction Technology: A Review, *The Open Construction & Building Technology Journal*, 14:150-161.
- [91] **Davidovits J.** (1988). Soft mineralogy and geopolymers, *Proc. geopolymer 88 International Conference*, the Universite de Technologie Compiengne, France.
- [92] **Davidovits J.** (1999). Chemistry of Geopolymeric Systems, Terminology. *Geopolymer*, 99: 9-39.
- [93] **Davidovits J.** (2008). Geopolymer chemistry and applications, Geopolymer Institute.
- [94] **Panda B, Tan MJ.** (2018). Experimental Study on Mix Proportion and Fresh Properties of Fly Ash Based Geopolymer for 3D Concrete Printing, *Ceramics International*, 44: 10258-10265.
- [95] **Khale D, Chaudhary R.** (2007). Mechanism of Geopolymerization and Factors Influencing Its Development: A Review, *Journal of Materials Science*, 42(3): 729-746.
- [96] **Faris MA, Abdullah MMAB, Sandu AV, Ismail KN, Moga LM, Neculai O, Muniandy R.** (2017). Assessment of Alkali Activated Geopolymer Binders as an Alternative of Portlant Cement, *Article in Materiale Plastice*, 145-154.
- [97] **John SK, Nadir Y, Girija K.** (2021). Effect of source materials, additives on the mechanical properties and durability of fly ash and fly ash-slag geopolymer mortar: A review, *Construction and building materials*, 280: 122443.

- [98] **Korniejenco K, Kejzlar P, Louda P.** (2023). The Influence of the Material Structure on the Mechanical Properties of Geopolymer Composites Reinforced with Short Fibers Obtained with Additive Technologies, *Journal of Molecular Science*, 23(4).
- [99] **Lind BB, Fallman AM, Larsson LB.** (2001). Environmental Impact of Ferrochrome Slag in Road Construction, *Waste Management*, 21: 255-264.
- [100] **Erşimşek M.** (2006). Enjeksiyon Yöntemiyle Üretilen Granüle Yapılı Ferrokrom Cürufu Katkılı Betonların Fiziksel Özelliklerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi.
- [101] **Yılmaz M, Kök BV.** (2009). Ferrokrom Cürufunun Kullanımının Bitümlü Sıcak Karışımların Mekanik, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 12(3).
- [102] **Yılmaz A, Karaşahin M.** (2010). Mechanical Properties of Ferrochromium Slag in Granular Layers of Flexible Pavements, *City and Built Environment*, 43: 309-317.
- [103] **Erdoğan ST.** (2011). Öğütülmüş Ferrokrom Cürufu Kullanılarak Jeopolimer Üretimi, In 9th National Congress on Concrete.
- [104] **Maraş MM.** (2013). Elazığ Ferrokrom Cürufundan Üretilen Geopolimer Çimentolu Betonların Sülfat Direncinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi.
- [105] **Kantarcı F.** (2013). Elazığ Ferrokrom Cürufundan Alkali Aktivasyon Metoduyla Üretilen Geopolimer Çimentolu Betonların Yangın Dayanımının Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi.
- [106] **Taşgın Y.** (2014). Mermer, Ferrokrom Cürufu Ve Cam Atıklarının Asfalt Beton Kaplamalarında Filler Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Tunceli Üniversitesi.
- [107] **Kalkan Y.** (2017). Farklı Kür Şartlarının Elazığ Ferrokrom Cürufundan Üretilen Geopolimer Betonların Mekanik Özellikleri ve Mikro Yapısı Üzerine Etkilerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi.
- [108] **Mahamaya M, Das SK, Bhuyan PK.** (2018). Characterization of Ferrochrome Slag as a Controlled Low Strength Material, 18:06623.
- [109] **Özcan A.** (2018). Ferrokrom Cürufu ve Yüksek Fırın Cürufu Kullanılarak Üretilen Geopolimer Betonların Asit, Tuz ve Sülfat Etkilerine Karşı Dayanıklılığının Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi.
- [110] **Dash MK, Patro SK.** (2018). Effects of Water Cooled Ferrochrome Slag As Fine Aggregate on The Properties of Concrete, *Construction and Building Materials*, 177: 457-466.
- [111] **Al-Jabri KS.** (2018). Research on The Use of Ferro-Chrome Slag in Civil Engineering Applications, *Matec Web of Conferences*, 149-01017.
- [112] **Yıldırım S.** (2019). Ferrokrom Cürufunun Karayolu Alt Dolgularında Kullanılabilirlik Performansı Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi.

- [113] **Topaloğlu S.** (2019). Ferrokrom Cüruf Agregasının Geçirimli Bitümlü Karışımların Performansına Etkilerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Bartın Üniversitesi.
- [114] **Özdal M.** (2019). Ferrokrom Cürufu ve Yüksek Fırın Cürufu Kullanılarak Üretilen Geopolimer Betonların Donma Çözülme Dayanıklılığının Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi.
- [115] **Aslan H.** (2022). Elazığ Ferrokrom Cürufu ile Üretilen Alkali Aktivasyonlu Harçların Taze Harç Özelliklerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi.
- [116] **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.
- [117] **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.

ÖZGEÇMİŞ

AD-SOYAD : Sena KOÇ

ÖĞRENİM DURUMU :

Lisans : 2016-2020, Bayburt Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

YAYIN LİSTESİ (Makaleler, Bildiriler, Patentler v.b.) :

Geçkil T, Koç S, İnce CB. (2022). Ferrokrom Cürufunun Bitümlü Sıcak Karışımlarda Filler Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması, International ICONTECH CONFERENCE-6 on Innovative Surveys in Positive Sciences, 76-84.

Geçkil T, İnce CB, Koç S. (2022). Sıcak Karışım Asfaltta Filler Olarak Cam Tozu Kullanımının Değerlendirilmesi, 3. International Cappadocia Scientific Research Congress, 820-827.

Geçkil T, İnce CB, Koç S. (2023). Yüksek Fırın Cürufunun Bitümlü Karışımlarda Kullanımının Araştırılması, AICMES 2nd International Conference On Interdisciplinary Middle East Studies, 40-50.