

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**SÖNMÜŞ KİREÇ İLE SBS VE ELYAF TÜRÜ KATKI MADDELERİNİN
SMA KARIŞIMLARIN PERFORMANSI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ**

DOKTORA TEZİ

İnş. Yük. Müh. Celaleddin Ensar ŞENGÜL

**OCAK 2011
TRABZON**

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**SÖNMÜŞ KİREÇ İLE SBS VE ELYAF TÜRÜ KATKI MADDELERİNİN SMA
KARIŞIMLARIN PERFORMANSI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ**

İnş. Yük. Müh. Celaleddin Ensar ŞENGÜL

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce
“Doktor (İnşaat Mühendisliği)”
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 13.12.2010
Tezin Savunma Tarihi : 17.01.2010**

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Şeref ORUÇ

Jüri Üyesi : Prof. Dr. Fazıl ÇELİK

Jüri Üyesi : Prof. Dr. Mehmet ÇAKIROĞLU

Jüri Üyesi : Prof. Dr. Hulusi ACAR

Jüri Üyesi : Yrd. Doç. Dr. M. Vefa AKPINAR

Enstitü Müdürü: Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ

Trabzon 2011

ÖNSÖZ

“Sönmüş Kireç ile SBS ve Elyaf Türü Katkı Maddelerinin SMA Karışımların Performansı Üzerindeki Etkileri” adlı bu tezin bilim camiamıza ve ilgili sektöre faydalı olacağını düşünmekle birlikte, yerli yayınlar arşivimize ve “Sıcak Asfalt Karışımlar” konusunda peşinden gelecek olan çalışmalara önemli bir katkı sağlayacağı kanaatindeyim.

Bu doktora tezi çalışmasında desteğini eksik etmeyen, değerlendirmeleri ve tespitleriyle bu tezi hazırlamamda en büyük katkıyı sağlayan tez danışmanım Sayın Yrd. Doç. Dr. Şeref ORUÇ’a ve değerli hocalarım Sayın Doç. Dr. Atakan AKSOY’a, Sayın Prof. Dr. Fazıl ÇELİK’e ve Sayın Prof. Dr. Hulusi ACAR’a öncelikle teşekkürlerimi sunuyorum.

Polat Yol-Yapı Araklı-İyidere Şantiye Şefi Sayın Özgür ŞAHİNTAŞ’a, çalışma için gerekli numunelerin hazırlanmasında benden yardımlarını esirgemeyen Laboratuvar Sorumlusu Sayın Ali Kemal ÇAĞLAR’a, Laboratuvar Elemanı Dursun BIYIKLI’ya, Karayolları Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı laboratuvar imkanlarından faydalanmamda bizzat yardımcı olan Üstyapı Şubesi Müdürü Sayın Ahmet Gürkan GÜNGÖR’e, Laboratuvar Sorumlusu Serdar KAŞAK’a, İsfalt laboratuvarlarında çalışmalarım için gerekli ortamı sağlayan İsfalt Kalite Yönetim ve AR-GE Müdürü Sayın Bekir Kadri EREN’e, Laboratuvar Şefi Sayın Seyit Ali YILDIRIM’a ve Araştırma Laborantı Sayın Servet HAN’a özellikle teşekkür ederim.

Ayrıca tecrübelerinden yararlandığım değerli hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. M. Vefa AKPINAR’a ve Sayın Yrd. Doç. Dr. Erol İSKENDER’e de şükranlarımı sunarım.

Bu çalışmamı, desteklerini üzerimden eksik etmeyen tüm aileme ithaf ediyorum.

Celaleddin Ensar ŞENGÜL

Trabzon 2011

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	II
İÇİNDEKİLER	III
ÖZET	VI
SUMMARY	VII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	VIII
TABLolar DİZİNİ	XI
SEMBOLLER DİZİNİ	XIII
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş	1
1.2. Çalışmanın Amacı.....	2
1.3. Konunun Özgeçmişi.....	3
1.4. SMA Kaplamalar... ..	16
1.4.1. SMA Kaplamaların Üstyapı Yüzey Karakteristikleri.....	17
1.4.1.1. Kayma Direnci.....	18
1.4.1.2. Düzgünlük.....	19
1.4.1.3. Gürültü.....	20
1.4.1.4. Yüzey Durabilitesi.....	20
1.4.1.5. Görünürlük.....	20
1.4.1.6. Yapım Şartları.....	20
1.5. Karışım Değişkenleri.....	22
1.5.1. Bitümlü Bağlayıcı.....	24
1.5.1.1. Bağlayıcının Adezyon Yönlü Özellikleri.....	25
1.5.2. Agrega.....	28
1.5.2.1. Agreganın Adezyon Yönlü Özellikleri.....	31
1.5.3. Katkı Maddeleri.....	34
1.5.3.1. Katkı Maddelerinin Kullanım Yöntemleri.....	35
1.5.3.2. Modifiye Bitümlerde Aranılan Özellikler.....	36

1.5.3.3.	Bitüm Katkı Maddelerinin Sınıflandırılması.....	36
1.6.	Asfalt Kaplamalarda Oluşan Bozulmalar.....	38
1.6.1.	Yorulma Çatlakları (Timsah Sırtı Çatlaklar).....	39
1.6.2.	Teker İzinde Oturmalar.....	40
1.6.2.1.	Tekerlek İzi Oluşum Şekilleri.....	40
1.6.2.2.	Tekerlek İzi Tahmin Modelleri.....	42
1.6.3.	Deformasyonlar.....	47
1.6.3.1.	Ondülasyonlar.....	47
1.6.3.2.	Bölgesel Oturma, Çökme ve Kabarmalar.....	48
1.6.4.	Ayrışmalar.....	48
1.6.5.	Çatlaklar.....	50
1.6.5.1.	Stabilite (Blok).....	51
1.6.5.2.	Kenar Çatlakları.....	52
1.6.5.3.	Boyuna Çatlaklar.....	52
1.6.5.4.	Enine Çatlaklar.....	53
1.6.5.5.	Yansıma Çatlakları.....	53
1.6.5.6.	Düşük Sıcaklık Çatlakları.....	54
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	56
2.1.	Uygulanan Yöntem.....	56
2.2.	Kullanılan Malzemeler.....	56
2.2.1.	Agregalar.....	56
2.2.1.1.	Gradasyon ve Tolerans Sınırları.....	57
2.2.2.	Bitümlü Bağlayıcı.....	60
2.2.3.	Katkı Maddeleri.....	60
2.2.3.1.	Sönmüş Kireç.....	60
2.2.3.2.	Bitümlü Selülozik Elyaf (Viatop-66).....	64
2.2.3.3.	SBS (Kraton-D).....	64
2.3.	Yapılan Deneyler.....	65
2.3.1.	Marshall Yöntemine Göre Yapılan Deneyler ve Hesaplamalar.....	66
2.3.1.1.	Marshall Dizayn Metodunun Yapılış Aşamaları.....	66
2.3.1.2.	Marshall Oranı (S/A) Deneyi.....	68
2.3.2.	Bitüm Süzülme Deneyi.....	69

2.3.3.	Sudan Kaynaklanan Bozulmalara Karşı Direnç Deneyi.....	71
2.3.3.1.	Sudan Kaynaklanan Bozulmalara Karşı Direnç Deneyinin Yapılışı.....	71
2.3.4.	Tekrarlı Sünme Deneyi.....	73
2.3.4.1	Tekrarlı Sünme Deneyinin Yapılışı.....	74
2.3.5.	Dolaylı Çekme Mukavemeti Deneyi.....	75
2.3.5.1.	Dolaylı Çekme Mukavemeti Deneyinin Yapılışı.....	75
2.3.6.	Dolaylı Çekme Deneyi.....	77
2.3.6.1.	Dolaylı Çekme Deneyinin Yapılışı.....	78
2.3.7.	Tekerlek İzi Deneyi.....	78
2.3.7.1.	Tekerlek İzi Deneyinin Yapılışı.....	80
3.	BULGULAR VE İRDELEME.....	82
3.1.	Marshall Yöntemine Göre Yapılan Deney ve Hesaplamalar.....	82
3.1.1.	Marshall Oranı (S/A) Deney Sonuçları.....	87
3.2.	Bitüm Süzülme Deneyi Sonuçları.....	89
3.3.	Sudan Kaynaklanan Bozulmalara Karşı Direnç Deneyi Sonuçları.....	90
3.4.	Tekrarlı Sünme Deneyi Sonuçları.....	92
3.5.	Dolaylı Çekme Mukavemeti Deneyi Sonuçları.....	94
3.6	Dolaylı Çekme Deneyi Sonuçları.....	95
3.6.1	Yükleme Hızının Esneklik Modülü Üzerine Etkisi.....	101
3.7.	Tekerlek İzinde Oturma Deneyi Sonuçları.....	102
4.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	107
5.	KAYNAKLAR.....	111
6.	EKLER.....	120

ÖZGEÇMİŞ

ÖZET

Bu çalışmada yurt dışında asfalt kaplama teknolojisinde yaygın olarak kullanılan SMA (Stone Mastik Asfalt) karışımlar incelenmiş, katkı maddesi olarak sönmüş kirecin kaplama performansına olan etkisi SBS (Kraton-D) ve Elyaf (Viatop-66) katkı maddeleri ile birlikte araştırılmıştır. Hazırlanan örnekler üzerinde performans derecelendirme yöntemlerinden Marshall Dizaynı ve Marshall Oranı Deneyi, Bitüm Süzülme Deneyi, Sudan Kaynaklanan Bozulmalara Karşı Direnç Deneyi, Tekrarlı Sünme Deneyi, Dolaylı Çekme Deneyi, Dolaylı Çekme Mukavemeti Deneyi, Tekerlek İzinde Oturma Tayini Deneyi yapılarak SMA karışımlarda sönmüş kirecin sıcak asfalt karışım performansına etkisi saptanmaya çalışılmıştır.

Çalışmada kullanılacak kireç oranları için literatür araştırması yapılmış ve neticesinde %1 olarak sönmüş kireç uygulanmasının uygun olacağı kararlaştırılmıştır. Araştırmada dizaynlar (optimum bitüm yüzdesinin tayini) için 108, Marshall Oranı, Tekrarlı Sünme, Dolaylı Çekme-Dolaylı Çekme Mukavemeti ve Sudan Kaynaklanan Bozulmalara Karşı Direnç Deneyi için 108 olmak üzere toplam 216 adet briket üretilmiştir. Tekerlek izi deneyi için ise 12 adet slab üretilmiştir. Katkı maddesi olarak kullanılan Sönmüş Kireç (SKK 80-T) karışıma %1 oranlarında ilave edilmiştir. SBS (Kraton-D) % 5 ve Elyaf (Viatop-66) ise %0,6 oranlarında kullanılmıştır. Bu oranlar ile katkı maddelerinin hem tek başlarına hem de beraber karışımlara ilavesi gerçekleştirilmiştir.

Yapılan deneyler neticesinde en iyi sonuçları veren tasarımların tümünde Sönmüş kirecin yer aldığı, Elyaf katkılı karışım ile Sönmüş kireç katkılı karışım değerleri incelendiğinde ortaya çıkan paralellik SMA karışımlarda, sönmüş kirecin elyaf katkı maddesinin yerini rahatlıkla tutacağı, ayrıca elyafla birlikte kullanılmasının, sadece elyaf kullanıldığındaki dayanım değerlerinden daha olumlu sonuçlar doğurduğu, SBS katkılı karışımlarda da benzer durumların görüldüğü tespit edilmiş olup, sönmüş kirecin etkili bir katkı maddesi olduğu ve diğer katkı maddeleri ile birlikte ortaya koymuş olduğu performansın göz ardı edilmemesi gerektiği müşahade edilmiştir.

Agrega özellikleri tanımlandıktan ve sönmüş kireç-agrega etkileşimi araştırıldıktan sonra gerçekleştirilen sönmüş kireç ilavesinde, ekonomiklik ve ulaşılabilirlik bakımından avantajlı olan bu katkının SMA karışımlara olumlu etkiler sağlayacağı görülmektedir.

Anahtar Kelimeler: SMA, Sönmüş Kireç, SBS, Elyaf, Tekerlek izinde oturma

SUMMARY

The Effects of Hydrated Lime with The Types of SBS and Fiber Additives on SMA Mixtures Performance

In this study SMA (Stone Mastic Asphalt) mixes widely used in asphalt pavement technology are discussed in detail and the hydrated lime effects on pavement performance as an additive was investigated together with the additives SBS (Kraton-D) and Fiber (Viatop-66). Performing Marshall Design and Marshall Ratio Test, Bitumen Infiltration Test, Resistance Test Against Deterioration Caused by Water, Repeated Creep Test, Indirect Tensile Test, Indirect Tensile Resistance Test, Wheel Tracking Tests on prepared samples was tried to describe hydrated lime effects to the hot asphalt mix performance in SMA mixes.

Literature research was made for the determination of the lime percentage to be used in the study and in conclusion 1% hydrated lime rate was adopted. During the research 108 for the designs (determination of the optimum bitumen percentage), 108 for the Marshall Ratio, Repeated Creep, Indirect Tensile-Indirect Tensile Resistance and Resistance Against Deterioration Caused By Water Tests a total of 216 briquettes were produced. For Wheel Tracking Test 12 slabs were produced. hydrated Lime (SKK 80-T) used as an additive was put in the mix as % 1. Percentage of SBS (Kraton-D) was 5% and Fiber (Viatop-66) was 0,6 % respectively. Using above mentioned percentages additives are put into the mix solely and together with the others.

According to the performed tests it was found that, hydrated lime is included within all the designs giving the best test results, the parallelism observed when evaluating the values of fiber added and hydrated lime added mixes showed that hydrated lime can easily replace fiber additive material, besides using it with fiber gives higher values than resistance values in case solely fiber is used, also similar situations are detected in SBS added mixes, hydrated lime is an effective additive material and its performance when used with other additives should be considered.

It was concluded that in the addition of hydrated lime after defining aggregate properties and investigating hydrated lime-aggregate interaction, this additive which is advantageous with regard to availability and economy can make important contributions to SMA mixes.

Key Words: SMA, Hydrated Lime, SBS, Fiber, Rutting

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. SMA tabakası kesiti ile (Sol) Aşınma tabakası kesiti (Sağ).....	17
Şekil 2. SMA yüzey dokusu ile (Sol) Aşınma tabakası yüzey dokusu (Sağ).....	17
Şekil 3. Esnek üstyapılarda gerilme dağılımı.....	23
Şekil 4. Yüzey molekülleri ve sıvı arasında çekim kuvvetleri.....	25
Şekil 5. Sıvının katı yüzey üzerine yayılmasında yüzey geriliminin etkisi.....	26
Şekil 6. Tekerlek yükünden dolayı oluşan çekme ve basınç gerilmeleri.....	38
Şekil 7. Yorulma çatlakları (Timsah sırtı çatlaklar).....	39
Şekil 8. Tekerlek izi oluşu.....	40
Şekil 9. Yapısal tekerlek izi.....	41
Şekil 10. Akma tekerlek izi.....	41
Şekil 11. Konsolidasyon ve yüzeysel tekerlek izi.....	42
Şekil 12. Ondülasyonlar.....	47
Şekil 13. Lokal oturmalar.....	48
Şekil 14. Agrega yüzeyinde bağlayıcı ile suyun yer değiştirmesi.....	49
Şekil 15. Blok çatlaklar.....	51
Şekil 16. Kenar çatlaklar.....	52
Şekil 17. Boyuna çatlaklar.....	52
Şekil 18. Enine çatlaklar.....	53
Şekil 19. Yansıma çatlağının oluşumu.....	54
Şekil 20. Düşük sıcaklık çatlağı şekilleri.....	55
Şekil 21. Düşük sıcaklık çatlağının büyüme aşaması.....	55
Şekil 22. Agrega eleme işleminden görünüm.....	57
Şekil 23. Granülometri eğrisi.....	59
Şekil 24. Sönmüş kireç (SKK-80T).....	63
Şekil 25. Viatop-66 (Bitümlü Selülozik Elyaf).....	64
Şekil 26. SBS (Stiren-Butadiyen- Stiren) katkı malzemesinden görünüm.....	65
Şekil 27. Hazırlanan briketler ve slabların bir kısmından görünüm.....	68
Şekil 28. Stabilite ve akma değerlerini ölçen alet.....	68

Şekil 29.	SMA karışımının hazırlanması ve cam beherin boş ve karışım dolu tartımı.....	70
Şekil 30.	Etüvde 170°C’de 1 saat bekleyen karışımın cam beherden boşaltılması....	70
Şekil 31.	Süzülme deneyi sonra oluşan durumlar.....	70
Şekil 32.	Süzülme deneyi aşamalarından görünüm.....	71
Şekil 33.	İÇM deneyinde kullanılan yükleme ünitesi.....	72
Şekil 34.	İÇM numuneleri, yük uygulanması ve yükleme şeritleri.....	72
Şekil 35.	Sünme deneylerinin yapıldığı cihaz ile test düzeneği.....	74
Şekil 36.	Deney cihazına yerleştirilmiş numune görünümü.....	77
Şekil 37.	Tekerlek İzi deneyi uygulanacak olan slablardan görünüm.....	79
Şekil 38.	Tekerlek İzi deneyi için kullanılan sıkıştırma düzeneği.....	79
Şekil 39.	Tekerlek İzi deneyi (LCPC) aleti.....	80
Şekil 40.	Tekerlek izi deneyi sonrası slablardan görünüm.....	81
Şekil 41.	Tasarım numuneleri Stabilite (kg) değerleri grafiği.....	82
Şekil 42.	Tasarım numuneleri Akma (mm) değerleri grafiği.....	83
Şekil 43.	Tasarım numuneleri Optimüm bitüm yüzdeleri grafiği.....	84
Şekil 44.	Tasarım numuneleri Boşluk yüzdeleri grafiği.....	84
Şekil 45.	Tasarım numuneleri Pratik yoğunluk grafiği.....	85
Şekil 46.	Hazırlanan slablardan görünüm.....	86
Şekil 47.	Hazırlanan briketlerden görünüm.....	86
Şekil 48.	Deney numuneleri Stabilite grafiği.....	87
Şekil 49.	Deney numuneleri Akma grafiği.....	88
Şekil 50.	Deney numuneleri Stabilite/akma grafiği.....	88
Şekil 51.	Schellenberger Bitüm Süzülme Deneyi grafiği.....	89
Şekil 52.	Sudan kaynaklanan bozulmalara karşı direnç grafiği (Koşullu).....	90
Şekil 53.	Sudan kaynaklanan bozulmalara karşı direnç grafiği (Koşulsuz).....	91
Şekil 54.	Sudan kaynaklanan bozulmalara karşı direnç grafiği (Koşullu-Koşulsuz)..	92
Şekil 55..	Tekrarlı Sünme deneyi sonuçları grafiği.....	93
Şekil 56.	25°C’de Tekrarlı Sünme deneyi sonuçları grafiği.....	93
Şekil 57.	40°C’de Tekrarlı Sünme deneyi sonuçları grafiği.....	94
Şekil 58.	40°C’de Dolaylı Çekme Mukavemeti deneyi grafiği.....	95
Şekil 59.	Dolaylı Çekme Deneyi sistematigi.....	97

Şekil 60.	Elastisite modülünün sıcaklığa göre değişimi.....	98
Şekil 61.	Karışımların elastisite modülleri (sıcaklık 5 °C, yükleme hızı 60 ms).....	98
Şekil 62.	Karışımların elastisite modülleri (sıcaklık 25 °C, yükleme hızı 60 ms).....	99
Şekil 63.	Karışımların elastisite modülleri (sıcaklık 40 °C, yükleme hızı 60 ms).....	99
Şekil 64.	Karışımların elastisite modülü – yükleme hız ilişkisi (5 °C).....	100
Şekil 65.	Karışımların elastisite modülü – yükleme hız ilişkisi (25 °C).....	100
Şekil 66.	Karışımların elastisite modülü – yükleme hız ilişkisi (40 °C).....	101
Şekil 67.	Farklı sıcaklıklarda yükleme hızının elastisite modülü üzerinde değişim yüzdesi.....	102
Şekil 68.	Katkısız karışım tekerlek izinde oturma deneyi grafiği.....	103
Şekil 69.	Sönmüş kireç katkılı karışım tekerlek izinde oturma deneyi grafiği.....	103
Şekil 70.	Elyaf katkılı karışım tekerlek izinde oturma deneyi grafiği.....	104
Şekil 71.	Elyaf+Sönmüş kireç katkılı karışım tekerlek izinde oturma deneyi grafiği..	104
Şekil 72.	SBS katkılı karışım tekerlek izinde oturma deneyi grafiği.....	105
Şekil 73.	SBS+Sönmüş kireç katkılı karışım tekerlek izinde oturma deneyi grafiği..	105
Şekil 74.	Tekerlek izinde oturma deneyi tüm sonuçlar grafiği.....	106

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Deneysel çalışmada hazırlanan briket dağılımı ve sayıları.....	3
Tablo 2. Diğer karışım tiplerine göre SMA gürültü seviyesi.....	19
Tablo 3. Karışım malzeme ve değişkenleri.....	23
Tablo 4. Penetrasyon sınıflandırması.....	24
Tablo 5. Asfalt çimentolarının elementsel analiz sonuçları.....	27
Tablo 6. Agregalara uygulanan deneyler.....	31
Tablo 7. Bitümlü sıcak karışımların özelliklerine etki eden parametreler.....	33
Tablo 8. Katkı maddelerinin genel sınıflandırılması.....	37
Tablo 9. Ağır taşıt trafik hacmine göre tahmin edilen tekerlek izi değerleri (mm)...	44
Tablo 10. Tabakaların ortalama mekanik özellikleri (Belçika Modeli).....	44
Tablo 11. Agregalara uygulanan deneyler.....	57
Tablo 12. Dane boyutu dağılımı.....	58
Tablo 13. Agregalı karışım oranları.....	58
Tablo 14. Granülometri ve tolerans sınırları.....	58
Tablo 15. Asfalt çimentosuna uygulanan deneyler.....	60
Tablo 16. Kireçtaşı uluslararası Standart Sanayi sınıflaması.....	62
Tablo 17. Sönmüş kireç kimyasal analiz değerleri (SKK 80-T/Öztüre Kireç).....	63
Tablo 18. Sönmüş kireç fiziksel analiz değerleri (SKK 80-T/Öztüre Kireç).....	63
Tablo 19. SMA Tip-1 dizayn kriterleri.....	67
Tablo 20. Optimum bitümün saptanması için alınana yüzdeler.....	67
Tablo 21. Karışımındaki agregaların ve bitümün özgül ağırlıkları.....	67
Tablo 22. Tekrarlı sünme deneylerinde uygulanan parametreler.....	75
Tablo 23. Tasarım numuneleri Marshall Deneyi bulguları.....	82
Tablo 24. Schellenberger bitüm süzülme deney sonuçları.....	89
Tablo 25. Sudan kaynaklanan bozulmalara karşı direnç deneyi sonuçları.....	90
Tablo 26. Deneylerde kullanılan yükleme periyodu ile yükleme.....	96
Tablo 27. 25 °C’de bulunan elastisite modülleri.....	101
EK Tablo 1. Silindirik briketlerin karakteristikleri.....	120
EK Tablo 2. Sudan Kaynaklanan Bozulmalara Karşı Direnci Deney sonuçları listesi...	122

EK Tablo 3.	SBS katkılı tasarım için T.İ.O. Deneyi sonuçları.....	124
EK Tablo 4.	Katkısız tasarım için T.İ.O. Deneyi sonuçları.....	125
EK Tablo 5.	Elyaf+Sönmüş Kireç katkılı tasarım için T.İ.O. Deneyi sonuçları.....	126
EK Tablo 6.	SBS+Sönmüş Kireç katkılı tasarım için T.İ.O. Deneyi sonuçları.....	127
EK Tablo 7.	Sönmüş Kireç katkılı tasarım için T.İ.O. Deneyi sonuçları.....	128
EK Tablo 8.	Elyaf katkılı tasarım için T.İ.O. Deneyi sonuçları.....	129
EK Tablo 9.	Marshall Oranı Deneyi sonuçları.....	130
EK Tablo 10.	Katkısız tasarım için Dolaylı Çekme Deneyi sonuçları.....	131
EK Tablo 11.	Sönmüş Kireç katkılı tasarım için Dolaylı Çekme Deneyi sonuçları.....	132
EK Tablo 12.	Elyaf +S. Kireç katkılı tasarım için Dolaylı Çekme Deneyi sonuçları.....	133
EK Tablo 13.	Elyaf katkılı tasarım için Dolaylı Çekme Deneyi sonuçları.....	134
EK Tablo 14.	SBS katkılı tasarım için Dolaylı Çekme Deneyi sonuçları.....	135
EK Tablo 15.	SBS+S. kireç katkılı tasarım için Dolaylı Çekme Deneyi Sonuçları.....	136

SEMBOLLER DİZİNİ

a	: Sünme – zaman eğrisinin 1. saniyesindeki sünme deformasyonu miktarı
A,m	: Regresyon sabitleri
C	: Dinamik etki için düzeltme faktörü
Comp	: Sıkıştırma enerjisi, darbe sayısı
d	: Yüzey defleksiyonu
h	: Bitümlü tabakanın kalınlığı
E	: Elyaf katkılı karışım
E+S.K	: Elyaf ve Sönmüş Kireç katkılı karışım
LCPC	: Köprüler ve Yollar Merkez Laboratuvarı (Fransa)
mc	: Sünme – zaman eğrisinin 1. saniyesindeki sünme deformasyonu miktarı
N	: Katkısız karışım
RR	: Tekerlek izi oranı
SMA	Stone Mastik Asfalt
Sm	: Karışımın rijitlik modülü
St	: Uygulanan gerilme
S.K	: Sönmüş Kireç katkılı karışım
SBS	: Stiren-Butadin-Stiren katkılı karışım
SBS+S.K	: SBS ve Sönmüş Kireç katkılı karışım
Ts	: Dolaylı çekme mukavemeti
t ₁	: Yükleme süresi
σ	: Gerilme
σ_r	: Çekme Gerilmesi
σ_z	: Basınç Gerilmesi
σ_{av}	: Standart dingil yükü altında oluşan ve sıcaklığa göre değişen gerilme
σ_c	: Düşey basınç gerilmesi
ϵ_p	: Kalıcı deformasyon
ϵ	: Deformasyon
x	: Geri dönme yeteneği
Visc	: Karışımda kullanılan asfalt çimentosunun kinematik viskozitesi

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Günümüzde teknolojik gelişmelere paralel olarak üretim kalemlerinin çeşitliliği ve miktarlarında büyük artışlar meydana gelirken, insan, mal ve hizmet hareketlerindeki geçmiş dönemlerle kıyaslanamayacak yoğunluklar yaşanmaktadır. Karayolunun, ulaşım ağında büyük paya sahip olduğu ülkeler, söz konusu artışın olumsuz yansımalarından daha fazla etkilenmektedir.

Artan taşıt trafiği ve dingil yüklerine paralel olarak yolların tahmin edilen hizmet ömürlerinden önce bozulmaya başlaması, asfalt kaplamaların performansını arttırmaya yönelik yapılan çalışmaların bu bozulmalar üzerine odaklanması sonucunu doğurmaktadır. Meydana gelen bozulma, ağır taşıt trafiğinin neden olduğu tekerlek izi (kalıcı deformasyon) olarak tanımlanır. Trafik altından uzama ve sünme özelliklerinden dolayı bitümlü karışımlar, sıcaklık değişimlerinden ve trafik yüklerinden oluşan küçük boyuttaki hareketleri karşılayabilme yeteneklerine sahiptir. Ancak bu viskoelastik davranışları yüksek sıcaklıklarda, ağır yük ve tekrarlı geçişler altında kalıcı deformasyon oluşmasını engellemede yeterli olamamaktadır. Bu sebepten dolayı bitümlü sıcak karışımların tasarımı, yorulma çatlaklarına ve oksidasyona karşı dayanıklı olmalarının yanı sıra kalıcı deformasyonlara karşı direnç gösterecek şekilde yapılmalıdır. Yolun enine düzgünlüğünün bozulmasına neden olan tekerlek izi oluşumu, konfor ve güvenlik açısından büyük bir sorun oluşturmakta; araç kontrolü zorlaşmakta, yağışlı havalarda tekerlek izi oluşmuş kısımlarda su birikmekte ve buzlanmaya veya tekerleğin su filmi üzerinde kaymasına yol açmaktadır.

Üzerinde halen bilimsel çalışmaların devam ettiği yeni kaplama türleri, sıklıkla boşluklu dane boyutu dağılımına sahip, genellikle modifiye ve düşük penetrasyonlu bağlayıcılarla üretilmektedir. Dünya genelinde yaygın olarak kullanılan SMA (Stone Mastic Asphalt) bu uygulamaların başında gelmektedir.

SMA; bitümlü kaplamalarda ortaya çıkan tekerlek izi oluşumunu azaltmak amacıyla geliştirilen, yüksek oranda kaba agrega ve bitümlü bağlayıcı ile az miktarda ince agrega ve fiberden oluşan açık granülometril bir sıcak karışımdır.

SMA 1960'lı yılların sonunda Almanya'da çivili kar lastiklerinin oluşturduğu plastik deformasyonlara karşı koymak amacıyla geliştirilmiş bir karışım tipidir. SMA tipi karışımların ilk kullanım amacı; kış ikliminin ağır olduğu bölgelerde sürüş güvenliğini artırmak için kullanılan çivili lastiklerin, asfalt kaplama üzerinde meydana getirdiği aşınmayı ve tekerlek izini önlemeye yönelik olmuştur. 1975 yılında İskandinav ülkelerinin dışında çivili lastik kullanımının yasaklanması ile SMA karışımların uygulamasına Almanya'da bir müddet ara verilmiştir. Ancak ağır taşıt trafiği ile beraber dingil yüklerinin artması ile yollarda tekerlek izinin oluşması, ciddi bir problem olarak ortaya çıkmış ve yapılan incelemelerde, Almanya'da yapılan SMA karışımlarda, diğer karışımlara göre çok daha az bu tip deformasyonların olduğu gözlenmiş ve bu nedenle SMA karışımlar Almanya'da yeniden kullanılmaya başlanmış olup, 1984 yılında teknik şartnamelere girmiş ve geçen zamanla birlikte diğer ülkelere yayılmıştır.

SMA karışımların kullanımının yaygınlaşması ile birlikte, ilave edilen katkı maddeleri ve miktarları da bir çok araştırmaya konu olmuştur. Özellikle yüksek bitüm oranının oluşturduğu, bitüm kuma ve tekerlek izi problemlerini aşmada kullanılan katkı maddelerinin, ticari nedenlerle yüksek maliyetler meydana getirmesi SMA kaplamaların yaygınlaşmasını geciktirmede en önemli faktörlerden biridir. Bu sorunu aşmak için, kolay elde edilebilir ve ekonomik olma özelliği olan Sönmüş kirecin olumlu katkılarının ortaya konması ve yaygınlaşması faydalı olacaktır.

1.2. Çalışmanın Amacı

Bu çalışmada; SMA kaplamalarda kullanılan ve genellikle ticari özelliği ön planda olan katkı maddeleri SBS ve Elyaf ile, kolay ulaşılabilir ve ekonomik olma özelliği ön planda olan Sönmüş Kireç karşılaştırılmış ve sönmüş kirecin, hem tek başına hem de diğer katkılarla birlikte kaplama problemlerine (Tekerlek izinde oturma, bitüm kuma v.s.) nasıl bir etki göstermeyeceği farklı deney yöntemleri kullanılarak araştırılmıştır.

Bu amaçla yapılan çalışmada, aşağıda Tablo 1'de görüldüğü üzere; karışım tasarımlarında optimum bitüm yüzdesinin tayini için 108 adet, Marshall Oranı, Tekrarlı Sünme, Dolaylı Çekme, Dolaylı Çekme Mukavemeti ve Su Hasarı deneyleri için 108 adet olmak üzere toplam 216 adet briket üretilmiş, Tekerlek izi deneyi için ise 12 adet slab briket üretilmiş ve deneyler gerçekleştirilmiştir.

Tablo 1. Deneysel çalışmada hazırlanan briket dağılımı ve sayıları

KARIŞIMLAR		Katkısız	%1 S.KİREÇ	%0,6 ELYAF	%0,6 ELYAF + %1 S.KİREÇ	%5 SBS	%5 SBS + %1 S.KİREÇ	TOPLAM
DİZAYN		18	18	18	18	18	18	108
MARSHALL ORANI		3	3	3	3	3	3	18
TEKRARLI SÜNME DENEYİ (5, 25, 40 °C)		6	6	6	6	6	6	36
D. ÇEKME (5, 25, 40 °C) \ D. Ç. MUK. (40 °C)		3	3	3	3	3	3	18
SU HASARI DENEYİ		6	6	6	6	6	6	36
TEKERLEK İZİ DENEYİ (Slab)		2	2	2	2	2	2	12
TOPLAM	Briket	36	36	36	36	36	36	216
	Slab	2	2	2	2	2	2	12
	Numune	38	38	38	38	38	38	228

1.3. Konunun Özgeçmişi

- Tekerlek izi oluşumu ile diğer yüzey bozukluklarına neden olan kalıcı deformasyon oluşumu, birkaç şekilde tanımlanabilmektedir. Birincisi kaplamanın altında bulunan tabakaların oturması ile meydana gelen deformasyonlar olup, yapısal oturma olarak adlandırılır. İkinci kalıcı deformasyon oluşma şekli ise; bitümlü tabakaların bünyesinde oluşan deformasyonlar olup, bitümlü karışımın iç sürtünmesinin trafik yüklerinin oluşturduğu gerilmeleri karşılayamamasından meydana gelmektedir [1].

- Tekerlek izi oluşumuna neden olan tekrarlı yükleme altında iz oluşumuna karşı gösterdiği direncin değerlendirilmesi, performans tabanlı değerlendirmelerde en önemli unsur olarak ele alınmaktadır. Bu, sadece agrega özellikleriyle bağlantılı olmayıp, çok çeşitli karışım parametrelerinden etkilenmektedir. Elastik dayanım ve yorulma konusu, başlıca bağlayıcı karakteristikleri ve hacimsel bileşim ile kontrol edilmektedir. Bu nedenlerle 1970’lerde statik sünme deney yöntemi geliştirilmiştir. Ancak günümüzde tekrarlı yükleme düzeneğinin gerekliliği görülmüş ve Nottingham Üniversitesi’nde tekrarlı sünme deneyi tasarlanmıştır. Bu yeni yöntem, karışım tasarımının değerlendirilmesinde yararlı olmuştur [2].

- Yoğun dane boyutu dağılımlı agrega ile 50 ve 100 penetrasyonlu bitüm kullanılarak hazırlanan briketler üzerine statik ve dinamik sünme deneylerinin uygulandığı bir

çalışmada, sünme deformasyonları veya deformasyon oranı ilişkisi ile tekrarlı yük deneyi ve tekerlek izi deneyi arasında statik sünme deneyinden daha iyi bir ilişki olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca tekrarlı yük altında agrega iskeleti üzerinde yükün belirli periyotta tekrarlanmasının etkisinden dolayı daha büyük gerilmelerin olabildiği, statik sünme deneyinin, malzemenin elastik geri dönme özelliğini artıran katkıların performansını tekrarlı yük koşullarında olduğu kadar iyi yansıtmadığı vurgulanmıştır [3].

- Bitümlü karışımlarda dingil yükleri altında meydana gelen kalıcı deformasyonları ve tekerlek izi oluşumunu göstermek için çeşitli tekerlek izi deney aletleri geliştirilmiştir. Laboratuvar ortamında karışımların tekerlek izi (rutting) açısından performanslarını bulmaya yarayan deney araçlarından dünyada en yaygın olarak kullanılanlar;

- LCPC; Köprüler ve Yollar Merkez Laboratuvarının (Fransa) geliştirdiği ölçüm cihazı;
- Almanya (Hamburg) tekerlek izi ölçüm cihazı;
- Ulaşım Araştırma Laboratuvarı test aleti;
- Amerikan Georgia tekerlek izi ve yorulma cihazı;
- Amerikan Purdue Üniversitesi tekerlek izi ölçüm cihazı;
- Güney Amerika MML53 test ekipmanı olarak sıralanabilir [4].

- Bu test yöntemlerinin her biri farklı bir sistemde asfalt numuneleri üzerinde iz oluşturduğundan birbirlerinden farklı sonuçlar ortaya çıkmaktadır. Örneğin Almanya’da metal tekerlek kullanılırken İngiltere, Fransa ve Amerika’da lastik tekerlek kullanılmaktadır. Kalıcı deformasyonu belirleyen faktörlerin anlaşılmasında, önemli gelişmeler kaydedilmiş ve artan tekerlek izi oluşumuna karşı dirençli karışımlar elde edilmesi gerekmiştir. Bunun için bağlayıcı ve agrega seçimi ve bu bileşenlerin oranlarının saptanması yanında katkı malzemelerinin kullanımı geniş bir araştırma konusu olarak ortaya çıkmıştır. Sonuç olarak günümüze geldiğimizde tekerlek izi oluşumuna karşı yüksek dirence sahip Taş Mastik Asfalt veya Stone Mastik Asfalt (SMA) şeklinde tabir edilen kaplamalar geliştirilmiş ve geliştirilmeye devam etmektedir [5].

- Sıcak karışım asfaltlar; tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de yaygın olarak kaplama tabakası olarak kullanılmaktadır. Kaplama tabakası bünyesinde trafikten kaynaklanan gerilme düzeylerindeki artışlar düşük servis ömrüne neden olmaktadır. Bu nedenlerle, günümüzde daha yüksek performans arayışları söz konusudur. Gerek karışımların dane boyutu dağılımları değiştirilmekte, gerekse katkı uygulamaları üzerinde performans yönlü araştırmalar yapılmaktadır. Performans artırıcı yöntemlerden birisi

sönmüş kirecin katkı maddesi (modifier) olarak kullanımıdır. Sönmüş kireçle asfalt modifikasyonunun kaplamaların servis ömrüne yılları eklediği belirtilmektedir. Bu işlem; soyulmayı, tekerlek izinde oturmaya, çatlamayı ve yaşlanmayı azaltmaktadır [6].

- Yol kaplamasının hasar nedenlerinden birisi, genellikle soyulma olarak bilinen adezyon kırılmasıdır. Soyulma, birçok faktöre bağlı olan karmaşık bir problemdir. Suyun varlığının, soyulmanın esas nedeni olduğu düşünülür ve soyulmanın oluşmasında, çevresel etkiler önemli yer tutar. Isınma ve kuruma, sıcaklık dalgalanmaları, kaplamanın su hasarı üzerinde etkilidir. Soyulma; yer değiştirme, ayrılma, boşluk basıncı, suyun dolaşması, emülsiyonlaşma ve osmoz ile gerçekleşmektedir [7].

- Genellikle yüksek silika içeren agregaların hidrofilik (water loving) eğilimde olduğu ve daha kolay soyulduğu, düşük silika içeren veya hiç içermeyen agregaların ise hiç soyulmadığı ve hidrofobik (water hating) nitelikte olduğu kabul edilmektedir. Bunun yanında, bütün koşullarda suyun etkisine tam olarak dayanım gösterebilecek ancak birkaç agreganın olduğunun unutulmaması gerektiği de ifade edilmektedir. Bu durumda agregaların sönmüş kireç kullanımı ile hidrofobik (water hating) hale dönüştürülmesi, su etkisine dayanıklı çok az sayıdaki agrega çeşidinin kullanılmaya çalışılmasından daha pratik ve ekonomik olduğu sonucu ortaya çıkmaktadır [8,9,10].

- Üstyapı performansını etkileyen parametrelerin incelenmesinde, özellikle de agrega-bitüm etkileşiminin ele alınmasında fiziksel ve kimyasal reaksiyonların hangisinin daha baskın olduğu da olayın başka bir yönüdür. Örneğin, üstyapı problemlerinin en önemlilerinden biri olan soyulma probleminin açıklanmasında kullanılan teorilerden birisi de mekanik kenetlenme teorisidir. Bu teoriye göre, yüzeysel boşlukları fazla, yüksek poroziteli ve çatlaklı bir agreganın daha iyi bir kenetlenme göstererek daha iyi soyulma direnci göstereceği belirtilmektedir. Kimyasal reaksiyon teorisi açısından bakıldığında, yapılan çalışmalarda örneklerin kimyasal bileşiminin farklılığından kaynaklanan değişik soyulma davranışları görülmektedir. Yapılan bir çalışmada, kimyasal bileşimin farklılığından oluşan farklı soyulma davranışları göz önüne alınarak “kimyasal reaksiyon teorisi” desteklenmektedir [11].

- Agregaların jeokimyasal yapısının ortaya konulduğu bir çalışmada, agregalardaki kimyasal bileşimin soyulmada esas etken olduğu ortaya çıkmaktadır. Dolomitleşme, jeokimyasal yapıyı değiştirmekte, kimyasal bileşimden kaynaklanan başkalık aynı koşullarda farklılıklar oluşturmaktadır. Bitümün agregaya yapışabilme özelliği belirtirken kimyasal teori üzerinde esas olarak durulması gerektiğini ifade edilmektedir. Bu teoriye

göre asfalt ve agrega arasında birtakım kimyasal reaksiyonlar oluşmakta ve bu kimyasal bağın kuvveti adezyonu etkilemektedir [12]. Bu çalışmalar kimyasal reaksiyonların adezyon yönünden daha olumlu sonuçlar verdiğini ortaya koymaktadır.

- Marshall oranı tam olarak stabilite/akma oranı olarak tanımlanmakta, karışım rijitliğinin ve asfalt betonunun deformasyon karşısındaki direncinin bir göstergesi olmaktadır. Oran değerleri, briketlerin deformasyon direncinin değerlendirilmesinde kullanılmaktadır. Daha yüksek bir oran değeri, daha rijit, daha dirençli bir karışım olabilmektedir. Marshall oranı, taslak olarak (BSEN 12697–34: Sıcak karışım asfaltlar için Marshall Deneyi) yeniden düzenlenmiştir. Bu oranın yeterliliği veya arazi ile uyumu konusunda literatürde karşımıza olumsuz sonuçlar çıkmaktadır [13,14].

- Marshall yönteminin, asfalt karışımların tekerlek izine karşı direncini belirlemede ortaya koyduğu eksiklik, yapılan farklı çalışmalarda Marshall stabilitesi ve tekerlek izi oluşum deneylerinin karşılaştırmalı değerlendirilmesiyle belirlenmiştir. LTT (Labratory Test Track) testlerinde, 50000 geçiş için oluşan tekerlek izi derinlikleri, Marshall stabiliteleri ile grafik olarak değerlendirilmiştir. Çeşitli geleneksel ve polimer modifiye bağlayıcılar deneylerde kullanılmıştır. Sonuçlar gerçek tekerlek yükleri altında oluşan izler ile Marshall stabiliteleri arasında ilişki olmadığını açıkça ortaya koymuştur. Marshall yönteminin, polimer modifiye bağlayıcıların direncinin değerlendirilmesinde etkili olduğu düşünülmemektedir. Bu durum, şimdilerde performans tabanlı değerlendirmeleri yürüten otoritelerden Amerika’da SHRP ve Avrupa’da CEN tarafından kabul edilmektedir [15,16].

- Marshall sıkıştırma yönteminin eksikliği, diğer bazı ülkelerdeki çeşitli araştırmacılar tarafından da araştırılmıştır. Bu araştırmalarda, laboratuarda aynı derecede sıkıştırılmış örneklerin; çeşitli mekanik özellikler göz önüne alındığında (esneklik modülü, dinamik sünme, dolaylı çekme) arazide sıkıştırılmış örneklerden daha iyi sonuç verdiği, laboratuvar ve arazi örnekleri arasındaki farkların, farklı karışım türleri için aynı olmadığı görülmüştür [17].

- Literatürden, agrega kenetlenmesinin (mechanical interlocking) büyük oranda kaba agrega içerisinde gerçekleştiği bilinmektedir. Agrega morfolojik karakteristiklerinin görüntü değerlendirmesi (image evalation); stabil bir agrega iskeletinin daha fazla içsel direnç oluşturduğunu belirtmektedir. Marshall stabilitesi ve dolaylı çekme dayanımı gibi test yöntemleri, sıcak karışım asfaltların içsel direncinin değerlendirilmesinde yetersiz olarak düşünülmektedir. Fakat yapılan çalışmaların kendi arasında değerlendirilmesi

noktasında tutarsız sonuçlar vermediği ve bir performans değerlendirme yöntemi olarak kullanılmaya devam ettiği de bilinmektedir [18].

- Soyulma probleminin önlenmesi ya da en aza indirilmesi için, son yıllarda giderek artan oranda soyulma önleyici katkı maddeleri kullanılmaktadır. Sönmüş kireç, amin bazlı katkıların yanı sıra etkili bir diğer soyulma önleyici katkıdır. Belirli agrega türleri (yüksek silika içeren) soyulmaya karşı özellikle dayanıksızdır. Kireç, sıcak karışımlara eklendiğinde agregayla reaksiyona girer ve bağlayıcı ile agrega arasındaki bağı güçlendirir ve agregayı iyileştirir. Kireç, asfalt çimentosunun polar molekülleriyle reaksiyona girerek soyulmayı önlemede etkili olmaktadır. Bu moleküller, kireçle reaksiyona girdiğinde suya ilgi duymayan ve çözünmeyen tuzlar oluşturur. Ayrıca, sönmüş kireç parçacıklarının karışım içerisinde dağılması ile karışım daha rijit ve sağlam olmaktadır. Mekaniksel olarak asfalt-agrega bağının kırılması yönünde risk azaltıcı etki uygulamakta ve ortamda su olmasa dahi bu anlamda olumlu etki göstermektedir [19].

- Güçlü bir alkali malzeme olan Sönmüş kireç, geçmişte etkin bir soyulma önleyici olarak kullanılmış ve oldukça başarılı sonuçlar alınmıştır. Büyük oranda nötürleştirme gücüne sahiptir. Kireçteki kalsiyum; agrega yüzeyindeki hidrojen, sodyum ve potasyum ile yer değiştirir. Kalsiyumca zengin yüzeyler, uzun zincirli organik asitlerle tepkimeye girerek suya karşı dirençli (yalıtılmış) yüzeyler oluşturur. Genellikle %1-2 oranında sönmüş kireç, doğrudan doğruya harç (slurry) formunda da uygulanır [20].

- Sönmüş kirecin; asfaltı daha sağlam, daha stabil ve durabil, tekerlek izinde oturmaya karşı dirençli kılma özelliği aktif bir filler olarak üst performans oluşturmaktan kaynaklanmaktadır. Tekerlek izinde oturma, asfaltik karışımların elastikliğinin aşılmasından kaynaklanan kalıcı deformasyon oluşumudur. Sönmüş kireç, asfaltın performansını bu açıdan iyileştirmektedir. Birçok mineral fillerin aksine kireç inert (reaksiyona girmeyen) özellikte olmayıp aktif bir kimyasaldır. Bitümle reaksiyona girip, karışım içerisinde dağılarak arzu edilmeyen bileşiklerle tepkime oluşturur. Bu yönüyle, tekerlek izinde oturmaya azaltır ve yorulma dayanımını artırır. Sönmüş kirecin katılmasıyla sonuçlanan dayanım artışı, asfalt çimentosunun PG oranını da artırmaktadır. Kullanıldığı orana bağlı olarak (genellikle asfaltın %10-20'si oranında) PG oranı tek tam ölçüde artmaktadır. Diğer bir deyişle PG 64-22, PG 70-22'ye dönüşmektedir.

Bitümün yaşlanması; hem uygulama hem de servis koşullarında, bitümün sertleşmesi ve kırılğan hale gelmesiyle sonuçlanan çok karmaşık bir konudur. Bu olay, kaplama uygulamalarının bozulmasında çok önemli bir etkiye sahiptir. Bitümlerin

bileşiminde bulunan asfaltın stabilitesi ve kolloidal yapısı yaşlanma ile doğrudan doğruya ilişkilidir [21].

- Isıl değişikliklere, havaya, neme ve ışığa maruz kalan bitümlü bağlayıcıların mühendislik özelliklerinde değişiklikler olur. Bu değişiklikler bitümlü bağlayıcının sertleşmesine neden olur. Bitümlü bağlayıcının sertleşmesi; oksidasyon (elektron kaybını içeren süreç, sıklıkla oksijen kazanımı ama hidrojen kaybı), uçarlık (volatilization) (daha hafif bileşiklerin kaybı), tiksotropi (thixotropy) (titreme veya diğer mekaniksel anlamdan kaynaklanan izotermal gel-sol dönüşümü), sinerisis (syneresis) (jel veya jel gibi maddelerden sıvının ayrılması) ve polimerizasyon (tekrarlı yapısal ünitelerde geniş molekül formasyonunun oluşması) olarak sıralanan birbirinden ayrı reaksiyonlar şeklinde gerçekleşir. Genelde, bağlayıcının servis koşulları altında sertleşmesi büyük oranda oksidasyon ve uçarlığın bir sonucu olarak kabul edilmektedir. Tiksotropi, sinerisis ve polimerizasyon süreçlerinin daha düşük derecede etkiye sahip olduğuna inanılır [22].

- Bitümün bileşiminde oluşan değişme nedeniyle ortaya çıkan yaşlanma aşağıdaki şekilde maddelendirilmiştir.

- Bitümün yağlı bileşiklerinin uçarlık (volatilization) ile boşluklu agrega tarafından emilerek kaybolması söz konusudur.
- Atmosferik oksijen nedeniyle oluşan reaksiyonlarla kimyasal bileşimde değişim (ana neden) oluşmaktadır.
- Tiksotropik etkilerle (sterik sertleşme) moleküler yapılanma görülmektedir.

Yaşlanma süreçleri sonucunda, bitümün bünyesinde hem kimyasal yapının değişimi hem de kolloidal yapı oluşumu gözlenmektedir. Asfaltın oksidasyonu ve moleküllerle kümelerin yapılanma süreci bu değişimlerden sorumlu esas faktörler olarak bilinir. Hafif yağlı bileşimlerin kaybı (volatilization) diğerlerinden daha az etkili olmaktadır [23].

- Asfalt çimentosu asfaltın, reçineler ve yağların bir kombinasyonudur. Asfaltın bileşiminde başka bazı maddelerin de bulunduğu belirtilmesine rağmen bunlar çok düşük düzeyde kalmaktadır. Asfaltın, reçinelerden ve yağlardan göreceli olarak daha viskoz olup, asfaltın viskozitesinin belirlenmesinde esas rolü oynamaktadır. Asfaltın ısı, oksijen ve diğer çevresel etkenlere maruz kalması durumunda kimyasal reaksiyonlar oluşmaktadır. Oksidasyon yağları reçinelere, reçineleri de asfaltın dönüşümüne katkıda bulunmakta, bu dönüşümlü süreç zamanla asfaltın yüksek bir asfalt yüzdesine sahip olmasına neden olmaktadır. Bu yüzden daha yüksek bir viskoziteye ulaşılarak, mineral

agreganın zamanla yağ kısmından maddeleri emmesi sertleşmenin daha da artmasına sebep olmaktadır. Bununla birlikte mineral agrega yüzeyleri oksidasyon için bir katalizör görevi yaparak yorulma sertleşmesini hızlandırmaktadır. Asfaltın, yağların ve reçinelerin verilen bir asfalt çimentosu içerisindeki miktarı, asfaltın fiziksel ve adezyon özellikleri üzerinde önemli etkiye sahip olup, asfaltın yüksek oranda olması (% 30 dan fazla) kaplama yapısında potansiyel çatlama problemlerine ve adezyon azalmasına neden olmaktadır [24].

- Oksidasyonla oluşan değişme asfaltın özelliklerine bağlı olarak bazılarında daha hızlı yaşlanma ve daha fazla sertleşme şeklinde kendini gösterir. Bu olay iki şekilde ortaya çıkar. Birinci kısım karıştırma-serme süresince asfaltın maruz kaldığı yüksek sıcaklıktan ve ısıtılan agreganın geniş yüzey alanından dolayı hızlı oksidasyonun oluşmasıdır. İkinci kısım ise kaplamanın servis ömrü boyunca gerçekleşen yavaş oksidasyon olup, bu durum kaplamanın zamanla havadaki oksijenle etkileşmesi sonucu bağlayıcının oksijenle oluşturduğu tepkime nedeniyle gerçekleşir. Birinci kısımda asfalt bünyesindeki bazı maddelerin uçması asfaltın sertleşmesine neden olur. İkinci kısım süresince oksidasyon yavaş ve uzun süreli gerçekleşir ve esas sertleşme olarak bilinir. Sonuçta bağlayıcı adezyonunda azalma oluşur [25].

- Sönmüş kirecin katılmasıyla birlikte birçok asfalt çimentosunun oksidasyonu ve yaşlanması konusunda iyileşmeler söz konusu olabilmektedir. Bu durum, kireçteki kalsiyum hidroksit ve bitümdeki yüksek polar moleküller arasında gerçekleşen reaksiyonların bir sonucu olmaktadır. Asfalt-agrega bağı bu reaksiyonlarla suya karşı bir ölçüde yalıtılmaktadır. Sonuç olarak, asfalt çimentosu esnek kalmakta, hizmet ömründen daha uzun bir süre gevrek kırılmadan korunabilmektedir [26].

- Bitümlü kaplamalarda soyulma önleyici katkı olarak sönmüş kirecin kullanıldığı bir başka çalışmada; kirecin bitümün erken yaşlanmasını geciktirdiği ve adezyon mekanizmasını iyileştirdiği vurgulanmaktadır [27].

- Amerika ve diğer birçok ülkede yol kaplamalarının büyük çoğunluğunu bitümlü malzemeler oluşturur. Amerika’da bir yıl içerisinde milyonlarca ton asfalt kullanılmaktadır. Asfaltik kaplamaların bozulması bütün dünyada büyük oranda çevresel etkili olarak düşünülür. Çatlak oluşumu, tekerlek izinde oturma ve soyulma genellikle asfalt kaplama bozulma türleri olarak bilinir, son zamanlarda değişen düşünceler ve yeni arayışlarla, mikropların asfalt kaplamalara uzun süreli etkisi de araştırılmaktadır. [28-30].

- Asfalt kaplamalarda yüzeysel kaplama yapımını takiben ilk ılık hava süresince önemli miktarda tekerlek izinde oturma meydana gelir. Kaplamalar incelendiğinde yüksek oranda çukurluklar ve sökülmeler soyulmaya işaret eder. Yapılan testler su hasarının tekerlek izinde oturma ile ilişkili olduğu hipotezine destek olmaktadır. Testler 1985-1986 yılları arasında yirmi farklı bölgeden temin edilen kaplama karotları üzerinde gerçekleştirilmiştir. Karotlara uygulanan akma testleri sonucunda su koşullandırmasının kaplamanın deformasyonu üzerinde önemli etkiye sahip olduğu görülmüştür [31].

- Açık granülometrilili karışımın soyulma davranışının incelediği bir çalışmada, üç ayrı bitüm hem soyulma önleyici sıvı katkı maddesi hem de hidrate olmuş kireçle birlikte kullanılmıştır. Bitümlü bağlayıcılar, verilen bir polimerle de modifiye edildikten sonra soyulma açısından incelenmiştir. Testler optimum bağlayıcı oranında yürütülerek, sönmüş kireç katkı maddesi ilavesi ve bağlayıcı modifikasyonu ile, kaynama testi sonuçları soyulmanın azaldığını göstermiştir [32].

- Bitümlü karışımlarda veya kaplamalarda agrega yüzeyi ve bitüm arasındaki adezif bağın kırılması soyulma olarak tanımlanır. Birçok durumda soyulma çeşitli katkı maddeleri ile en aza indirilebilir. İki farklı soyulma önleyici katkı malzemesi kullanarak karışımların çeşitli koşullar altında soyulması Marshall stabilite testleri ile gerçekleştirildiğinde, katkı işlemi görmüş örneklerin stabilitesi kontrol karışımlarından yüksek bulunmuştur, Amin katkısının etkili olduğu gözlenmiştir [33].

- Sekiz farklı asfalt ve iki farklı agrega kullanılan adezyon konulu araştırmada ultrasonik teknikle adezif dirençler tespit edilmiş, salt agregaya bağımlı olarak sekiz ayrı asfalt türünde adezyon dirençleri arasında önemli bir fark olmadığı ancak her bir asfalt türüyle iki agrega arasında istatistiksel olarak hesaplanan adezyon dirençlerinde önemli farklılıklar olduğu ortaya çıkmıştır [34].

- Bitümlü kaplamalarda soyulma önleyici katkı olarak sönmüş kireç kullanılan çalışmada; kirecin bitümün erken yaşlanmasını geciktirdiği ve böylece adezyon mekanizmasını iyileştirdiği ortaya konulmuştur. Texas’da yapılan çalışmada, sünme testleri sonucunda sönmüş kirecin yüksek sıcaklıkta stabilite artışı sağladığı sonucuna varılmıştır. Sönmüş kirecin asfalt çimentosunun viskozitesini artırırken bir yandan da suyun zararlarına karşı direnci de arttırdığı ortaya konulmuştur. Ayrıca sıcak asfalt karışımına sönmüş kireç katılması ile oluşan reolojik değişimler ve oksidatif sertleşme yönü araştırılarak olumlu sonuçlar elde edildiği görülmüştür. Geniş kapsamlı bitüm ve karışım testleri yapılarak, yüksek sıcaklık performansındaki tekerlek izi direnci, çatlama

direnci ve düşük sıcaklık çatlamaları değerlendirilerek sönmüş kirecin sadece basit bir inert (reaksiyona girmeyen) özellik gösteren filler olmadığı, bitümle reaksiyona giren aktif bir kimyasal olduğu, kireç parçacıklarının bitümün polar bileşenlerini emerek asfalt çimentosunun viskozitesini arttırdığı görülmüştür. Sönmüş kirecin aktif filler etkisinin bir sıcaklık hassasiyeti olduğu, yüksek sıcaklıkta filler görevi gören sönmüş kirecin en yüksek etkinliğe ulaştığı, ayrıca yüksek sıcaklıkta akma direncini arttırdığı, sıcaklık düştükçe gevrekliği azaltarak akma ile oluşan enerjinin kaplamaya dağılmasını sağladığı tespit edilmiştir. Sönmüş kireç ile bitüm arasındaki fiziko-kimyasal etkileşim reolojik modeller, magnetik rezonans ve elektron mikroskobu ile gözlenerek, fiziko-kimyasal etkileşimin kirecin bitüme farklı yönlerden nasıl etki ettiği (Oksidatif sertleşmeyi azaltması, tekerlek izi direncini arttırması, düşük sıcaklık çatlaklarına karşı dayanımı arttırması vb.) tespit etmede en temel mekanizma olarak nitelendirilebileceği sonucuna varılmıştır [35].

- Dört farklı katkı malzemesinin (Wetfix I, Lilamin VP 75 P, Chemcrete, Granüler Lastik) asfalt karışımların Marshall stabiliteleri ve akmaları ile indirek çekme dayanımları üzerindeki etkisinin araştırıldığı çalışmada; suya koşullandırılmış deney sonuçlarının normal deney sonuçlarına oranları bulunarak söz konusu katkı malzemelerinin karışımların suya olan duyarlılıkları üzerindeki etkisi incelenmiştir. Katkı maddelerinin Marshall stabilitesini ve akmasını genel olarak artırdığı, Chemcrete dışındaki katkıların Marshall stabilite oranını ve akma oranını artırmakta olduğu, indirekt çekme dayanımlarında da kuru briketler üzerindeki stabilite artışının ıslak briketlere göre daha fazla olduğu ortaya konmuştur [36].

- Kaplamanın servis ömrü boyunca kaplama bünyesindeki asfalt çimentosu ısının, havanın ve çevresel koşulların etkisinde kalarak sertleşmeye uğrar. Zamanla asfalt çimentosunun viskozitesinde artış oluşturan oksidasyon, yaşlanma sertleşmesi olarak adlandırılır. Yaşlanma sertleşmesine uğrayan asfalt çimentosu daha düşük penetrasyon ve daha yüksek viskozite gösterir, yaşlanma sertleşmesi süreci, gevrek kırılma ile daha düşük adezyon ortaya koyar [37].

- Sıcak karışıma sönmüş kireç ilave etmek, trafik yüklerinin meydana getirdiği gerilmelerin yayılmasına yardımcı olur ve dayanımı arttırır, genellikle kalıcı deformasyon diye nitelendirdiğimiz tekerlek izi potansiyelini azaltır [38].

- Benzer olarak sönmüş kirecin, dönel tekerlek laboratuvar sonuçları doğrultusunda kalıcı deformasyonu, özellikle de tekerlek izi direncini yükselttiği tespit edilmiştir [39].

- Kuru sönmüş kireç veya kireç harcı katılarak yapılan iyileştirilmiş asfaltların yaşlanma ve genel reolojik özellikleri üzerinde sağladığı gelişmeler araştırılmış ve sönmüş kirecin sadece yüksek sıcaklıkta değil düşük sıcaklıkta da kaplama dayanımını olumlu yönde katkı sağladığı tespit edilmiştir [40].

- Genellikle; daha fazla rijitlik asfalt daha hızlı çatlamaya neden olmasına karşın kirecin katılması yorulma karakteristiklerini iyileştirerek çatlamayı azaltmaktadır. Çatlaklar; sıklıkla mikro çatlaklar biçiminde gelişmektedir. Bu mikro çatlaklar, sönmüş kireç yardımıyla doldurulmakta ve çatlak gelişimi durdurulmaktadır. Kireç, inaktif fillerlerden daha fazla çatlak gelişimini durdurmaktadır. Çünkü, kireç ve asfalt çimentosunun polar molekülleri arasında reaksiyon gerçekleşmektedir. Bu reaksiyonlar, geniş organik zincirler ile çevrelenen kireç parçacıklarının efektif hacmini artırmaktadır. Sonuç olarak, kireç parçacıkları çatlakları durdurmada bu yönüyle daha faydalı olmaktadır. Geniş çatlaklar içerisinde küçük çatlakların oluşumu engellenmekte ve kaplamanın efektif ömrü artırılmaktadır [41].

- Yol kaplamalarının durabilitesini sağlayan mineral malzemeler ile asfalt arasındaki adezyon her bir bileşimin kimyasal karakterine bağlıdır. Bu etkileşimin değerlendirilmesi için asfalt ile mineral malzemeler arasındaki adeziv direncin hesaplanması ve farklı bölgelerde kullanılan farklı malzemelerin özelliklerinin ayrıntılı tanımlanması gerekir. Gözleme dayanan adezyon deneyleri, asidik malzemelerle asfaltın ilişkisinde suyun agrega yüzeyine batarak yol kaplamasının kullanım sürecinde soyulmaya yol açtığını göstermektedir. Asidik malzemelerle yapılan bitümlü karışımlarda adezyon artırıcı katkı maddelerinin kullanılması gerekir [42].

- Batı Araştırma Enstitüsü (WRI) kapsamında yapılan çalışmada sönmüş kirecin kaplamanın sertleşme özelliği üzerindeki etkileri araştırılmış ve %1,5 oranında kuru ağırlıktaki sönmüş kirecin kaplamada yaşlanma sertleşmesini azaltmada yeterli katkıyı sağlayacağı ve bu katkının Utah DOT tarafından yönetilen saha çalışmalarıyla da paralellik gösterdiği tespit edilmiştir [43].

- Sönmüş kireç ile ilgili kapsamlı bir araştırma yapıldığında ve bitümle olan etkileşimi konusunda fillere sönmüş kireç takviyesi yapılarak kaplamanın dayanımında önemli ölçüde bir artış sağlandığını, bunun yanında sönmüş kirecin fiziksel sertliği arttırmadığı, sönmüş kireç ile modifiye edilmiş kaplamanın, trafik altında oluşan yükün kaplamaya dağılmasının, modifiye edilmemiş geleneksel kaplamaya göre daha fazla olduğunu ve deformasyonun kalıcı olmaması yönünde olumlu sonuçlar doğurduğunu,

sönmüş kirecin düşük sıcaklık sertleşmesini arttırmasına rağmen, çatlak oluşumuna karşı direnci de aynı oranda arttırdığını, gevrekliği azalttığını, yaşlanma ile oluşan problemlere karşı etkinin yüksek sıcaklıkta düşük sıcaklığa göre daha etkili olduğunu tespit etmiştir [44].

- Pratik etkisi ile sönmüş kirecin kaplamanın su hassasiyetine katkıları ile ilgili %1-1,5 oranlarında sönmüş kireç kullanarak ve tekerlek izi testleri uygulanarak yapılan araştırmada sönmüş kirecin olumlu etkileri tespit edilmiştir [45].

- Oksidasyona dayalı sertleşme etkilerine karşı dirençte, sönmüş kireç kullanımı etkili olmaktadır, Belçikada yapımı on yılı aşkın süre devam eden Marimbourg ve Nemville arasındaki N5 yolunda, 15 ayrı kısımda uygulamalar yapılmıştır. Sekiz senelik çalışmaların sonucunda sönmüş kireçle modifiye edilmiş asfalt kaplamaların modifiye edilmemiş veya polimer modifiyeli bitüm kullanılmış yollara nazaran gösterdikleri performans artışlarına dikkat çekilmiştir [46].

- Amerika Birleşik Devletlerinde lastik iç basınçlarının 75 psi'den, 100 psi'ye çıkması ve lastik ile kaplama arasındaki temas alanının azaltılması ve bunun doğal sonucu olarak birim alana gelen lastik yükünün artması, son on yılda tekerlek izi oluşumunu hızlandırarak bu yolların en önemli sorunu haline gelmiştir.

Bitümlü sıcak karışımlar, bir yandan kalıcı deformasyonlara karşı dirençli olacak bir şekilde tasarlanırken diğer taraftan çatlamaya, yaşlanmaya mukavim ve yeterli sürtünme yüzeyine sahip olacak şekilde hazırlanmalıdır. Örnek olarak, bitüm açısından çok zengin ve boşluk oranı açısından yetersiz olan bir karışım, yorulma çatlaklarına yüksek direnç gösterirken tekerlek izi oluşumuna karşı düşük bir dirence sahip olacaktır. Benzer olarak, genel anlamda agrega ve boşluk oranı açısından zengin; fakat bağlayıcı madde içeriği düşük olan bitümlü karışımlar, tekerlek izine karşı yüksek direnç gösterirken, düşük yorulma mukavemetine sahip olacaktır. Diğer bir ifade ile bir karışımın yorulmaya karşı durabil, tekerlek izi oluşumuna karşı ise stabil olması gerekir. Ağır ve yoğun trafik yükünün mevcut olduğu yollarda, doğal olarak tekerlek izine karşı stabil bir karışım tasarımı yanında, aynı zamanda yorulmaya karşı dayanıklı tasarım yapılmalıdır. Tekerlek izi oluşumunun sıklığına, büyüklüğüne ve uygunluğuna bağlı olarak bazı ülkeler, iklim ve trafik koşullarını da göz önüne alarak, kalıcı deformasyonlara SMA gibi dirençli karışım tipleri geliştirmişlerdir [47].

- Üzerinde halen bilimsel çalışmaların devam ettiği yeni kaplama türleri, sıklıkla boşluklu dane boyutu dağılımına sahip, genellikle modifiye ve düşük penetrasyonlu

bağlayıcılarla üretilmektedir. Almanya-İsveç-Danimarka-Hollanda'da yoğun olarak kullanılan SMA (Stone Mastic Asphalt) bu uygulamaların başında gelmektedir [48].

- SMA, iri agregadan oluşmuş bir iskelet ile boşlukları dolduran ince agrega filler bitüm harcının (mastik harç) karışımıdır. Kaba agrega yüksek dane teması ve iç kenetlenme ile trafik yüklerini taşır. Mastik harç ise boşlukları doldurarak yüksek bitüm oranı nedeniyle durabiliteyi artırır. SMA karışımına, bitüm oranı yüksek olduğundan, bitüm ve bitüm+fillerin karışımından süzülmesini önlemek için elyaf (fiber) ilave edilir.

- SMA kaplamalarda mineral agrega çatısı önemli bir unsurdur. Agregada büyüklükleri büyük oranda 30-40 mm civarında olan mineral agreganın oluşturduğu iskelet, içsel sürtünmeyi oluşturmaktadır. Bu iskelet (çatı) zengin ve boşluksuz mastikle (bitüm + kum + filler) doldurulmakta ve bir arada tutulmaktadır. Asfalt çimentosunun (AC), depolama, taşıma, serme süreçlerinde kaba agrega danelerinden drene olmaması için “selüloz veya mineral fiberler” kullanılmaktadır. SMA tekerlek izinde oturmaya karşı önemli bir çözümdür [49].

- Stone Mastik Asfalt (SMA), bitümlü kaplamalarda ortaya çıkan tekerlek izi oluşumunu azaltmak amacıyla geliştirilen, yüksek oranda kaba agrega (%70-80) ve bitümlü bağlayıcı (% 6-7) ile az miktarda ince agrega ve fiberden oluşan, açık granülometrilik bir sıcak karışımdır [50].

- SMA karışımında yüksek oranda kullanılan kaba agrega, birbiri ile temas halinde bir iskelet yapı oluşmasını sağlar. Bu iskelet yapı, yol yüzeyine uygulanan yüklerin yol üzerinde deformasyona neden olmadan alt yapıya iletilmesini sağlar [51].

- SMA karışımında kullanılan bitümlü bağlayıcı sert, düşük penetrasyonlu olmalıdır. SMA karışımlarında 40/50 veya 60/70 penetrasyonlu bitümlü bağlayıcı veya modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcılar kullanılabilir. Şartnameye uygun agrega granülometrisiyle hazırlanan SMA karışımların tasarımında, başka bir karışım tasarımı belirtilmedikçe Marshall karışım tasarımı uygulanır. Tasarım sırasında Marshall tasarımlarının her iki yüzüne 50 darbe uygulanır [52].

- SMA karışımlarında tasarım sırasında Marshall tasarımlarının her iki yüzüne 75 darbe uygulaması, daha fazla yoğunluk sağlayamadığı ve agregaların kırılmasına sebep olduğu için kullanılmamaktadır [53].

- Ayrıca Marshall testi sonucunda, SMA karışımların Marshall stabilitesinin geleneksel beton asfalt karışımlardan düşük olduğu gözlenmiştir. Bu yüzden Marshall stabilitelerine bakarak SMA karışımlarına kabul veya red sonucu vermek yanlıştır.

Marshall stabiliteleri sadece bilgi için ölçüdür. Zaten ABD’de hazırlanan şartnamede de, “öngörülen stabilite” diye şartnameye konmuş ve kesin bir rakam vermekten kaçınılmıştır. Bazı uzmanlar Marshall stabilitesinin 530 kg veya 455 kg. değerlerine kadar kabul edilebileceğini söylemektedirler [54].

- Uzmanlar SMA karışımların değerlendirilmesinde Marshall metodu yetersiz kaldığı için, yeni karışım tasarım metodları üzerinde durmuşlardır. Bunlardan birisi de yoğurmalı pres (giratory pres) ile tasarım metodudur. Yoğurmalı pres, kalıp içindeki numune üzerine dikey bir basınç, (genellikle 600 kpa) verirken, kalıp belli bir eğilme açısıyla bir koni çizecek tarzda jirasyon hareketi yaparak eksenini etrafında dönmektedir. Eğim açısı ve jirasyon numune içinde kayma gerilmeleri doğurarak bir “Yoğurma” etkisi yaratmakta ve agrega danelerini, kırılma ve ezilmeye maruz bırakmadan, yönlendirerek sıkışmayı sağlamaktadır. Bu tarz sıkıştırmanın şantiyede silindirler altındaki sıkıştırmayı en iyi şekilde temsil ettiği düşünülmektedir [55].

- SMA karışımların serilmesi geleneksel beton asfalttaki gibidir. Geleneksel şekilde karışım taşıyıcı kamyonun sericiye boşaltılır. Sericiye boşaltıldığı sırada karışım, en az 143°C sıcaklığa sahip olmalıdır. Serici ilerledikçe, karışımın açık granülometrisini açıkça görülmekte ve karışım sanki aşırı fazla bitümlü bağlayıcı içeriyormuş gibi gözükmemektedir. Bu durum, karışımdaki ince agreganın azlığından, yüksek bağlayıcı oranından dolayı oluşmakta ve sonucunda da agrega daneleri arasındaki film kalınlığı artmaktadır [56].

- SMA’nın kaplamaların su sıçratmasını azaltıp azaltmadığı kesin bir şekilde belli değildir. Bazı kaynaklar SMA kaplamaların su sıçratmasının, geleneksel beton asfalttaki ile eşit olduğunu söylemektedir. Bazı kaynaklarda ise SMA kaplamaların yüzey yapısı nedeniyle, su sıçratmasını azalttığı belirtilmektedir [57].

- Gelenekse asfalt kaplamalar 40 mm aşınma, 60 mm binder tabakası olmak üzere 100 mm kalınlığında yapılmaktadır. Almanya’da yapılan oldukça dayanımlı SMA kaplamalar ise 25 mm-40 mm kalınlığında uygulanmıştır [58].

- SMA kaplamalarda komplekslik arttığından ve sabit ısı-karışım kompozisyonu kontrolü fazlaştığından daha yüksek üretim maliyetinin ortaya çıktığı söylenebilir. Kuru ve bağlayıcı ile karıştırma sürelerindeki artış tesisin üretim kapasitesini düşürmektedir. Örneğin; saatlik üretimi 450 ton olan tesisin saatlik üretimi 180 ton’a düşmüştür [59].

- SMA kaplamaların ilk yapım maliyetleri göz önüne alındığında, oldukça yüksek maliyete sahip oldukları görülmektedir. Fakat servis ömrü boyunca oluşabilecek bakım maliyetleri ve bozulmalardan kaynaklanabilecek gecikme ile kaza maliyetleri göz önüne

alındığında, SMA kaplamaların büyük kazançlar sağlayacağı açıktır. ABD’de bazı eyaletlerde filler olarak çimentoya müsaade edilmezken, Portekiz, Hollanda ve Macaristan’da mineral filler olarak kireçtaşı kullanımı istenmektedir [60].

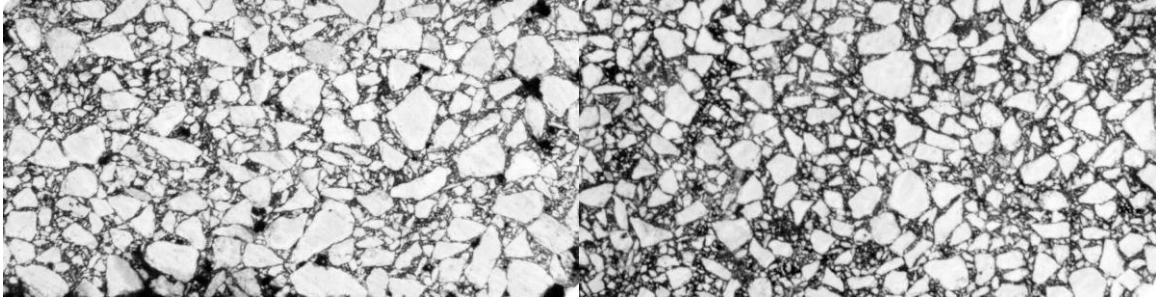
- SMA karışımların hizmet ömrü, bünyesindeki taşların cilalanmaya karşı direncinin büyük olmasına bağlı olup, bu yüzden bir çok ülkede cilalanma değerinin %55’den büyük olması istenmektedir. İngiltere’de kullanılan boksitin (calcined bauxite) cilalanma değeri çok yüksek olup, 70’den büyük çıkmaktadır [61].

- SMA kaplamalarda ABD’de asfalt plantlerin filtrelerinde toplanan taş tozlarının kullanımına müsaade edilirken, Almanya’da kullanılmaması önerilmektedir [62].

1.4. SMA Kaplamalar

Lastik iç basıncının yükselmesi, kaplama ve lastik arasındaki etkileşim yüzeyinin azalması ve ayrıca yasal dingil yüklerinin artması gibi nedenler geleneksel asfalt kaplamaların performansı üzerindeki olumsuzluğu artırmıştır. Kalıcı deformasyonlara dirençli karışımlar için çalışmalar yapan Amerikalı uzmanlar, Almanya’da uygulanan SMA karışımları incelemiş ve bu karışımların yüksek stabiliteye sahip olduklarına kanaat getirmeleri üzerine, 1991 yılında kendi ülkelerinde deneme kesimleri yaparak SMA uygulamalarına başlamışlardır. Alınan olumlu sonuçlardan sonra SMA’nın yaygın olarak kullanımına devam edilmiştir. SMA karışımlar, Almanya ve ABD’den başka İsveç, Norveç, Danimarka, Hollanda, Belçika, Fransa, İsviçre, Japonya, Macaristan, İngiltere ve Portekiz gibi ülkelerde kullanılmaktadır. SMA karışımlarının önemli kullanım alanları olarak otoyolları, kavşak noktaları, otobüs durakları, otobüs yolları, hava alanları ve yarış pistleri gibi yerler sayılabilir [63-65].

Şekil 1.’de SMA karışımının kesiti ile geleneksel aşınma karışımının kesitleri, gösterilmiştir. SMA kesitinde kaba agregalar arasında dane teması görülmektedir. Şekil 2.’de ise SMA yüzey dokusu ile aşınma karışımının yüzey dokusu karşılaştırılmaktadır.



Şekil 1. SMA tabakası kesiti ile (Sol) Aşınma tabakası kesiti (Sağ)



Şekil 2. SMA yüzey dokusu ile (Sol), Aşınma tabakası yüzey dokusu (Sağ)

1.4.1. SMA Kaplamaların Üstyapı Yüzey Karakteristikleri

Bir yüzey tabakası için asfalt karışım tipinin seçiminde dikkate alınan fonksiyonel yüzeysel karakteristikler,

- a) Kayma direnci
 - b) Düzgünlük; enine ve boyuna
 - c) Gürültü seviyesi
 - d) Yüzey durabilitesi
 - e) Görünürlük
 - f) Yapım şartları
- şeklinde sıralanabilir.

1.4.1.1. Kayma Direnci

SMA, yol uygulamalarının birçoğunda gerekli olan kayma direnci düzeyini sağlayacak şekilde dizayn edilebilir. Elde edilen kayma direnci iki ana faktöre bağlıdır; agrega tipinin seçimi ve yüzey dokusunun dizaynı, arazide daima uygun cilalanma değerine sahip iri agrega kullanılmalıdır. Yüksek cilalanma değerine sahip agregalar, trafik altında cilalanmaya karşı dirençli olup, uzun bir süre kayma direncini muhafaza ederler. Birçok ülkede lokal olarak agreganın bulunabilirliğine ve uygulamadaki deneyimlerine göre cilalanma değeri kriteri mevcuttur. Çeşitli çalışmalar SMA'nın, aynı agrega ile yapılan klasik karışımlara eşdeğer veya daha iyi bir performansa sahip olduğunu göstermiştir [66].

Yüzey dokusu, tekerlek ile yol yüzeyi arasındaki yüzey suyunun yayılması ve lastik tekerleğin yüzeyi kavraması açısından önemlidir. SMA yüzeylerini farklı dokularda dizayn etmek mümkündür. Bu dizayn, agrega boyutunun ve boşlukları dolduran harcın bir fonksiyonudur. İri agregalar (0/14, 0/16) 1,5-2,0 mm'lik doku derinliği oluştururken, daha küçük boyutlu agregalarda doku derinliği daha düşüktür. Birçok ülkede yüksek ve düşük hızlı trafik için gerekli yüzey doku derinliği şartının sağlanması uygun karışımın seçimi ve dizaynı ile mümkün olmaktadır. Ayrıca trafik altında doku kaybının olmaması için karışımın aşırı derecede harç ile doldurulmaması gerekmektedir. SMA karışımları, diğer klasik karışımlara göre yüzeyde daha kalın bağlayıcı filmi oluşturmaktadır. Bu nedenle birçok ülkede de dikkati çektiği gibi, ilk birkaç aylık trafik süresince SMA'nın kayma direnci beklenilenden daha düşük olabilir. Ancak bu varsayımı destekleyen çok az sayıda kanıt vardır. Buna rağmen bazı ülkelerde bu problem olasılığına karşı serim sırasında yüzeye 0-2/5'lik kırmataş mıcır uygulanmaktadır [66].

1.4.1.2. Düzgünlük

Üstyapı sürüş kalitesini belirleyen ve sericiyle sağlanan düzgünlük, güçlü agrega yapısı nedeniyle SMA'da asfalt betonu seriminden elde edilenden çok daha iyidir. Bu nedenle aşırı silindirme gerektirmemektedir. Diğer asfalt kaplamalarla sağlanan sürüş konforu ile karşılaştırıldığında bu tip kaplamada daha yüksek sürüş konfor seviyesi elde edilebilmektedir. SMA'nın kalıcı deformasyona karşı direnci yüksek olduğundan hem enine hem de boyuna düzgünlüğü zamanla çok fazla değişmez (Ancak boyuna düzgünlük

üst yapının altındaki tabakaların taşıma gücü ile yakından ilişkilidir). Bu durum SMA'nın tekerlek izine karşı daha yüksek dayanıma sahip olduğunu göstermektedir. Modifiye edilmemiş malzemeler içeren SMA'nın kalıcı deformasyona karşı direnci, üç eksenli basınç deneyi ile ölçülmüş ve asfalt betonunun kalıcı deformasyona olan direncinden yaklaşık 1,5-4 kat daha yüksek bulunmuştur. İngiltere'de kullanılan tekerlek izi cihazı ile 60°C'de yapılan deneyde modifiye edilmemiş bağlayıcı ile üretilmiş SMA karışımında yaklaşık 1 mm/saat oturma görülmüştür. Bu değer, İngiltere'de asfalt kaplamalarda deformasyon direnci kriteri olarak verilen 5mm/saat değerinden oldukça düşüktür [66].

1.4.1.3. Gürültü

Birçok ülkeden alınan raporlar SMA'nın gürültü seviyesinin düşük olduğunu göstermiştir. SMA'nın gürültü seviyesi Tablo 2.'de görüleceği gibi bu kaplamayı kullanan ülkelerdeki alternatif standartlara göre değerlendirilmektedir. Belirli bir sürtünme seviyesini elde etmek için yüksek dokulu yüzeylerin kullanılması gerekir (HRA-Hot Rolled Asfalt, yivlendirilmiş veya fırçalanmış beton gibi).

Aynı doku seviyesine sahip diğer asfalt kaplamalara göre SMA, etrafa daha az gürültü yayar.

Tablo 2. Diğer karışım tiplerine göre SMA gürültü seviyesi [66]

Ülke	SMA Tipi	Gürültü Azalması, dB(A)	Referans Karışımlar
Almanya, v=50 km/h	0/5,0/8	(+2)-(-2)	AC 0/11
İtalya, v=110 km/h	0/15	(+5)-(+7)	AC 0/15
Hollanda, v=60-100 km/h	0/6 0/8 0/11	(+1,4)-(+1,6) (+0,2)-(+0,6) (0,0)-(-2,0) (0,8)-(0,5) (1)-(-3,0)	AC 0/16
İngiltere, v=70-90 km/h	0/6	(+5,3)-(+5,2)	HRA
	0/10	(+3,5)-(+3,2)	
	0/14	2,7	

Negatif değerler gürültü seviyesi artışını gösterir.

Aslında SMA'nın yüzey dokusu daha yüksek olmasına rağmen, daha düzgün ve düşük dokulu asfalt betonuna göre gürültü seviyesi daha düşüktür. Sürtünmeyi artırmak için yüzeye serilen mıcır, uygulamanın ilk yılında gürültü düzeyini artıracaktır [66].

1.4.1.4. Yüzey Durabilitesi

SMA'yı geliştirme ihtiyacı, kalıcı deformasyonlara ve çivili tekerlek aşındırmasına karşı üstyapı yüzeyinin dayanımını artırmak ihtiyacından doğmuştur. SMA'nın çok durabil ve aşınmaya karşı dirençli olduğu ispatlanarak, amaçlanan bu hedefe ulaşılmıştır. Soyulma, yüzey çatlağı (sıcaklık ya da trafiğe bağlı) ve sökölme gibi kaplama bozukluklarının SMA ile ilişkilendirilemeyeceği tespit edilmiştir. SMA'nın yüksek durabilitesi, mastik harcının sızdırmaz yapısından kaynaklanmaktadır. Harç bağlayıcı açısından zengin ve boşluksuz olduğundan, bağlayıcının bozulma hızı da oldukça düşüktür [66].

İlk SMA tipi kaplama, 60'lı yılların ortalarında Almanya'da inşa edilmiştir. Bu kaplamalar şimdi epey süre geçmesine rağmen, hala yoğun bir bakım gerektirmeden kullanılmaktadır. Diğer ülkelerde genellikle 80'li yılların ortalarında başlayan SMA uygulamalarından çok iyi performans elde edilmiştir. Üstyapı mühendisleri, önemli bir bozukluk görülmeyen bu kaplamanın gerçek performans ömrünün tahmininde zorluk çekmektedirler [66].

1.4.1.5. Görünürlük

Düşük yüzey dokulu asfalt betonu ile karşılaştırıldığında, SMA'nın yüksek yüzey dokusunun anlamı, malzemeler arasında daha fazla su tutma kapasitesidir. Sonuçta, yüzeyde daha az su görüldüğünden, gece seyreden araçların farlarının yansıması ile oluşan parlama azalır, yol işaretlerinin görünürlüğü artar ve su sıçraması da kısmen önlenmiş olur [66].

1.4.1.6. Yapım Şartları

Karayolları Teknik Şartnamesinde SMA karışımların yapım şartları aşağıdaki gibi verilmiştir. Bitümlü bağlayıcı ve mineral agrega en az 165°C'lik, en fazla 180°C'lik bir karışım sıcaklığı elde edilecek bir sıcaklıkta karıştırılacaktır. Plent; elyaf katkısı ve filler malzemeyi otomatik olarak istenilen ağırlıkta besleyecek donanımına sahip olacaktır. Elyaf katkı için yeterli miktarda kuru depolama yapılacak ve elyafın karışıma üniform biçimde orantılı olarak ve istenilen miktarlarda verilmesi için önlemler alınacaktır. Plentde, elyaf karıştırıcıya, tartım sistemi ile otomatik olarak doğrudan doğruya ilave edilecektir. Elyafın

karışıma ilave edilmesinin zamanı ve elyaf ilavesi nedeniyle artan karıştırma süresi, elyaf üreticisinin önerdiği şekilde olacaktır. Plentde üretilen karışımdan günde en az iki kez numune alınarak bitüm süzülme deneyi yapılacaktır. Süzülme miktarı maksimum % 0,3 olacaktır. Gerekğinde sıcak karışım, sıcak karışım depolama silolarında depolanabilecektir. Depolama siloları uygun ısıtma ve izolasyon ekipmanı ile donatılmış olacaktır. Bekletme zamanı İdare'nin belirlediği sınırlamalar içinde olacaktır. Hiçbir durumda SMA gece boyunca veya bir sonraki günün kaplaması için depoda bekletilmeyecektir. Karışım; sericiye verildiğinde 145°C'nin altında olmayan bir sıcaklığa sahip olacaktır. Karışımın sıcaklığı, tam sericiye boşaltılmadan önce kamyonun içinde ölçülecektir. Karışımı sermek için minimum çevre sıcaklığı gölgede 10° C olacaktır.

Karışım, serildikten hemen sonra, bir finişer için statik ağırlığı minimum 10 ton olan en az iki adet çelik bandajlı silindir kullanılarak sıkıştırılacaktır. Silindirleme işlemine karışım sıcaklığı 145°C'ye düşmeden önce başlanacaktır. SMA üzerinde lastik tekerlekli silindirler kullanılmayacaktır. Silindirler, sericinin arkasındaki en fazla 100 m'lik mesafe içerisinde çalıştırılacaktır. Sıkıştırma sırasında vibrasyon uygulanmayacaktır. Silindirlerde, karışımın bandajlara yapışmasını önlemek için, sulama sistemi olacaktır. Silindirleme işlemine silindir izleri kayboluncaya ve gerekli yoğunluk elde edilinceye kadar devam edilecektir. Silindirleme işlemi, serilen karışımın sıcaklığı 115°C'ye düşmeden önce tamamlanacaktır. Yerinde yoğunluk sağlanır sağlanmaz, bitümlü bağlayıcı veya fillerin yüzeye çıkmasına neden olabilecek aşırı silindirlemeyi önlemek için, silindirleme durdurulacaktır. Sıkıştırma işlemi sırasında; istenilen minimum yoğunluğun elde edildiğinden emin olmak amacıyla, nükleer yoğunluk ölçme aletleri ile yoğunluğu izleyecektir. Modifiye bitüm kullanılması halinde; karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları Modifiye Bitüm üreticisinin önerilerine göre ayarlanacaktır. Karışımın plentde modifiye edilmesi halinde, karıştırma süreleri, karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları, katkı üreticisi firmanın önerilerine göre olacaktır.

Sıkıştırılmış tabaka kalınlığı SMA Tip-1 için 35-50 mm, SMA Tip-2 için 25-40 mm olacaktır. Sıkışma % 97'den az olmayacaktır. Her durumda sıkıştırılmış malzemenin hava boşlukları % 6'dan az olacaktır. Tüm yüzey kotları, kalınlıklar, yüzey düzgünlüğü şartları ve tolerans limitleri belirtilen esaslara uygun olacaktır [67].

1.5. Karışım Değişkenleri

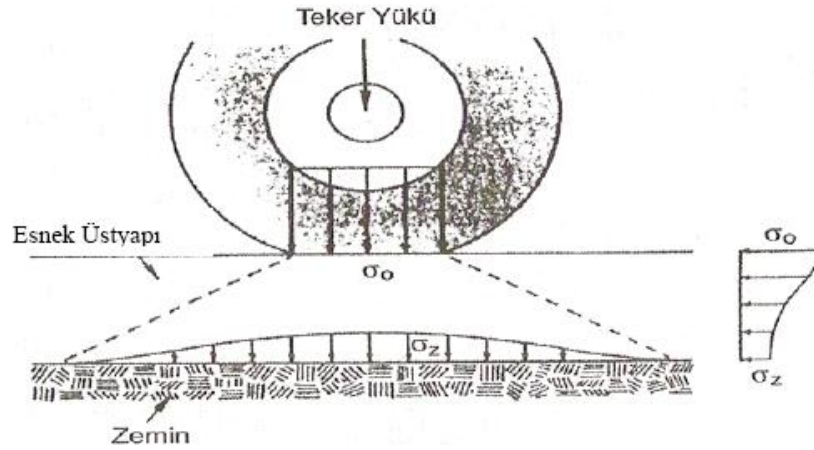
Yol üstyapısı, altyapısı ile araç tekerleklerinin temas ettiği yüzey arasında düzgün bir yüzey oluşturmak amacıyla altyapı üzerine yerleştirilen alttemel, temel ve kaplamadan oluşan tabakalı bir yapıdır. Üstyapının görevlerini kısaca üç grupta toplayabiliriz [68-70].

- a) Trafik yükünden dolayı oluşan gerilmeleri üzerine olarak tabakalar boyunca dağıtmak ve taban toprağına fazla yük gelmesini önlemek.
- b) Üzerinde trafiğin akabileceğı düzgün bir yüzey oluşturmak.
- c) Yol gövdesini doğanın bozucu etkilerine karşı korumak.

Yol üstyapısı, trafik yüklerini taşıyan ve azaltarak altyapıya aktaran tabakalı bir yapıya sahiptir. Üstyapılar tabakalarında kullanılan malzemelerin özelliklerine göre genel olarak rijit ve esnek olmak üzere ikiye ayrılırlar.

Yüklerin büyük bölümünün portland çimentosundan yapılmış beton plaka tarafından taşındığı, kalan kısmının altyapıya aktarıldığı üstyapı tipi Rijit üstyapı olarak adlandırılır. Alttemel ve/veya temel ve/veya grobeton ve onun da üzerine donatılı veya donatısız anolar halinde serilmiş beton plaklar gelir. Üstyapı tabanının dayanımına bağı olarak plakanın altına alttemel tabakası yapılabilir ya da yapılmayabilir [71]. Uygun biçimde projelendirilip inşa edilirse uzun ömürlü olur ve diğer tip kaplamalara göre daha az bakım gerektirir [72].

Üstyapı tabakalarının yük yayma kabiliyeti kullanılan malzemenin mekanik özelliklerine (örneğin; esneklik modülü, poisson oranı, vb.) bağıdır. Ayrıca esnek üstyapılarda gerilme, deformasyon ve defleksiyon yukarıdan aşağı doğru azalır. Bu yüzden üst tabakalar bitümlü bağlayıcı karışımlar ile, alt kısımdaki tabakalar ise daha düşük mukavemetli ama dren kabiliyeti daha yüksek granüler (KÇ, KT) malzemeler ile yapılmaktadır. Kullanılan malzeme özellikleri ne kadar iyi bilinirse yapılan üstyapı kaplama tasarımı da o derece iyi olacaktır. Esnek üstyapı tabakalarını düşük standartlı esnek üstyapılar (sathi kaplamalar, makadam temeller, koruyucu satih tabakaları), yüksek standartlı esnek üstyapıların bünyesinde ise alttemel, temel ve BSK tabakaları bulunmaktadır [73,74].



Şekil 3. Esnek üstyapılarda gerilme dağılımı

Şekil 3.'de görüldüğü gibi esnek üstyapıların üst kısmı alt tabakalara göre daha büyük gerilmelere maruz kalmaktadır [74]. Esnek yol kaplamalarının en yaygın ve kapsamlı karışım türü olan sıcak asfalt kaplamalar bünyesindeki malzemeler aşağıda Tablo 3.'de verilen karışım değişkenlerinden oluşmaktadır. Bu karışım değişkenlerindeki farklılıklar asfalt betonu karışımının performansı üzerinde önemli değişiklikler meydana getirir.

Tablo 3. Karışım malzeme ve değişkenleri

Asfalt	Tipi
	Sertliği
Agrega	Tipi
	Granülometrisi
Katkı Malzemesi	Bitümün Modifiye Edilmesi
	Karışımın Modifiye Edilmesi
Karışım	Bağlayıcı oranı
	Boşluk Yüzdesi
	Asfaltla Dolu Boşluk Yüzdesi
	Agrega İçerisindeki Boşluk Yüzdesi

Tablo 3.'de verildiği gibi karışımların bağlayıcı oranı, boşluk yüzdesi, asfalt dolu boşluk yüzdesi, mineral agreganın içerisindeki boşluk yüzdesi, su hassasiyeti, sıkıştırma

derecesi gibi değişkenler de bulunmaktadır. Tablo 3.'de sadece karışımı oluşturan ana malzemeler ve özellikleri belirtilmiştir.

1.5.1. Bitümlü Bağlayıcı

Sıcak asfalt karışımlarında bağlayıcı olarak bitüm kullanılmaktadır. Bitüm, doğal kökenli veya pirojenik kökenli (doğal, ısı etkisiyle meydana gelen ergime sonucu oluşan) hidrokarbonların bir karışımı ya da her ikisinin bir kombinasyonudur. Gaz, sıvı, yarı-katı veya katı halde olabilirler. Metal dışı türevleri ile bir arada bulunan, yapıştırıcı özellikleri olan ve karbondisülfürde tamamen çözülen madde olarak tanımlanırlar [75].

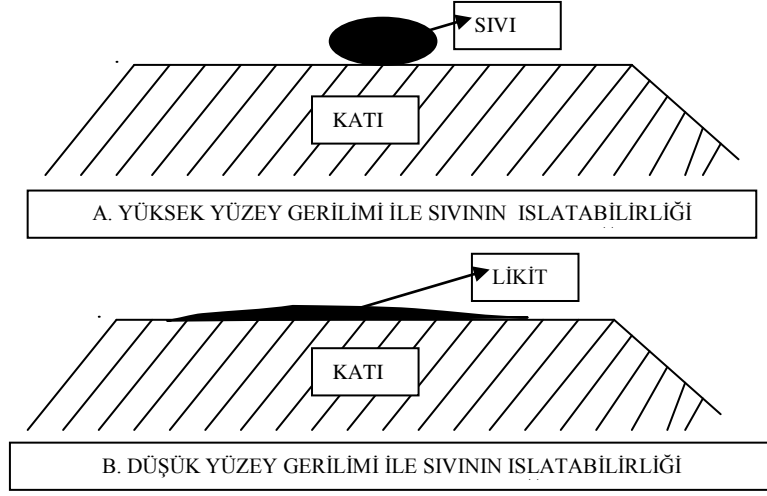
Bitümlü karışımların içsel sürtünme direnci ile stabilitesinden agrega sorumlu iken kohezyonu bitüm tarafından sağlanmaktadır. Ayrıca bitüm agrega danelerini birbirine bağlayarak trafik etkisiyle dağılmasını önlemekte, yarattıkları düzgün yüzeyler ile sürtüş konforunu sağlamakta, kohezyon ile stabilitenin artmasına neden olmakta, karışımın boşluklarını doldurarak geçirimsizliğini sağlamaktadır. Bitüm bağlayıcılı karışımlarda bitüm ağırlıkça en fazla % 5-7 ve hacimce en fazla % 13-15 gibi küçük oranlarda kullanılsa da esnek kaplamalar için çok önemli bir malzemedir. Bitüm penetrasyon sınıflandırması Tablo 4.'de verilmiştir.

Tablo 4. Penetrasyon sınıflandırması

Bitüm Penetrasyon Sınıfı	Penetrasyon miktarı (25°C, 100 gr, 5sn)
40/60	40-60
50/70	50-70
70/100	70-100
100/150	100-150
160/220	160-220

Bitümlü bağlayıcının kaplama performansını doğrudan etkileyen en önemli özelliği dayanıklılığıdır. Bitümlü bağlayıcının dayanıklılığı veya durabilitesi sertleşmeye karşı gösterdiği direnç olarak ifade edilmektedir. Bitümlü bağlayıcının çeşitli nedenlerden dolayı sertleşmesi ve kırılğan hale gelmesine de “yaşlanma” veya “zamana bağlı yaşlanma” denilmektedir [76]. Yapılan ayrıntılı bir çalışma yaşlanmanın iki aşamada oluştuğunu göstermektedir. Uygulamada, asfalt kaplama yapıldıktan sonra, önemli miktarda

Yüksek yüzey gerilimi, düşük ıslatılabilirlik oluşturur. Islatılabilirlik arttığında adezifin yüzey enerjisi azalmaktadır. Bu durum, Şekil 5.'de görülmektedir.



Şekil 5. Sıvının katı yüzey üzerine yayılmasında yüzey geriliminin etkisi [80].

Bitümlü malzemeler, farklı kimyasal ve moleküler özellikteki hidrokarbon bileşenlerinden oluşur. Bitümlü malzemelerin çeşitli bileşenleri arasında; küçük bir molekül miktarı katı yüzeyinden gerekli enerjiyi tatminkar bir şekilde karşılayabilir. Bu moleküller, dipoller olarak bilinir. Pozitif ve negatif yüklerin merkezinde olan dipoller çakışmamaktadırlar [81, 82].

Asfalt, molekül ağırlıkları farklı hidrokarbonların kompleks bir karışımı olup n-heptan 'da çözülen kısmına malten, çözünmeyen kısmına da asfalten adı verilir. Maltenler kısımlarına ayrıldığında aromatikler, reçineler ve doymuş hidrokarbonlardan oluşur. Asfaltenler gri-siyah renkte olup n-heptan'da çözülmezler. Yüksek sıcaklıkta krakinge uğrayıp koklaşırlar. Molekül ağırlıkları 500-100000 arasında değişmektedir. Aromatikler, koyu kahverengi viskoz yağ şeklindedir. Az miktarda oksijen, azot ve kükürt içerirler. Molekül ağırlıkları 300-2000 arasındadır. Reçineler n-heptan'da çözünebilir. Açık siyah renkleri vardır. Molekül ağırlıkları 500-2000 arasındadır. Doymuş hidrokarbonlar renksiz yağlı yapıda olup vaks gibi parafinik ve naftanik yağ halkalarını içerir. Molekül ağırlıkları 300-2000 arasındadır [83].

Adezyon-soyulma incelemeleri, çeşitli bitümlü malzemeler üzerinde yürütülmüş olup farklı kaynaklardan üretilen bitümün farklı soyulma durumu göstereceği belirtilmiştir. Parafin varlığının bitümlü malzemenin adezivitesi üzerinde zararlı etkisi olduğu ifade

edilmiştir[84]. Benzer bir şekilde soyulmada katran miktarının önemli katkısının olduğu bildirilmiştir [85].

Asfalt çimentosu; baskın hidrokarbon kökenli yapıdan oluşmakla birlikte, içeriğinde hidrojen, çok az miktarda sülfür, oksijen ve nitrojen bulunmaktadır. Çeşitli kökenli ham petrolerden üretilmiş asfalt çimentolarının elementsel analizleri yapılmış olup, çoğunluğunun aşağıdaki bileşimde olduğu görülmüştür.

Tablo 5. Asfalt çimentolarının elementsel analiz sonuçları [86].

Element	Değer (%)
Karbon	82-88
Hidrojen	8-12
Sülfür	0-6
Oksijen	0-1.5
Nitrojen	0-1

Bir asfalt çimentosunun kimyasal bileşimi oldukça karmaşık olup bunun reolojik özelliklere etkisini saptamak oldukça güçtür. Ancak, bu yapıyı asfaltlar ve maltenler olmak üzere iki ana gruba ayırabilmek mümkündür. Maltenler de kendi alt grubunda, doymuş hidrokarbonlar, aromatikler ve reçineler olmak üzere sınıflanır. Ancak bu dört grup çok iyi tanımlanamamakta ve gruplar arasında kaçınılmaz geçişler olmaktadır. Yine de asfalt çimentosunun kimyasal yapısından yola çıkılarak bitüm reolojisi saptanabilir. Asfalt çimentosu fraksiyonları, solvent ekstraksiyon, kromatografi, adsorbsiyon moleküler destilasyon yöntemleri ile saptanır [86].

Plentte karışım sırasında ve servis koşullarına maruz kaldıktan sonra ortaya çıkacak yaşlanmaya karşı mukavemetin nasıl tanımlanacağı ve bitüm sertleşmesinin etkileri de günümüzde halen araştırılmaktadır [87].

Isıl değişikliklere, havaya, neme, ışığa maruz kalan bitümlü bağlayıcıların mühendislik özelliklerinde değişiklikler olur. Bu durumlar, bitümlü bağlayıcının sertleşmesine neden olur. Bitümlü bağlayıcının sertleşmesinin, aşağıda sıralanan birbirinden ayrı reaksiyonlar şeklinde gerçekleştiği görülmektedir.

- Oksidasyon (elektron kaybını içeren süreç, sıklıkla oksijen kazanımı ama hidrojen kaybı)
- Uçarlık (Volatilization) (daha hafif bileşiklerin kaybı)
- Tiksotropi (Thixotropy) (titreme veya diğer mekaniksel anlamdan kaynaklanan izotermal gel-sol dönüşümü)
- Sinerisis (Syneresis) (jel veya jel gibi maddelerden sıvının ayrılması)
- Polimerizasyon (tekrarlı yapısal ünitelerde geniş molekül formasyonunun oluşması)

Genelde, bağlayıcının servis koşulları altında sertleşmesi büyük oranda oksidasyona ve uçarlığa bağlanmaktadır. Tiksotropi, Sinerisis ve Polimerizasyon süreçlerinin daha düşük derecede etkiye sahip olduğuna inanılır.

1.5.2. Agregata

Bitümlü karışımların iki esas malzemesinden biri olan agreganın bir çok tanımı olmasına karşın, en geniş kapsamlı olanı; Kum, çakıl, kırmataş, cüruf ve diğer mineral bileşiklerin bağlayıcı bir ortamda, bitümlü bir karışım, portland çimentosu, harç, makadam, mastik vb. şekilde bir araya gelmelerine ve bu malzemelerin bağlayıcısız kullanılmak üzere (örneğin demir yollarında balast malzemesi gibi) bir araya getirilmiş şekline agregata denir. “Doğal” ve “Sunı” olmak üzere ikiye ayrılırlar.

Yol ve havaalanı esnek kaplamalarında kullanılan agregalar; granüler temel, alttemel tabakalarının tamamını, bitümlü sıcak karışımların ağırlıkça % 90 ile % 95’ini, hacimsel olarak ise % 80 ile % 85’ini oluşturmaktadır. Agregaların mineralojik, boyut, granülometri, biçim ve yüzey dokusu, porozite, yüzey alanı ve boşluk oranı gibi özellikleri esnek kaplamanın her bir tabakası için ayrı ayrı önem kazanmaktadır. Agregaları boyutları açısından; kaba agregata 4,76 mm elek üzerinde kalan, ince agregata 4,76 mm ile 0,075 mm elek arasında kalan, mineral filler 0,075 mm’den geçen olarak üç grupta incelenir [88].

Mineral filler, toplam agreganın çok küçük yüzdesini teşkil etmesine rağmen karışımın özelliklerinin düzeltilmesindeki etkileri çok önemlidir. Genellikle mineral filler agreganın 0.075 mm’lik eleği geçen kısmı olarak tanımlanır. Ancak 0.075 mm’den daha ince olan bütün malzemeler filler görevi görmezler. Mineral fillerin 0.075 mm’yi geçen kısmı düzgün bir granülometrik bileşime sahip olmalı ve aynı zamanda 0.001 mm’den daha ince boyuttaki daneleri dahi içermelidir. Granülometrik bileşim mineral filler için

önemli bir özelliktir. Her ne kadar 0.075 mm'lik eleği geçen malzemeler olarak tanımlanırsa vda bu konuda konulan şartnamelerde üst sınır genellikle 0.600 mm'den başlar. Dane biçimi de mineral fillerin etkenliğinde önemli rol oynar. Köşeli daneler yassı, uzun ve düz danelere tercih edilir. Bu arzu edilmeyen biçimdeki danelerin yüzdesinin artması fillerin niteliğini düşürür. Filler kimyasal bakımdan atıl olmalı, yani bitümlü malzeme ile reaksiyona girmemelidir. Ayrıca bitümlü karışımın yapıldığı sıcaklıkta bir değişime uğramamalı, bağlayıcıya karşı iyi bir yüzey adezyonu göstermelidir. Kalker tozu, portland çimentosu ve silisli malzeme tozu çokça kullanılan mineral fillerden bazılarıdır [89].

Esnek üstyapıların yapısal ve fonksiyonel gereksinimleri yerine getirebilmesi için agregaların aşağıdaki şartları sağlaması gereklidir.

- 1) Yeterince içsel sürtünme direncine ve stabiliteye sahip olarak trafik yüklerini zemine yayabilmesi ve yük altında aşırı ve kalıcı deformasyonlar oluşturmaması,
- 2) İklimsel ve çevresel etkilerin aşındırmasına karşı dirençli olması,
- 3) Statik ve dinamik yükler karşısında kırılma/parçalanmalara karşı dirençli olması,
- 4) İç gerilmelere (genleşme, büzülme, ıslanma/kuruma, donma/çözülme, vb.) karşı dirençli olması,
- 5) Bağlayıcı (bitüm veya çimento) ile güçlü adezyon yapması
- 6) Yüzey tabakalarında kullanıldığında kayma direnci (veya sürtünme direnci), pürüzlülük, ışık yansıtması, teker aşındırması, gürültü, görünüm, vb. özelliklerin olumlu olması.

Temel ve alttemel tabakalarında kullanılan agregaların; kaplamadan gelen yüklerin zemine iletilmesi, drenajı sağlaması, çevre ve trafik etkilerine karşı dayanıklı ve stabil olabilmesi için agregaların aşağıdaki özellikleri önemli bir yer tutar.

Granülometri-Yoğunluk: Granülometri, temel ve alttemel tabakalarından beklenen yüksek stabilite ve yüksek dren kabiliyetinin yerine getirilmesini sağlayan en önemli faktördür. Asfaly kaplamalar trafik yükü altında hem yoğun hem de dren kabiliyeti yüksek olan optimum bir granülometri sayesinde uzun süre hizmet verebilir.

Dayanıklılık (durabilite yani dane mukavemeti): Agregalar sıkıştırma esnasında ve trafik yükleri altında kırılmaya, parçalanmaya karşı dirençli olmalıdır.

Dane şekli, yüzey yapısı, kırılmışlık oranı: Açısız kenarlı ve kübik şekilli kırmataş agregaların içsel kilitleme özelliği, yoğun granülometri agregaların stabilitelerinin artmasında en önemli faktördür. Bu nedenle bitümlü karışımlar için mutlaka kırmataş

agrega kullanılmalıdır. Yassı ve ince uzun daneler hem stabilite hem de segregasyon açısından problem yaratmaktadırlar.

Plastisite: İnce malzemenin miktarı arttıkça geçirimsizlik azalmakta ve don duyarlılığı artmaktadır. İnce malzemenin PI ve LL değerleri ne kadar yüksek olursa dren kabiliyeti azalırken dona karşı hassas olma durumu o kadar artacaktır.

Permeabilite (geçirgenlik): Temel ve alttemel tabakalarının permeabilite karakteristiği; granülometri ve yoğunluk, kaba agreganın tipi ve dane şekli, No.100 ve 200'den geçen kısmın miktarı ve PI değeri gibi özelliklere bağlıdır. İyi derecelenmiş yoğun granülometrilili agregalar maksimum yoğunluğa kadar sıkıştırıldıklarında oldukça geçirimsizdir.

Porozite: Porozitenin artmasıyla agrega bitüm adezyonunda artmaktadır. Ancak porozitenin %2-2,5'dan daha fazla olması halinde adezyonu artırmadığı gibi karışım için bitümlü bağlayıcı ihtiyacını artırmaktadır. Asfalt bağlayıcının artması ekonomik olmadığı gibi terleme-kusma riskinin artmasına neden olarak sürüş güvenliğini tehlikeye sokmaktadır. Bu nedenle poroz olmayan veya çok poroz olan agregalar bitümlü bağlayıcılı tabakalarda kullanılmamalıdır.

Yüzey Dokusu: Yüzey dokusu bitümlü bağlayıcı ile agrega arasındaki adezyona etki eden önemli bir faktördür. Cilalı yüzeyli agregaların asfaltla kaplanması kolay olmakla beraber adezyonu zayıf olduğundan dolayı kolaylıkla soyulmaktadır. Bu nedenle bitümlü bağlayıcılı karışımlarda pürüzlü yüzeyli agregalar ile hem yüksek stabilite hem de yüksek soyulma direnci elde edilir.

Cıllanma Direnci: Özellikle aşınma tabakasında kullanılan agregaların trafiğin aşındırma etkisi ile dane yüzey pürüzlülüğü giderek cilalı bir hal almakta ve kaplamanın sürtünme direnci azalarak sürüş güvenliğini tehlikeye sokmaktadır. Bu nedenle aşınma tabakasında kullanılacak agregalar, sağlam ve dayanıklı olduğu kadar cıllanmaya karşıda dirençli olmalıdır.

Agregaların bahsedilen bu özelliklerini bulmak için Tablo 6.'da belirtilen deneyler yapılır.

Tablo 6. Agregalara uygulanan deneyler

Deney Adı	Standart
Yüzey Nemi Oranı	(TS 3523)
Özgül Ağırlık ve su emme oranı	(TS EN 1097-6)
Hafif madde oranı	(TS 3528)
Don dayanaklık tayini	(TS EN 1367-1)
Organik madde tayini	(TS EN 1744-1)
Aşınma (Los Angeles) direnci	(TS 3694)
Dane boyutu dağılımı	(TS 1900-1)
Yassılık indeksi	(BS 812)
Cilalanma	(BS 812)
Soyulma ve Yapıştırma deneyi	(KTŞ)

1.5.2.1. Agreganın Adezyon Yönlü Özellikleri

Agrega özellikleri, agregayı oluşturan parçacıkların ve bu parçacıkları çevreleyen maddenin bir fonksiyonu olarak değişiklik gösterirler. Uygun agreganın seçimi için minerallerin kimyasal bileşimleri ve ayrışma durumları bilinmelidir. Karayolu inşaatında kullanılacak agregalar temiz, sert ve dayanıklı olmalıdır. Yol agregalarının yüksek nitelikli dokusal özelliklere sahip olması ve özellikle kaplama tabakasında cilalanmaya karşı dirençli olması gerekir.

Bazen yüksek silis ihtiva eden hidrofilik (su seven) agregaların soyulma eğiliminde oldukları ve bazen de hidrofobik (su sevmeyen) ya da düşük silika ihtiva eden veya etmeyen agregaların da soyulmadığı konusunda yaygın bir inanç vardır. Bununla birlikte, pratik tecrübeler göstermiştir ki, bütün koşullarda suyun etkisine karşı tam direnç gösteren birkaç agreganın bulunabilmiştir. Silisli agregalar, birçok alanda başarıyla kullanılabilir. Ancak karışım tasarımına, karışım özelliklerine ve yapım pratiğine özel önem verilmelidir. Kural olarak, hidrofobik karbonat kayaçları kullanmak daha emniyetli olarak düşünülür. Buna karşılık trafik altında cilalanma durumu özel olarak düşünülmelidir [90].

Esnek üstyapıların üst tabakalarında kullanılan bitümlü bağlayıcı sıcak karışım esnek üstyapının stabilitesinden önemli ölçüde, performansından ise tamamen sorumludur. Bitümlü sıcak karışımlar; agreganın ile bitümlü bağlayıcının karıştırılmasından elde edildiğinden heterojen bir malzemedir. Agreganın ve asfaltın davranışlarına bağlı olsa da kendine has bir takım özellikleri vardır. Bitümlü sıcak karışımların özellikleri iyi bilinmediği takdirde sağlıklı bir kaplama tasarımı yapılamaz. Bu özellikleri; stabilite,

rijitlik, dayanıklılık, yorulmaya karşı direnç, esneklik, geçirimsizlik, kayma direnci ve işlenebilirlik olarak sıralayabiliriz [91].

Stabilite: Deformasyonlara karşı gösterilen dirençtir. Stabilite ne kadar düşük olursa teker izi oluşu ve ondülasyon tipi kusurlar oluşmakta, fakat stabilitenin çok fazla olması halinde de aşırı rijitlik göstermekte ve düşük durabiliteli olmaktadır.

Rijitlik: Bitümlü sıcak karışımlar viskoelastik özelliklerinden dolayı elastikiyet modülü yerine rijitlik modülü ile anılmaktadır. Bitümlü karışımların rijitlik modülleri aşağıdaki durumlarda artış gösterir.

- a) Yükleme süresi artıkça,
- b) Isı azaldıkça,
- c) Yoğunluk artıkça,
- d) Bitümün penetrasyonu azaldıkça,
- e) Optimuma kadar bitüm içeriği artıkça önemli ölçüde artmaktadır.

Dayanıklılık (Durabilite): Bitümlü kaplamaların durabilitesi, trafik ve çevre etkilerinin aşındırmasına direnç göstermesidir. Örneğin; asfaltın yaşlanması, agreganın aşınması ve kırılması, asfaltın soyulması, vb. etkilere asfalt kaplamalar dayanıklı olmalıdır.

Yorulmaya karşı direnç: Asfalt kaplamaların yorulmaya karşı direnci trafik yükleri altında tekerrür eden eğilmeden dolayı çatlamalara karşı gösterdiği dirençtir.

Esneklik: Bitümlü kaplamaların esnekliği çatlamadan eğilebilme ve uzun dönemli oturmalarda çökmelere uyum sağlayabilme yeteneğidir.

Geçirimsizlik: Bitümlü kaplamaların içine veya içinde su ve havanın geçişinin önlenmesini geçirimsizlik özelliği sağlar.

Kaymaya karşı direnç: Aşınma tabakasının kayma direnci sürüş emniyeti için en önemli faktördür. Kayma direnci genel olarak;

- a) Düşük bitüm içeriği,
- b) Cilalanma direnci yüksek agrega,
- c) Pürüzlü yüzeyli kırmataş agrega,
- d) Nispeten açık ve kaba granülometrilili karışım ile artar.

İşlenebilirlik: Bitümlü karışımların işlenebilirliği serim ve sıkıştırma kolaylığını ifade eder. Çok kaba agrega içeren karışımlar serim anında segregasyon ve sıkıştırmada güçlük yaratırken, çok fazla filler içeren bitüm karışımların da sıkıştırılması zordur.

Diğer yandan agregalar, alkalın tipleri kireçtaşı ve mermer, asidik granit ve kuvarsit olmak üzere alkalın ve asidik diye de sınıflandırılmaktadır. Özellikle asfalt emülsiyonu karışımlar açısından bu sınıflandırma çok daha büyük bir öneme sahiptir. Bilindiği gibi asfalt emülsiyonları, emülsiyon küreciklerini kaplayan emülgatör tipine (pozitif veya negatif yüklü) göre anyonik ve katyonik olarak sınıflandırılırlar [91].

Tablo 7. Bitümlü sıcak karışımların özelliklerine etki eden parametreler [92].

Karışım Özelliği	BAĞLAYICI				AGREGA			
	Miktar		Katılık		Yoğunluk		Agrega Tipi	
	Fazla	Az	Katı	Yumuşak	Çok Yoğun	Az Yoğun	Köşeli Pürüzlü Poroz	Yuvarlak Cilalı Az Poroz
Stabilite	Optimum		*		*		*	
Rijitlik	*		*		*		*	
Dayanıklılık	*		*		*		*	
Yorulma Muk.	*			*	*		*	
Esneklik	*			*		*		*
Geçirimsizlik	*		*		*			*
Kayma Direnci		*	*			*	*	
İşlenebilirlik		*		*		*		*
Karışım Özelliği	SIKIŞMA		ISI		YÜKLEME HIZI		KARIŞIM KALINLIĞI	
	Çok	Az	Çok	Az	Yüksek	Düşük	Çok	Az
Stabilite	*			*	*		*	
Rijitlik	*			*	*		*	
Dayanıklılık	*			*	*		*	
Yorulma Muk.	*		*		*		*	
Esneklik		*	*					*
Geçirimsizlik	*			*			*	
Kayma Direnci	*			*				
İşlenebilirlik			*					*

1.5.3. Katkı Maddeleri

Günümüzde birçok değişik madde asfalt katkıları ve modifiyeleri olarak değerlendirilmekte. Tüm bu maddelerin kullanılmasının amacı, bitümlü bağlayıcı ve karışımların davranışlarının iyileştirilmesidir.

Bitümlü bağlayıcıların ve karışımların modifiye edilmesi yeni bir konu olmayıp özellikle son yıllarda bu konudaki çalışmalar yoğunluk kazanmıştır. Bu durumun ana nedeni, petrol rafinerilerinin ham petrolü elde etme ve işleme aşamalarındaki değişimlerdir, 1973 yılındaki petrol ambargosunun sonrasında geleneksel kaynaklar değişmiş, tek bir hammadde kaynağına bağlı olan birçok rafineri birden fazla kaynaktan gelecek ham petrolü işlemek zorunluluğuyla karşı karşıya kalmıştır. Bu değişimler üst yapı karışımlarında kullanılacak asfalt çimentosunda aranan niteliklerin karşılanmasını zorlaştırmıştır. Bu durum, asfalt çimentosunun modifiye edilerek istenilen niteliklere ulaştırılması için zorlayıcı olmuştur.

Kimi ülkelerde asfalt yapan yüklenici firmadan işleyiş garantisi istenmektedir. Bu durumda da modifiye kullanımı ilk yapım masraflarında göreceli bir artışa neden olmaktadır. Ancak işleyişin artmasını ve uzun dönemde maliyetin düşmesini sağlayacağı düşünülmektedir.

Bitümlü bağlayıcı ve karışımların modifiye edilmesine karşı duyulan ilginin artmasında etkili olan başka hususlar şöyle sıralanabilir:

1. Ham petrol ve bitüm fiyatlarında her zaman artış tehlikesi vardır.
2. Yüksek maliyetler daha ince kaplamaların inşaatı eğilimini doğurmuş, bu durumda da hizmet ömürlerinde düşüşler görülmüştür.
3. Trafik yüklerinde önemli artışlar oluşmuştur.
4. Kaynak sıkıntıları nedeniyle gerekli onarımların zamanında yapılamaması durumuyla oldukça sık karşılaşılmıştır.
5. Yakıt dökülmeleri gibi özel durumlara karşı dayanımın artırılması gereksinimleri olmuştur.
6. Kimi endüstriyel atıkların ortadan kaldırılabilmesi yada başka bir yere nakledilmesi konusunda oluşan çevreci ve ekonomik baskılar sonucu bu atıkların bitüm katkı maddesi olarak kullanılması düşüncesine neden olmuştur.
7. İnşaat ekipmanlarındaki gelişme, katkı kullanılması olanağını sağlayabilecek düzeye ulaşmıştır.

Bu ve bunun gibi hususlarla, dünyada modifiye bitüme olan ilginin artmasına paralel olarak, değişik iklim ve coğrafya koşullarının bulunduğu bölgelere sahip olan ülkemizde de bu konuda çalışmalar yapılmaktadır.

1.5.3.1. Katkı Maddelerinin Kullanım Yöntemleri

Modifikasyon işlemi genel olarak iki türlü yapılabilmektedir. Bunlar:

- 1- Katkı maddesi bitüme katılarak, “modifiye bitüm” elde edilir.
- 2- Katkı maddesi, asfalt plentinde doğrudan doğruya karışıma katılarak, ”modifiye karışım” elde edilir.

Bitümün modifikasyonunda, modifiye bitüm çeşitli standart test yöntemleri uygulanarak bitüm özelliklerindeki değişimlerin belirlenmesi mümkün olabilmektedir. Böylece, modifiye bitümün özelliklerinin belirlenmesi ve değerlendirmesi yapılabilmektedir. Ancak bitümün modifiye edilmesi yönteminde, bu işlem için genellikle ek ekipmanlar gerekmekte, hazırlanan modifiye bitümün depolanması, taşınması gibi sorunlar söz konusu olmaktadır.

Karışımın modifikasyonunda ise, katkı maddesi asfalt plentinde karışıma kalabildiğinden ek karıştırma ekipmanı gerekmemekte, depolama, taşıma v.s. gibi sorunlarla karşılaşılmamakta; ancak bu durumda da karışımdan modifiye bitümü çekerek özelliklerinin belirlenmesi ve değerlendirilmesi uygun olmamaktadır.

Bilindiği gibi bağlayıcı özelliklerin belirlenmesinde uygulanan test yöntemleri, karışım özelliklerinin belirlenmesinde uygulanan test yöntemlerine göre daha uygun ve daha kısa sürelerde yapılabilmektedir. Karışıma yönelik testlerde, daha uzun sürelerle, daha fazla işlemlere ve daha kapsamlı test ekipmanlarına gereksinim duyulmakla birlikte üstyapı işleyişinin belirlenmesi ve değerlendirilmesinde daha temsili olmaktadır. Ancak ülkemizde konuyla ilgili kurumlardaki laboratuvarlarda karışımlara yönelik test olanaklarının gelişmiş ülkelerdekine göre düşük bir düzeyde olduğu bilinmektedir. Karışıma yönelik test olanaklarının ülkemize transfer edilmesiyle gerek klasik üstyapı karışımlarının işleyişlerinin daha sağlıklı bir biçimde belirlenmesi bakımından, gerekse bu karışımların iyileştirilmesi amacıyla kullanılacak katkı maddelerinin amacına uygun seçilmesiyle büyük yararlar sağlanacaktır.

1.5.3.2. Modifiye Bitümlerde Aranılan Özellikler

Modifikasyonda kullanılacak katkı maddelerinin ve modifiye bitümlerin uygulamada etkili, uygun ve ekonomik olması bakımından bir takım koşulları sağlaması gerekmektedir:

Bitüm katkı maddelerinde aranılan özellikler Katkı maddelerinin şu koşulları sağlaması istenir;

- 1- Kolay elde edilebilmelidirler,
- 2- Asfalt karışım sıcaklığında özelliklerini kaybetmemelidir,
- 3- Asfaltla homojen olarak karışabilmelidirler,
- 4- Asfaltın yüksek karıştırma ve serme sıcaklıklarında, çok fazla viskoz hale getirmeden, yüksek yol sıcaklıklarında akışkanlığa karşı dirençlerini arttırmalıdır,
- 5- Düşük sıcaklıklarda asfaltın çok kırılgan ya da sert olmamasını sağlamalıdır,
- 6- Maliyetleri ekonomik olmalıdır.

Katkı maddelerinin bitümle karıştırılmasından sonra istenilen performansın alınabilmesi için ise şu özelliklere sahip olması istenir;

- 1- Depolama, uygulama ve hizmet sırasında sahip oldukları özelliklerini korumalıdır,
- 2- Uygun ekipmanla işlenebilirlik özelliğine sahip olmalıdırlar,
- 3- Depolama, uygulama ve hizmet sırasında fiziksel ve kimyasal olarak stabil olmalıdırlar,
- 4- Normal uygulama sıcaklıklarında püskürtülebilmek ve agregayı sarabilmek akışkanlığını sağlayabilmelidirler.

1.5.3.3. Bitüm Katkı Maddelerinin Sınıflandırılması

Bitüm katkı maddeleri çeşitli biçimlerde sınıflandırılmaktadır. Katkı maddesinin tipini, örneklerini ve katkı maddesinin bitüm kıvamına etkisini gösteren genel bir sınıflandırma Tablo 8.'de verilmiştir.

Tablo 8. Katkı maddelerinin genel sınıflandırılması [92].

TİP	ÖZELLİKLER	Modifiyerlerin Asfalt Çimentosunun Kıvamına Genel Etkisi
1- Filler	- Mineral Filler : Taş tozu Kireç Portland çimento Uçucu kül - Karbon siyahı - Sülfür	Sertleştirme
2- Uzatıcı (Extender)	- Sülfür - Lignin (Odun özü)	Sertleştirme
3- Kauçuk a) Doğal lateks b) Yapay lateks c) Blok copolymer d) İşlenmiş kauçuk	POLİMERLER	*
4-Plastik		Sertleştirme
5- Bileşim		*
6- Fiber	- Doğal : Asbest Taş yünü - Yapay : Polipropilen Polyester Fiberglas	Sertleştirme
7- Oksidan	Manganez tuzu	Sertleştirme
8- Antioksidan	- Kurşun karışımları - Karbon - Kalsiyum tuzu	Yumuşatma
9- Hidrokarbon	- Yeniden kullanma ve gençleştirme yağları - Sertleştirme ve doğal asfaltlar	Yumuşama Veya Setleştirme
10- Soyulma önleyici	- Aminler - Kireç	Yumuşatma

*Bazı malzemeler, sıcaklık sırasına bağlı olarak asfalt çimentosunu sertleştirir yada yumuşatır.

Üstyapı; alttemel, temel ve kaplama tabakaları olmak üzere üç ana tabakadan oluşan bir yapıya sahiptir ve kaplama tabakası ise trafik yüklerine ve çevresel şartların

olumsuz etkilerine doğrudan maruz kalmaktadır. Bu nedenle, üstyapının ömrünün uzatılması açısından kaplama tabakasında bağlayıcı olarak kullanılan bitümün bileşiminin ısıl değişikliklere, havaya, neme, güneş ışığına (oksidasyona) karşı dayanımının yüksek olması önemlidir. Bu etkilere karşı dayanımının artırılması için bitümün modifiye edilmesi çalışmaları oldukça önemlidir.

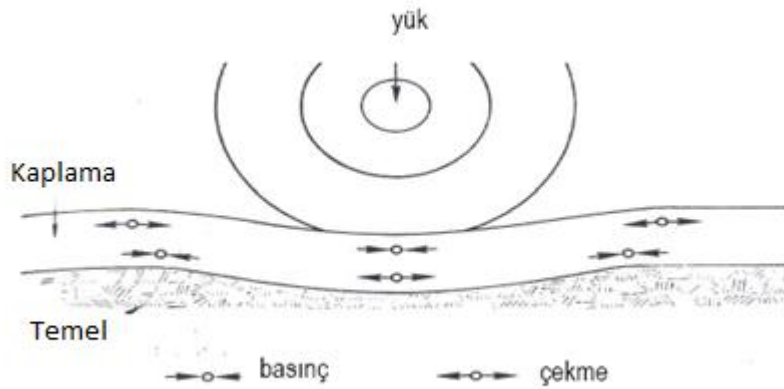
1.6. Asfalt Kaplamalarda Oluşan Bozulmalar

Bozulmaları bir yol üstyapısının tasarım süresi sonunda, trafik yüklemeleri ve çevresel etkileşim sonunda düşmesi beklenen hizmet yeteneğinin derecesi olarak tanımlayabiliriz. Esnek kaplamaların trafiğe açılmasından sonra tekerrür eden ağır trafik yüklerinin ve çevresel etkilerden dolayı bir takım bozulmalar oluşmaktadır.

Yol üstyapısında, meydana gelen gerilmeler, iki gruba ayrılabilir:

1. Trafik yüklerinin oluşturduğu gerilmeler,
2. Sıcaklık ve nemin (iklim koşullarının) değişiminden doğan gerilmeler [93].

Yolların, bu bozulma sürecinde, yüksek hız ve hacimde trafiğe hizmet edebilme yetenekleri ile sahip oldukları sürüş konforu değerlendirilerek, bir servis yeteneği indeksi kavramı geliştirilmiştir. Amerika Devlet Karayolu ve Taşımacılık Resmi Kurumu (AASHTO; American Association of State Highway and Transportation Officials) tarafından geliştirilen bu dereceleme, yol üzerinde yapılan bir dizi fiziksel ölçümler (tekerlek izi oluşumu, çatlak uzunluğu, yama miktarı vb.) yapılarak saptanır [94].



Şekil 6. Tekerlek yükünden dolayı oluşan çekme ve basınç gerilmeleri

Tekerlek izi önemli ve yaygın bir bozulma şeklidir. Genel olarak tüm üstyapıyı ve tüm yol gövdesini ilgilendiren bir bozulma şekli de defleksiyondur. Defleksiyonun belirlenmesi için tüm dünyada birbirinden farklı ölçüm cihazları kullanılmaktadır.

Bunlardan bazıları;

- Dynaflect Deflektometresi
- Yol Değerlendirici
- Dynatest Düşen Ağırlık Deflektometresi
- KVAB Düşen Ağırlık Deflektometresi
- Phoenix Düşen Ağırlık Deflektometresi

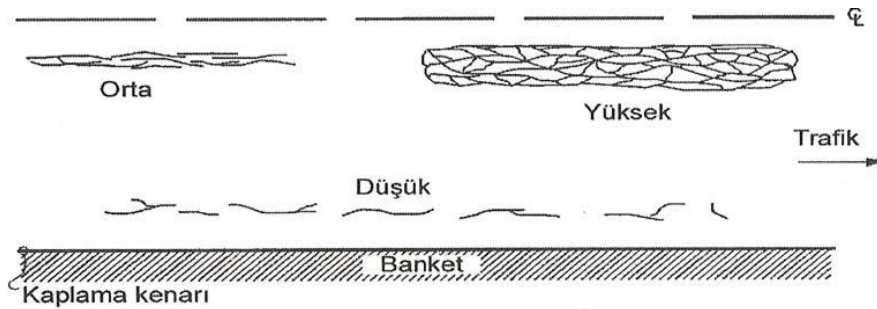
olarak sıralanabilir [95].

Defleksiyon ölçümleri sonucunda bulunan değerlerle birlikte, üst yapı malzemesi ve diğer parametreler kullanılarak, yolun bakıma gereksinimi olup olmadığına karar verilmektedir.

1.6.1. Yorulma Çatlakları (Timsah Sırtı Çatlaklar)

Yorulma çatlakları daha çok taşıtların tekerlek geçişleri dahilinde ortaya çıkar. Üstyapı eksenine paralel olup uzunlukları birkaç desimetre ile onlarca metre arasında değişir. İnce çatlaklar biçiminde başlayarak, zamanla tekrarlanmak suretiyle küçük bloklar serisi şeklinde birbirine bağlı timsah sırtı çatlaklara dönüşen çatlaklardır.

Yorulma çatlakları ağır trafik yüklerinin belirli bir tekerrürü sonucu kaplamanın yorulma mukavemetinin aşılması ile oluşmaktadır. Ayrıca; taban zemini, alttemel ve/veya temel tabakalarının yetersiz sıkışması ve/veya yetersiz drenajı nedeni ile taşıma gücü yetersizliği, uygun olmayan malzeme kullanımı, kötü yapım teknikleri, çevre ve iklim şartları (donma etkisi, nem değişiklikleri, vs.) gibi etkiler altında meydana gelir.



Şekil 7. Yorulma çatlakları (Timsah sırtı çatlaklar)

1.6.2. Teker İzinde Oturmalar (T.İ.O.)

Asfalt betonu kaplamalarında sık görülen, gerek teknik ve gerekse ekonomik açıdan çok önemli kabul edilen bozulma tipidir. Tekerlek izi oluşması ülkemiz gibi engebeli araziye sahip, trafiği ağır ve kısmen sıcak olan ülkelerde problem olmaktadır. Tekerlek izleri, kaplamanın altındaki bir ya da birden fazla tabakada, trafik tesirinin neden olduğu konsolidasyon ya da yanal hareketler veya trafik tesiriyle kaplamanın kendisinden oluşan yer değiştirmeler sonucu meydana gelebilir.



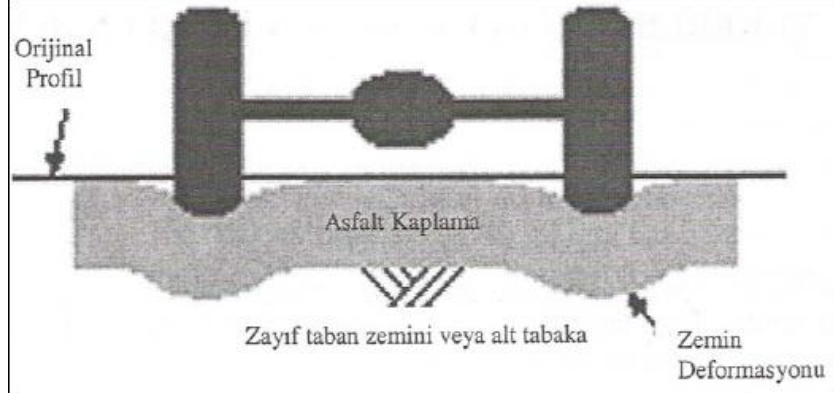
Şekil 8. Tekerlek izi oluşu

Tekerlek izi, ayrıca asfalt beton kaplamaların tekerleklerinin geçtiği kısımlarında oluşan uzunlamasına oturmalar olarak da tanımlanabilir. Çoğu üstyapı dizayn metodu için yapısal performansın değerlendirilmesinde temel kriterdir. Diğer tip kalıcı deformasyonlar üstesinden çok daha kolay gelinir olup, büyük ölçüde malzeme özelliklerine ya da malzemelerin üstyapı bünyesinde birbirlerine tesirlerine bağlıdır [96].

1.6.2.1. Tekerlek İzi Oluşum Şekilleri

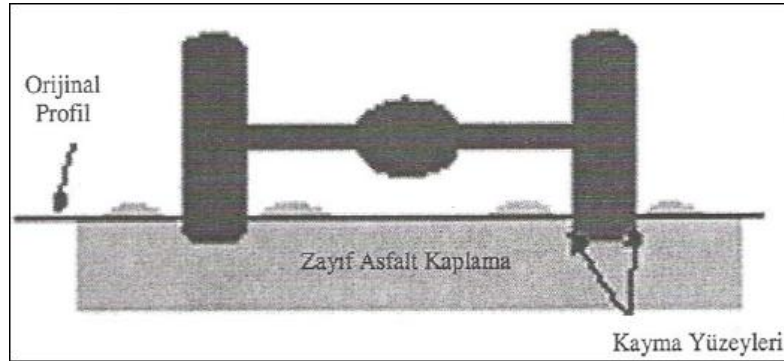
Yapısal tekerlek izi: Bitümlü tabakanın altındaki bir veya daha fazla tabakanın kendi içlerindeki deformasyonlarının sonucudur. Bunun nedeni, yükten dolayı oluşan gerilmelerin malzeme dayanımını aşmasıdır. Bu durumda tekerlek izinin etrafında kabarmalar oluşmaz. Bu tip tekerlek izi oluşumu genellikle gerçekteki trafik koşullarına

uygun tasarlanmamış üstyapılarda görülür. Uygun olmayan malzemenin kullanılması, malzemenin iyi sıkıştırılmaması da kaynaklanabilir [97].



Şekil 9. Yapısal tekerlek izi

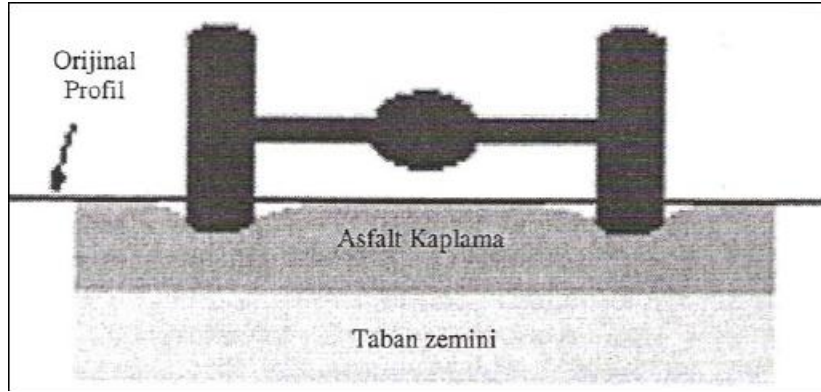
Akma tekerlek izi: Bitümlü tabaka veya tabakaların kendi içlerindeki deformasyonunun sonucudur. Bunun nedeni, yükten dolayı oluşan gerilmelerin bitümlü malzemenin stabilitesini aşmasıdır. Tekerlek izi etrafında kabarmalar oluşur. Akma tekerlek izi, en çok, çıkış eğimli kesimlerde, kavşak yaklaşımlarında ve kurlarda, yani ağır taşıtların hızlarını azalttığı kesimlerde ve lastik ile kaplama arasındaki değme alanında ortaya çıkan teğetsel gerilmelerin yüksek olduğu kesimlerde oluşur [97].



Şekil 10. Akma tekerlek izi

Konsolidasyon ve yüzeysel tekerlek izi: Kışın çivili tekerleklerin kullanılmasından dolayı kaplamanın en üst yüzeyinde oluşur. Özellikle, çivili lastiklerin kullanıldığı kuzeydeki ülkelerde görülmüştür. Hasarı görüldükten sonra bu lastiklerin kullanılması sınırlandırılmış veya yasaklanmıştır. Bu tip tekerlek izinde göz önüne alınacak parametre

agrega sertliğidir. Konsolidasyon nedeniyle oluşan tekerlek izi ise; kaplamanın yapımı sırasında yetersiz sıkıştırmadan dolayı oluşur. Yetersiz yoğunluğa sahip bir karışım özellikle sıcak havalarda, duran veya yavaş hareket eden trafiğin mevcut olduğu kavşaklarda trafik etkisiyle oturmaya meyillidir. Şekil 18.'de görüldüğü gibi tekerlek izi kenarlarında kabarma oluşmaz [97].



Şekil 11. Konsolidasyon ve yüzeysel tekerlek izi

1.6.2.2. Tekerlek İzi Tahmin Modelleri

Ağır taşıt trafiği, iz ve olukların oluşumundaki en önemli etkidir. Yüksek dingil yükü, yüksek lastik basıncı, yükün sık tekrarı ve yavaş seyreden hızdaki ağır araçlar olumsuz etkilerdir.

İz ve oluklar, aşağıdaki olumsuzlukların ortaya çıkmasına neden olurlar.

a. Suların toplanmasıyla, su yastığı oluşumu, kayma tehlikesinin artması ve soğuk havalarda ince buz tabakalarının oluşması,

Tekerlek izi oluşumu , yolu kullananlar için de ciddi bir güvenlik meselesidir. Su tekerlek izlerinde biriktiğinde, su yastığı olayı için potansiyel oluşturur. Su yastığı olayı, kaplama ile lastik arasında ince bir su tabakası oluşması ve bunun neticesinde lastiğin yüzeyle temasını kaybetmesidir. Bu olay direksiyon hakimiyetinin kaybedilmesiyle sonuçlanabilir. Aynı şekilde şerit değiştirme durumunda da aynı sorun yaşanabilmektedir [98].

b. Seyir konforunun düşmesiyle birlikte, şerit değiştirmek isteyen hızlı araçlar için tehlike oluşması.

Son yıllarda artan ağır taşıt trafiği ve dingil yüklerine bağlı olarak gerek şehir içlerinde gerekse şehirler arası yollarda tekerlek izi oluşumu ciddi bir problem olarak

ortaya çıkmaktadır. Bundan dolayı tekerlek izi oluşumu bozulma kriterleri arasında çok önemli bir yere sahiptir ve bu değerin belli bir limiti aşması durumunda yol bozulmuş olarak kabul edilir. Tekerlek izi oluşumuna karşı geliştirilen karışımların hizmet ömürleri doğrudan doğruya kaplamada oluşacak tekerlek izlerine bağlıdır. Bu yüzden karışımların tekrarlı yükler altında tekerlek izi oluşum miktarını gösteren bir model yardımıyla tahmin etmekle, karışımın hizmet ömrü ve servis düzeyi de ortaya çıkmaktadır. Tekerlek izi tahmini için yapılan bir çok araştırmada farklı tahmin modelleri geliştirilmiştir. Bunlardan bazıları aşağıda verilmiştir.

- Shell Modeli:

Shell modeli hizmet ömrü sonundaki trafiğin oluşturacağı tekerlek izini, karışımın sünme deneylerinden elde edilen rijitlik modülü ile bitümün rijitlik modülünü kullanarak tahmin etmeye çalışmaktadır [99].

Tekerlek izi tahmini, aynı zamanda bitümlü tabakanın kalınlığı, ortalama gerilme ve karışımın rijitlik modülüne bağlıdır. Yükün dinamik hareketinin temsili için 1 ile 2 arasında değişen bir katsayı kullanılmaktadır.

Burada tekerlek izi derinliği aşağıdaki formül ile hesaplanır;

$$\Delta h = C.h \frac{\sigma_{av}}{S_m} \quad (1)$$

C : Dinamik etki için düzeltme faktörü.

h : Bitümlü tabakanın kalınlığı.

σ_{av} : Standart dingil yükü altında oluşan ve sıcaklığa göre değişen gerilme.

S_m : Karışımın rijitlik modülü.

- Belçika Yol Araştırma Merkezi Modeli:

Burada tasarım ömrü boyunca geçecek trafik, standart dingil yüküne çevrilerek bulunmakta ve modelde en sıcak mevsim göz önüne alınmaktadır.

Tekerlek izi oluşumu ile hizmet ömrü veya diğer bir ifade ile geçecek taşıt sayısı arasındaki ilişki aynı zamanda temel tabakalarının kalınlığına da bağlıdır. Tablo 9.'da tahmin edilen tekerlek izi derinliği ile bu tekerlek izi oluşumu için geçecek ağır taşıt sayıları görülmektedir.

Tablo 9. Ağır taşıt trafik hacmine göre tahmin edilen tekerlek izi değerleri (mm) [99].

	Temel Kalınlığı (cm)	Ağır Taşıt Cinsinden Hizmet Ömrü			
		$N_c = 5 \times 10^4$	$N_c = 5 \times 10^5$	$N_c = 5 \times 10^6$	$N_c = 5 \times 10^7$
Esnek Üstyapı	10	8	10,3	10,8	13,6
	20	5,5	7,7	9	12,2
	40	3,8	5,5	6,4	8,8
Yarı Esnek Üstyapı	10	3,7	4,4	6,7	12,6
	20	2,8	3,7	5,6	8,7
	40	1,6	3,4	3,6	6,5

Tüm yol kesiti için kalıcı deformasyon aşağıdaki şekilde bulunmaktadır.

$$D = \sum \Delta h_i f_i (N) \quad (2)$$

Burada D; toplam kalıcı deformasyonu, Δh_i ; her tabaka için oluşan deformasyon olup, Odemark yaklaşım yöntemi veya elastik çoklu tabaka yöntemi ile hesap edilmektedir. Bu model için kullanılan ve malzemelerin ortalama mekanik özelliklerini gösteren değerler Tablo 10.'da görülmektedir.

Tablo 10. Tabakaların ortalama mekanik özellikleri (Belçika Modeli) [99].

Malzeme	f(N)	Modül (Mpa)
Bitümlü bağlayıcılı tabakalar	$4,49 N^{0,25}$	5000
Kırmataş temel	$h < 12 \text{ cm ise } 2N^{0,3}$ $h > 12 \text{ cm ise } 2N^{0,2}$	500
Granüler alttemel	$2N^{0,3}$	200
Yol tabanı	$1 + 0,7 \log N$	Parametre olarak 5,10,20,40

- Von Quintus Modeli :

Bu modelde kalıcı deformasyon aşağıda şekilde verilmektedir.

$$\text{Log } \varepsilon_p = \log A + m * \log N \quad (3)$$

ε_p = Kalıcı deformasyon

N = Tekrarlı yük adedi

A, m = Regresyon sabitleri

A ve m sabitleri statik sünme testinden bulunmuş ve aşağıdaki şekilde formüle edilmiştir.

$$A = a * (t_1)^{m_c} - \varepsilon_{rt} \quad (4)$$

$$m = \frac{\log a + 3,5563 * m_c + \log (1-x) - \log [a * (0,1)^{m_c} - \varepsilon_{rt}]}{4,5563} \quad (5)$$

m_c = Statik sünme eğrisinin doğru olduğu kesimdeki eğimi.

a = Sünme – zaman eğrisinin 1. saniyesindeki sünme deformasyonu miktarı.

t_1 = Yükleme süresi (sn) ε_{rt} = Tekrarlı sünme deneylerinde oluşan toplam geriye dönen deformasyon.

x = Geri dönme yeteneğidir [100].

- Zahw vd.’lerinin geliştirdiği Model:

Bu model, kaplamanın çekme ve kesme mukavemetlerine bağlı olarak geliştirilen bir yöntemdir.

$$\text{Tekerlek İzi} = 61,525 - 50,695 Ab - 0,0226 \text{ Visc} - 0,315 \text{ Comp} + 23,562 \text{ St} - 11,688 \text{ Ts} \quad (6)$$

Burada;

Ab : Kaba agreganın su absorpsiyonu,

Visc : Karışımda kullanılan asfalt çimentosunun kinematik viskozitesi (santistok),

Comp : Sıkıştırma enerjisi, darbe sayısı,

St : Uygulanan gerilme, Mpa,

Ts : Dolaylı çekme mukavemeti, Mpa., [101].

- Fernando, vd'lerinin geliştirdiği Model:

Burada;

Tekerlek izi derinliği : 279 x (kümülatif kesme deformasyonu) olarak verilmiştir. Burada deformasyon ölçümleri sabit yükseklikte tekrarlı basit kayma deneyinden (repetitive simple shear at constant height RSS-CH) bulunmuştur.

Yük tekrarına bağlı olarak yukarıda verilen tekerlek izi derinliği için bulunacak eşdeğer dingil yükü ise;

$$\log_{10} (\text{RSS} - \text{HT test yük tekrarı}) = -4,36 + 1,24 \log_{10} (\text{ESAL}) \quad (7)$$

olarak verilmektedir.

Burada ESAL, 8,2 ton eşdeğer dingil yükünü göstermektedir.

- Saraf vd'lerinin geliştirdiği Model:

152 mm'den daha az kalınlıktaki kaplamalarda;

$$\log \text{RR} = -5,617 + 4,343 \log d - 0,167 \log (N_{18}) - 1,118 \log \sigma_c \quad (8)$$

ve 152 mm'den daha fazla kalınlıklardaki kaplamalarda ise;

$$\log \text{RR} = -1,173 + 0,717 \log d - 0,658 \log (N_{18}) + 0,666 \log \sigma_c \quad (9)$$

formüllerini geliştirmiştir.

Burada;

RR : Tekerlek izi oranı = 25,4 nm (1×10^{-6} in) / tekerrür,

d : Yüzey defleksiyonu = 25,4 μm (1×10^{-3} in)

N_{18} : 8,2 tonluk (18.000 pound) dingil yükünü

σ_c : Düşey basınç gerilmesi = 6,9 kpa

Laboratuar testlerinin yanında, ivmelendirilmiş tam-ölçekli testlerden de söz edilmelidir. Dünyada yirmiden fazla tam-ölçekli test tesisleri bulunmakta olup, bunlara örnek olarak Nantes'daki LCPC [102] ve Zürich'teki IFT [103] dairesel test pistleri ile birlikte Washington D.C.'deki RHWA tarafından kullanılan Avustralya ALF tesisi sayılabilir. Bu tesisler, gerçek yollar gibi inşa edilmiş ve yüklenmiş tam ölçekli yol yapılarının test edilmesini mümkün kılmaktadır. Buradaki amaç genellikle farklı türlerdeki

malzemelerin performanslarının kıyaslanması veya çeşitli inşaat tekniklerinin ya da yükleme modellerinin etkilerinin analiz edilmesidir.

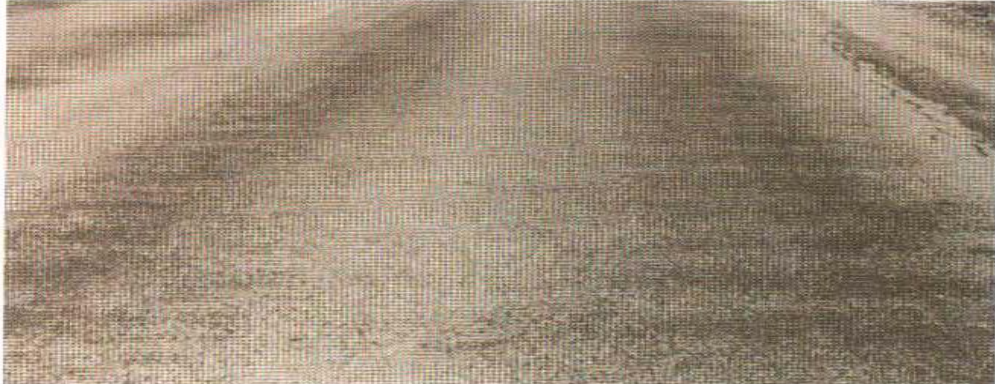
1.6.3. Deformasyonlar

Deformasyon tipi esnek kaplama kusurları; esnek kaplama tabakalarının kayma mukavemeti, karışım viskozluğu ve eylemsizlik direncinin (yani agregaların yer değiştirme direncinin) az olmasından kaynaklanmaktadır. Deformasyonlar sonucunda yol yüzeyinde, plan ve boy kesitindeki durumuna göre değişiklikler olmaktadır. Esnek kaplamada görülen deformasyon tipi kusurlar;

- a) Ondülasyonlar
- b) Bölgesel oturma, çökme ve kabarmalar olarak sayılabilir.

1.6.3.1. Ondülasyonlar

Ondülasyonlar, yol üzerinde trafiğin akışına göre enine doğrultuda oluşan ve aralıkları yaklaşık olarak eşit olan belirli biçimde dalgaya benzeyen satır deformasyonları olarak tanımlanırlar [104].



Şekil 12. Ondülasyonlar

1.6.3.2. Bölgesel Oturma, Çökme ve Kabarmalar

Oturmalar; kaplama altındaki malzemenin oturması sonucu oluşur. Oturmalar geniş bir yüzeyde meydana gelirse esnek kaplamada çatlamadan buna ayak uydurur. Eğer kaplama çok rijit ise oturmalarla ayak uyduramayıp çatlamalar oluşur [104].

Çökmeler: Yolun plan ve boy kesitine göre düşük kotta kalmış küçük çukurluklardır. Derinlikleri 2,5 cm ya da daha fazla olabilmekte ve yağmurlardan sonra içlerine su dolmaktadır. Çökmeler zamanla genişleyerek, yolun zamanından önce elden çıkmasına da neden olabilirler. Değişik çapta genişlikleri olabilir.

Kabarmalar: kaplama altındaki malzemenin kabarması sonucu oluşur. Yol yüzeyinin lokal olarak yukarıya doğru hareket etmesiyle oluşur. Oturma ve kabarmalar birlikte de görülebilir.



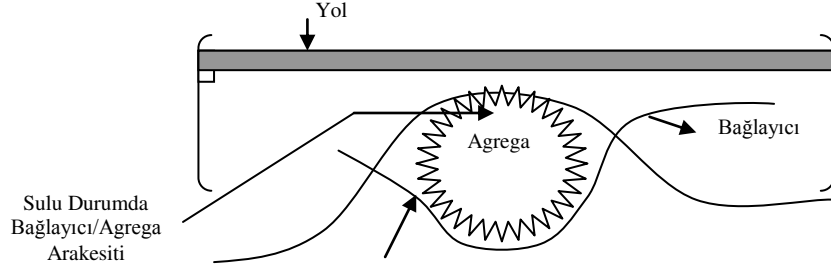
Şekil 13. Lokal oturmalar

1.6.4. Ayırışmalar

Ayırışmaları; segregasyon, sökölme, soyulma ve çukurlar olarak ayırabiliriz. Segregasyon, soyulma ve sökölme (yani yüzeysel kopma ve parçalanmalar) tipi kusurlar agregadan bitüm soyulması, trafiğin aşındırma etkisi ve aşınma tabakasının kalınlığı ile stabilitesinin az olmasından, yetersiz bitüm yüzdesinden, yaşlanma nedeniyle bitümün sertleşmesinden, bitümlü sıcak karışım içinde kil topraklarının ve kille kaplı agrega danelerinin bulunması, donma-çözölme olaylarının sık tekrarı gibi nedenlerden oluşmaktadır. Bu tip bozulmalar ilerleyerek çukurların oluşmasına neden olmaktadır.

Bu tip ayırışma, parçalanma ve kopmalar çeşitli şekillerde oluşmakta ve buna uygun olarak da değişik isimler almaktadırlar. Sökölme, çanak şekilli çukurlar, bağ eksikliği (adezyon yetersizliği) ve soyulma başlıca bozulma tipleridir.

Bitümlü bağlayıcı filmi ile agregata arasındaki adeziv bağın zayıflaması sonucu oluşan soyulma her iklimde karşılaşılabilen problemlerden biri olarak ortaya çıkmakta ve çeşitli durumlarda çok önem kazanmaktadır [104]. Soyulma birçok nedene bağlı olarak ortaya çıkabilir. Bunlardan “Suyun yer değiştirmesi” şeklinde nitelenen soyulma durumu Şekil 14.’de gösterilmektedir.



Şekil 14. Agregata yüzeyinde bağlayıcı ile suyun yer değiştirmesi

Soyulma probleminin boyutlarını azaltmak için kullanılan yöntemlerden biri; çeşitli soyulma önleyici katkıların karışıma veya bitüme karıştırılmasıdır. Ancak henüz agregata ile bitüm arasındaki adeziv bağın su etkisiyle bozulmasını açıklayan ve buna yönelik olarak kullanılan katkı maddelerinin etkinliğini tam olarak ortaya koyan ve inceleyen bir yöntem henüz geliştirilmiş değildir [105].

Bu tip bozulmaların genel nedenleri aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır.

- Mıcır danelerinin, trafiğin mekanik etkisiyle bitüm filminden ayrılması,
- Karışım kalitesinin düşüklüğü ya da sathi kaplamalarda, bitüm ve mıcırın uygun bir aşınma tabakası oluşturmamaları,
- Bitüm yüzdesinin düşüklüğü,
- Karışım tipi kaplamalarda, filler yüzdesinin çok düşük ya da çok yüksek oluşu,
- Kirli ve kalitesiz mıcır kullanılması,
- Kaplamanın asfalt betonu olması durumunda, bu tabakanın ince olması,
- Kil malzemesinin tabandan, alttemel ve temel malzemeleri içerisine doğru yükselmesi,
- Yetersiz drenaj,
- Sathi kaplama ve öteki bitüm tabakalarının soğuk ve yağışlı havalarda yapılarak adezyonun azalması,
- Sıcak karışım tipi sathi tabakalarının yapımında, karışımın plantte fazla ısıtılması,

- k. Asfalt betonunun kullanılması, karışımın serilmesi ya da nakliyesi sırasında ayrışım olması,
- l. Satın tabakasıyla öteki tabakalar arasında bağ eksikliği,
- m. Su ve kil etkisiyle soyulma.

Soyulma sebeplerinin en önemlilerinden biri olan ani emülsiyonlaşmadan kısaca bahsetmek gerekirse; Bu durum bitüm içinde suyun emülsifiye olma durumudur. Bitüm damlacıklar halinde dispersiyon enerjisi ve emülsif maddelerle su içersinde çözünür. Arazide karışım bünyesine su ile temas ettiğinde su küçük damlacıklar halinde emilir. Bu damlacıklar soyulma sürecini başlatır. Bu durum yumuşak bağlayıcı kullanıldığında ve su devamlı karışıma etkidiği durumlarda gerçekleşir. Soyulan kısımlar kurutulduğunda birleşme tekrar kısmi olarak sağlanır [106].

1.6.5. Çatlaklar

Karayolu esnek üstyapısı, alttemel, temel ve kaplama tabakalarından oluşan tabakalı bir sistemdir. Trafığın ve iklimin bozucu etkilerine doğrudan doğruya maruz kalan kaplama tabakası esnek üstyapılarda bitümlü karışımlardan yapılır. Kaplama tabakasının altındaki temel tabakası, bağlayıcısız ya da bir bağlayıcı ile işlem görmüş olan, belirli granülometrideki malzemeden oluşur. Temel tabakası; bağlayıcı olarak bitüm kullanılması durumunda bitümlü temel, çimento kullanılması durumunda ise çimentolu temel olarak isimlendirilmektedir. Alttemel ise belirli granülometrideki bağlayıcısız malzemeden oluşturulur [107].

Karayolu üstyapısında gerilmeler; trafik yükleri ve çevresel etkilerden dolayı oluşan değişimler sonucunda oluşmaktadır. Bu gerilmeler neticesinde üstyapı içerisinde çekme ve basınç gerilmeleri oluşmakta ve üstyapı bu gerilmelerin etkisi ile bozulmaktadır. Araştırmacılar yorgunluk olgusunu, asfaltlı sistemlerde çatlakların başlaması ve büyümesi olarak; yorgunluk ömrünü ise başlangıç sürecini kritik ölçülerdeki bir veya birkaç çatlağa çeviren tekrarlı yük devinimi olarak tarif etmişlerdir [108]. Ayrıca yorulma “Karışımın bozulmaksızın tekrarlı yüklere karşı koyma yeteneği” olarak da tanımlanmaktadır [109].

Yorulmada kopma, çok defa, yüksek gerilmeli veya iç bünyede hata bulunan bir noktadan başlar, yükleme ve boşaltmanın tekrarlanmasıyla bu gevşek yerde ilerler, yıpranma yavaş yavaş bütün kesite yayılır; cisimde, statik denemede olduğu gibi, büyük ve haber verici bir uzama ve bozulma görülmez. Yıpranma yeter derecede ilerledikten sonra,

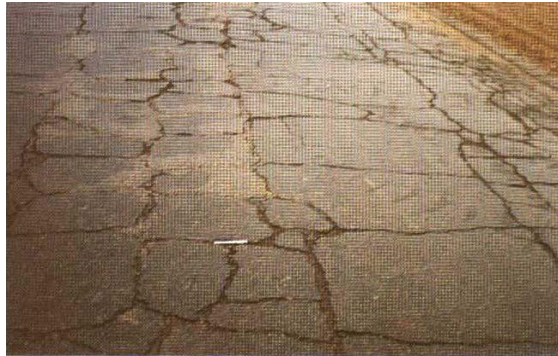
kesitin geri kalan kısmı, yükü taşıyamaz hale gelir ve birden bire kopma olur; son ayrılma gerilmenin statik mukavemetini aşması nedeniyle oluşur [110]

Yapı içerisinde etkiyen bu yüklerden dolayı gerilme ve deformasyonlar ortaya çıkmaktadır. Yapı malzemesi statik yük etkisi dışında oluşan dinamik yük etkisinden dolayı farklı şiddet ve tipte (basınç ve çekme) gerilmelere maruz kalmaktadır. Bu durum nedeniyle yapı malzemesinin herhangi bir kesitine ait bir noktada $\sigma_{\min}$ ile $\sigma_{\max}$ arasında değişen gerilmeler oluşmaktadır [111].

Esnek kaplamalarda görülen çatlaklar aşırı büzülme, aşırı sertleşme ve tabakalar arasındaki aşırı kaymadan kaynaklanmaktadır. Aşırı büzülme veya hacimce azalmadan kaynaklanan çatlaklar en fazla görülen esnek kaplama kusurlarıdır. Trafikğin etkisiyle ilgili olarak çatlaklar, tek veya bir çok dingil yükü geçişi ya da dingil yüklerinin aşırı tekrarı sonucu ortaya çıkar. Buna ilaveten, araçların ani hızlanma veya yavaşlamalarının yol açtığı yatay kuvvetler de çatlaklara neden olabilir. Trafikten başka sıcaklıktaki değişimler emici agregaların kullanımı, bitümlü bağlayıcıdaki uçucu madde buharlaşması, ayrıca nem miktarındaki değişimler, çimento veya kireç ile stabilize edilmiş tabakalarda kür esnasındaki hacim değişimleri (büzülme=rötre) gibi bazı dış etkenlerde çatlaklara yol açabilir. Etkenler tek başlarına veya trafik etkileri ile birleşerek üstyapının çatlamasına neden olabilir [112].

1.6.5.1. Stabilité (Blok)

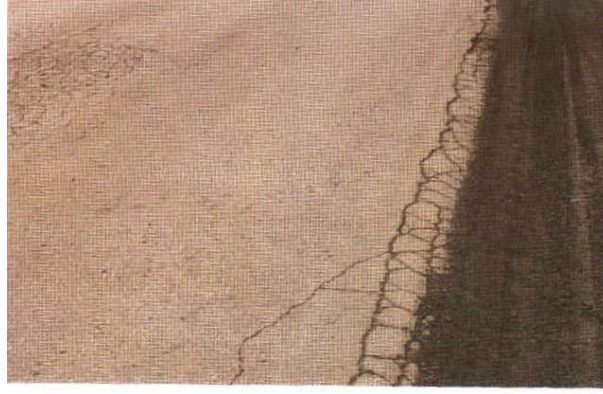
- a) Şişme ve büzülme etkisi
- b) Donma etkisi
- c) Asfalt kaplamanın yaşlanmasından dolayı sertleşmesi ve kırılmasından oluşur [113].



Şekil 15. Blok çatlaklar

1.6.5.2. Kenar Çatlakları

Kenar çatlakları, genellikle banketten sağladığı yanal destek yetersizliği nedeniyle kaplama kenarından yaklaşık 30 cm içeride oluşan boyuna çatlaklar ile banket arasındaki enine çatlaklardan meydana gelir. Diğer bir neden ise çatlayan kısmın altında bulunan malzemede oluşan oturma ve çökmedir. Üstyapı genişliğinin yetersiz olması nedeni ile trafiğin bankete yakın seyretmesi de oluşum nedeni olarak sayılabilir [113].



Şekil 16. Kenar çatlaklar

1.6.5.3. Boyuna Çatlaklar

Oluşma nedenleri:

- a) Dolgularda yetersiz sıkıştırma ve yetersiz drenaj nedeniyle oturma
- b) Dolgunun yanal hareketi, çevre ve iklim şartları (donma etkisi, nem, vs.)
- c) Üstyapının taşıma gücünün yetersiz oluşu ve bunun trafik yükü ile birleşmesiyle oluşan oturmalar boyuna ek yerlerinin uygun inşa edilmeyişi olarak sıralayabiliriz [113].



Şekil 17. Boyuna çatlaklar

1.6.5.4. Enine Çatlaklar

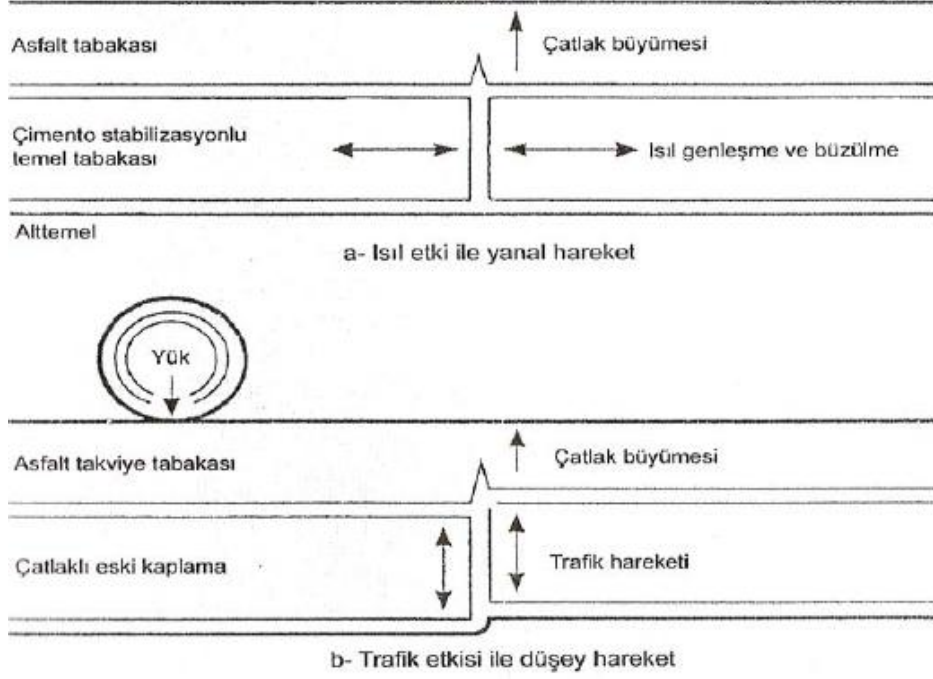
Oluşum nedenleri olarak; bitümlü kaplamada çok düşük sıcaklıklarda meydana gelen büzülme, tabanda don etkisi ve su içeriği değişikliği, alt tabakalarda daha önce oluşan çatlakların yüzeye yansması olarak sıralayabiliriz [113].



Şekil 18. Enine çatlaklar

1.6.5.5. Yansıma Çatlakları

Bozulmuş esnek kaplama üzerine asfalt takviye tabakası yapılacak olursa eski kaplamadaki çatlaklar zamanla takviye tabakasında görülmekte ve buna yansıma çatlağı adı verilmektedir. Yansıma çatlakları, yüzey dağılmasının kaynağı olabilirler. Takviye tabakası altında yer alan üstyapıdaki yatay ve düşey hareket nedeniyle oluşurlar. Eğer bozulmuş rijit (beton) kaplama üzerine Şekil 19.'da görüldüğü gibi asfalt takviye tabakası yapılırsa, beton kaplamanın derz yerlerinde takviye tabakasının çatlaması yansıma çatlağına bir örnektir [113].

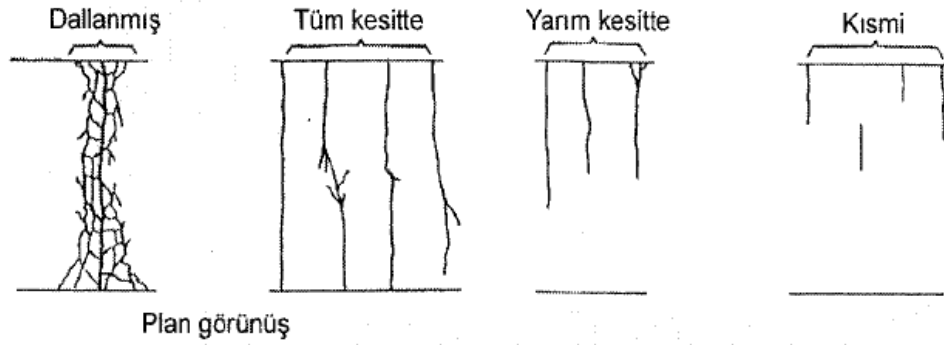


Şekil 19. Yansıma çatlağının oluşumu

Yansıma çatlakları altındaki çatlaklı tabakanın; ısı değişimi ile yanal hareketi , trafik yükleri ile düşey hareketi sonucu, üstteki yeni tabakanın alt kısmının da çatlamasına neden olmakta ve bu çatlaklar 45° ila 90° açı ile yukarı doğru artarak kaplama yüzeyinde görülmektedir.

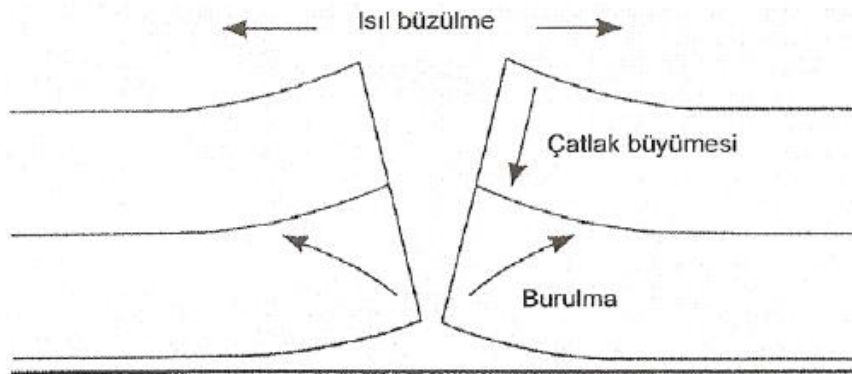
1.6.5.6. Düşük Sıcaklık Çatlakları

Düşük sıcaklık çatlakları soğuk havalarda asfalt kaplamanın büzülmesi ve bitümlü bağlayıcının çok rijit bir hal alarak ağır yükler altında gevrek davranışı ile oluşmaktadır. Enine büzülme çatlakları genellikle üniform aralıkta ve yol eksenine dik olarak görülmektedir. Düşük ısı çatlakları termal çatlaklar olarak da adlandırılabilir. Fakat enine büzülme çatlakları trafiğin etkisiyle oluşabilmektedir. Soğuk hava etkisi ile büzülen asfalt kaplamanın çekme mukavemeti aşıldığında düşük ısı çatlakları oluşmaktadır. Düşük ısı çatlakları yüzeyde kılcal çatlak şeklinde başlar ve soğuma tekrür sayısı ile ağır taşıt trafiğinin yoğunluğu ile zamanla derinliği artar. Şekil 20.'de düşük ısı çatlaklarının tipleri ve şiddeti görülmektedir.



Şekil 20. Düşük sıcaklık çatlakları şekilleri

Düşük sıcaklık çatlakları Şekil 20’de görüldüğü gibi soğuk havalarda üst kısımda aşırı büzülme ve alt kısımda daha az soğuk olması nedeniyle burulma oluşmaktadır. Bu durumda çatlaklar üst kısımda daha fazla açılmakta ve zamanla çatlak genişliği artarak derinleşir ve çatlak boyunca çatlakla dik dallanmış kılcal çatlaklar oluşmaktadır. Şekil 21’de düşük sıcaklık çatlaklarının büyüme aşaması şematik olarak belirtilmiştir.



Şekil 21. Düşük sıcaklık çatlaklarının büyüme aşaması

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Uygulanan Yöntem

Çalışmada; SMA kaplamalarda kullanılan SBS ve Elyaf türü katkı maddeleri ile Sönmüş kireç karşılaştırılırken, konuyla ilgili bundan önce yapılan çalışmalardan farklı olarak; Sönmüş kirecin hem tek başına hem de diğer katkılarla birlikte kaplama problemlerine nasıl bir etki göstereceği araştırılmıştır. Bu bağlamda 6 ayrı tasarım oluşturulmuş olup yöntem olarak;

- Rijitlik ve kalıcı deformasyon direnci,
- Isı ve yorulmadan dolayı oluşan gerilme direnci,
- Elastik davranış gösterebilme,
- Su hassasiyeti,
- Tekerlek izi oluşumu dayanımı

gibi performans derecelendirme kriterleri açısından sağlıklı sonuçların ortaya konabilmesi için aşağıda belirtilen 7 farklı deney gerçekleştirilmiştir.

- 1- Marshall Dizaynı ve Marshall Oranı
- 2- Bitüm Süzülme
- 3- Sudan Hasarı
- 4- Tekrarlı Sünme
- 5- Dolaylı Çekme
- 6- Dolaylı Çekme Mukavemeti
- 7- Tekerlek İzinde Oturma Tayini (Rutting)

2.2. Kullanılan Malzemeler

Bu bölümde, çalışmada kullanılan agrega ve asfalt çimentosu ile birlikte katkı maddeleri tanımlanmakta ve bunlara uygulanan deneyler yer almaktadır.

2.2.1. Agregalar

Tasarımlarda, Araklı-Dağbaşı yolu Km: 32+750'deki Sularbaşı Ocağının Bazalt

kısından (3/4-1/2)-(1/2-No:4) ve (No: 40) grubu agregalar ile BSK imalatı (Bitümlü temel-Binder-Aşınma) sırasında üretilen (No:40-No:200) arası filler malzemesi kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan agregaların özelliklerini belirlemek için Tablo 11.'de belirtilen deneyler yapılmıştır.

Tablo 11. Agregalara uygulanan deneyler

Agreganın Özellikleri		Değer
a.	Hava tesirlerine karşı dayanıklılık % kayıp	2,8
b.	Aşınma kaybı %'si	10,6
c.	Absorbsiyon %'si	0,85
d.	Yassılık indeksi	14,7
e.	Likid Limit	N.P.
f.	Soyulmaya karşı mukavemet (Katkısız)	30-35
g.	Soyulmaya karşı mukavemet ASG %0,4)	80-85

2.2.1.1. Granülometri ve Tolerans Sınırları

Kullanılan agregalara, KGM Teknik şartnamesinde SMA kaplamalar için belirtilen Tip-1 granülometrisini sağlamaya yönelik olarak elek analizi yapılmıştır. Şekil 22.'de elek analizi sırasındaki eleme işlemi görülmektedir.



Şekil 22. Agrega eleme işleminden görünüm

Sularbaşı Ocağından temin edilen agregalarla oluşturulan dane boyutu dağılımı Tablo 12.'de verilmiştir.

Tablo 12. Dane boyutu dağılımı

Elek Açıklığı mm.	İnch	(3/4"-1/2") % Geçen	(1/2"- No:4) % Geçen	(No:4-0) %Geçen	Filler
19,1	3/4	100	100	100	100
12,7	1/2	45,6	100	100	100
9,52	3/8	1,6	67,5	100	100
4,76	No: 4	0,5	2,8	100	100
2	No: 10	0	0,6	70,8	100
0,42	No: 40	0	0	30	100
0,177	No: 80	0	0	17,4	90,3
0,075	No:200	0	0	11,2	93,6

Dane boyutu dağılımı esas alınarak saptanan SMA karışımında Tip-1 'e uygun granülometri veren karışım oranları Tablo 13.'de belirtilen şekilde tespit edilmiştir.

Tablo 13. Agrega karışım oranları

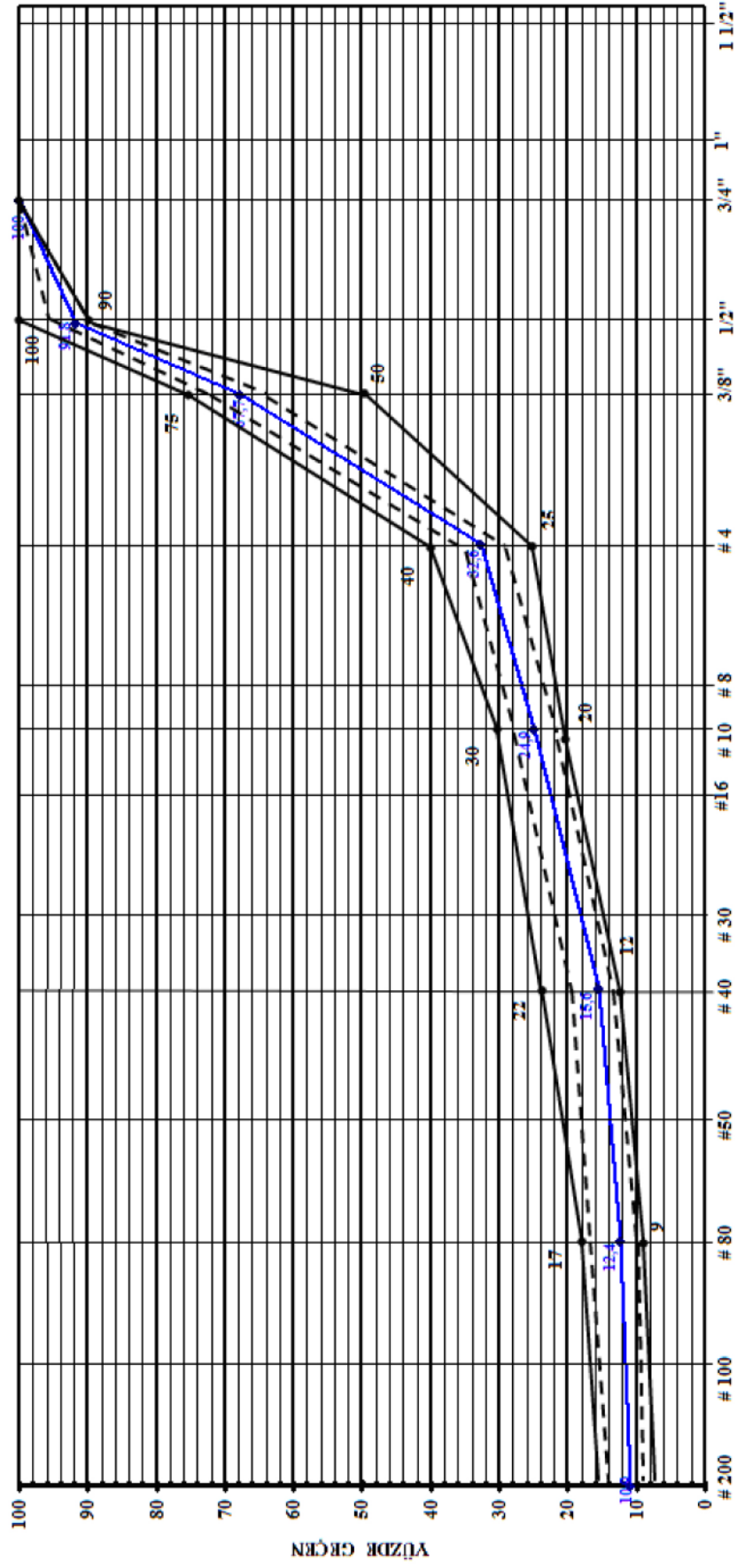
Elek Açıklığı (İnch)		Değer
(3/4"-1/2")	grubu agrega ağırlıkça	15%
(1/2"-No: 4)	grubu agrega ağırlıkça	54%
(No:4-0)	grubu agrega ağırlıkça	22%
(No:40-200)	grubu agrega ağırlıkça	9%

(3/4-1/2)-(1/2-No:4) ve (No 4-0) dane boyutunda üretilen üç grup agrega ile BSK imalatları sırasında üretilen filler (No:4-No: 200 arası) malzemelerine elek analizi yapılarak oluşturulan ortalamalar değerlendirilmiş olup tasarıma esas alınan dane boyutu dağılımı Tablo 14.'de, granülometri eğrisi ise Şekil 23.'de belirtilmektedir.

Tablo 14. Granülometri ve tolerans sınırları

Elek Açıklığı mm.	İnch	Karışım % Geçen	Tolerans Limitlerine %Geçen	Şartname Limitleri	
19,1	3/4	100	100-100	100	100
12,5	1/2	91,8	87,8-95,8	90	100
9,5	3/8	67,7	63,7-71,7	50	75
4,75	No: 4	32,6	29,6-35,6	25	40
2	No: 10	24,9	21,9-27,9	20	30
0,425	No: 40	15,6	12,6-18,6	12	22
0,18	No: 80	12,4	9,4-15,4	9	17
0,075	No:200	10,9	8,9-12,9	8	14

AGRAĞA KARIŞIM GRANÜLOMETRİSİ



Şekil 23. Granülometri eğrisi

2.2.2. Bitümlü Bağlayıcı

Bu çalışmada bitümlü bağlayıcı olarak Kırıkkale rafinerisi 50/70 penetrasyonlu bitüm kullanılmıştır. Bitümlü bağlayıcıya yapılan deneyler ve elde edilen değerler Tablo 15.'de belirtilmiştir.

Tablo 15. Asfalt çimentosuna uygulanan deneyler

Deney	Değer
Penetrasyon, 25 °C, 100 gr, 5 s (1/10 mm)	63
Birim Hacim Ağırlık (gr/cm ³)	1,025
Parlama Noktası (°C)	210
Düktilite, 25 °C, 5 cm/min	+100
Yumuşama Noktası (°C)	52

2.2.3. Katkı Maddeleri

Katkı maddelerinden çok yüksek molekül ağırlıklı uzun zincirli polimerler, farklı ölçütlere dayanılarak sınıflandırılmaktadır. Yöntemlerden birisi, polimerleri elastomerler ve plastomerler olarak iki genel kısımda incelemektedir. İki kısım arasındaki temel fark, deformasyona karşı direnç mekanizmalarıdır. Elastomerlerin yük-deformasyon davranışı, kauçuk (rubber) bandın davranışına benzemektedir. Şöyle ki, çekme gerilmesinin artmasıyla uzama artmakta, yükün kalkmasıyla başlangıçtaki durumuna dönebilmektedir. Diğer yandan, plastomerler yüksek erken dayanım oluşturmakta fakat daha az esnek ve yüksek şekil değiştirmelerde elastomerlerden daha kırılkan olmaktadır [114].

Yaptığımız deneylerde seçtiğimiz SMA granülometrisi göz önünde tutularak 3 farklı katkı malzemesi kullanılmıştır. Bunlardan esas olanı Sönmüş Kireç olup diğerleri kıyas amaçlıdır. Diğer katkı malzemeleri SBS (Kraton-D) ve Bitümlü Selülozik Elyaf (Viatop-66) olarak seçilmiştir.

2.2.3.1. Sönmüş Kireç

Kirecin hammaddesi olan kireçtaşı ve kalker, genellikle kalsiyum karbonat (CaCO₃)'dan oluşur. İçindeki kalsiyum karbonat oranını baz alarak yapılan klasifikasyona göre kireçtaşı cinsleri şöyle sıralanır:

1. Çok yüksek kalsiyumlu kireçtaşı (KT)	: CaCO_3 : min. %97
2. Yüksek kalsiyumlu KT	: CaCO_3 : min. %95
3. Yüksek karbonatlı KT	: $(\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3)$: min. %95
4. Kalsitik KT	: MgCO_3 . % 5
5. Magnezyumlu KT	: MgCO_3 . % 5-20
6. Dolomitik KT (Dolomit)	: MgCO_3 . % 20-40
7. Yüksek magnezyumlu dolomit	: MgCO_3 . % 20-46

Kireç, en az %90 CaCO_3 içeren kireçtaşının kireç fırınlarında 900-1000 °C'in üzerinde kalsinasyonu sonucunda kalsiyum oksite dönüşmesiyle elde edilir.



Kalsiyum oksidin yaygın olarak kullanılan adı sönmemiş kireçtir. Kalsiyum oksit, suyla reaksiyona sokulması sonucunda kalsiyum hidroksite veya ticari adıyla sönmüş kirece dönüşür:



Kirecin hammaddesi olan ve doğada bol miktarda bulunan kireçtaşı, karbonatlı tortul kayaç ve fosiller için kullanılan genel bir deyim olup, yapısında prensip olarak kalsiyum karbonat veya kalsiyum karbonat/magnezyum karbonat bileşikleri ($\text{CaCO}_3 / \text{MgCO}_3$) kombine halde bulunur. Bunun yanı sıra içinde değişik oranlarda demir, alüminyum, silisyum, kükürt gibi safsızlıklara da rastlanabilir. Dünya'da çok değişik formasyon ve tiplerde kireçtaşı mevcuttur. Bunlar orijin, jeolojik formasyon, minerolojik yapı, kristal yapısı, kimyasal bileşim, renk ve sertlik özelliklerine göre sınıflandırılır (Örneğin tebeşir, marn, traverten gibi). İçindeki MgCO_3 miktarının % 20-40 arasında olması durumunda ise kireçtaşı, rhombohedral yapıdaki dolomit: $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ adını alır.

Kalsiyum karbonatın iki ayrı kristal şekli, doğada hiçbir zaman saf halde bulunmayan Kalsit ve Aragonit'dir. Teorik olarak % 56 CaO ve % 44 CO_2 ihtiva ederler. Kalsitin rhombohedral yapıda ve sertliğinin 3 Mohs olmasına karşın, 400 °C'de kalsite dönüşen Aragonit'in kristal yapısı orthorhombik ve sertliği 3,5-4 Mohs'dur [115].

Kirecin:

- Birçok kimyasal prosesin (nötralizasyon, absorbsiyon, kostikleştirme, gibi) ana girdisi olması,
- Kimyasallarla çabuk reaksiyona girerek istenmeyen maddeleri bünyeden uzaklaştırılması,
- Pahalı kimyasalların geri kazanılmasındaki rolü,
- Organik canlılar için besi maddesi olması,
- Ucuzluğu ve kolay bulunması gibi nedenler, kirecin yaygın biçimde kullanılmasında önemli rol oynamıştır.

Kireç ürünleri:

- Portland çimento ve beton yapımında hammadde komponenti;
- İnşaat harç ve sıvalarında bağlayıcı;
- Demir-çelik endüstrisinde safsızlaştırıcı
- Gaz beton endüstrisinde bağlayıcı;
- Çevre denetiminde arıtma kimyasalı;
- Asitli toprakların rehabilitasyonunda pH dengeleyicisi;
- Çeşitli kimyasal maddelerin elde edilmesinde ara reaksiyon kimyasalı veya nihayi ürün komponenti;
- Yol zemin inşaatlarında stabilizatör ve asfalt yapımında aşınmaya karşı katkı maddesi olarak pek çok alanlarda kullanılır.

Kireç, uluslar arası standart sanayi tasnifinde (ISIN), 36 ana grup ve 3692 kod numarasıyla endüstride kullanılan esas kimyasal maddeler grubunda yer almakta olup GTIP kodu 25.22.0.00 ve 25.22.20.00'dir. Kireçtaşının doğal, tuvenan ve ayıklanmış haldeki uluslar arası sanayi tasnifindeki kodlaması aşağıda verilmektedir.

Tablo 16. Kireçtaşı uluslar arası standart sanayi sınıflaması

Kireçtaşı Uluslar arası Standart Sanayi sınıflaması (USS Rev 2) (Madencilik ve Taş ocağı işletmeciliği)		
Bölüm	Grup	Sınıf
29	290	290107 Kireçtaşı (Lime stone)
		29010701 Tuvenan (Burden)
		29010702 Ayıklanmış (Separated)

Tablo 17. Sönmüş kireç kimyasal analiz değerleri (SKK 80-T/Öztüre Kireç)

Özellikler	Deney Yöntemi	Oran (%)
Toplam CaO (%)	EN 459-2 Mad. 4.2.	85,78
Aktif Ca(OH) ₂ (%)	TS 32 Mad. 1.1.3.	82,04
MgO (%)	EN 459-2 Mad. 4.3	3,52
Toplam CaO+MgO (%)	TS	89,3
Kızdırma Kaybı (%)	En 459-2 Mad. 4.5.	22,51
Asitte Çözünmeyen (%)	TS 32 Mad. 1.1.5.	1,41
R ₂ O ₃ (%)	TS 32 Mad. 1.1.9.	0,47
SO ₃ (%)	EN 459-2 Mad. 4.6.	1,47
CO ₂ (%)	EN 459-2 Mad. 4.4.	3,89

Tablo 18. Sönmüş kireç fiziksel analiz değerleri (SKK 80-T/Öztüre Kireç)

Özellikler	Deney Yöntemi	Oran (%)
İncelik-90 mikron üzeri (%)	EN 459-2 Mad. 5.2.	6,0
Yoğunluk gr/dm ³	EN 459-2 Mad. 5.8.	472



Şekil 24. Sönmüş kireç (SKK-80T)

Kimyasal olarak, sönmüş kireç güçlü bir alkali malzemedir. Büyük oranda nötürleştirme gücüne sahiptir. Kireçteki kalsiyum; agrega yüzeyindeki hidrojen, sodyum ve potasyum ile yer değiştirir. Kalsiyumca zengin yüzeyler, uzun zincirli organik asitlerle tepkimeye girerek suya karşı dirençli (yalıtlmış) yüzeyler oluşturur. Genellikle, %1-2 oranında sönmüş kireç, doğrudan doğruya harç (slurry) formunda uygulanır [116].

2.2.3.2. Bitümlü Selülozik Elyaf (Viatop-66)

Bitümlü selülozik fiber olarak bir Alman firmasınca üretilen ve Almanya, Avrupa ülkeleri ve Amerika’da yaygın kullanımı olan “VIATOP 66” kullanılmıştır. Bunların genel adı fiber olarak geçmektedir. BSF’nin içindeki bitüm SMA karışımlarının içinde homojen bir şekilde topaklanmadan selülozun dağılmasını sağlar. Ayrıca selülozik fiber karışım içindeki bitümün süzülerek akmasını önler. Kullandığımız selülozik fiberin fiziksel ve kimyasal özellikleri aşağıda verilmiştir.

- Selüloz içeriği : % 66,7
- Bitüm içeriği : % 33,3
- Fiziksel Şekli : Silindirik topak
- Ortalama topak boyutu : 2-8 mm
- Ortalama topak kalınlığı : 4±1 mm
- Koku : Oldukça az
- Ateş alma sıcaklığı : yaklaşık 500 °C
- Patlama Limiti : Patlamaz
- Serbest Yoğunluk : 480-530 g/l
- Suda Çözünürlük : Çözünmez
- Elek Analizi : 3,55 mm’den ince kısmı maks. %5



Şekil 25. Viatop-66 (Bitümlü Selülozik Elyaf)

2.2.3.3. SBS (Kraton-D)

Karışımlara ilave edilen son katkı stiren-butadin-stiren (SBS) elastomeridir. Katılan polimer SBS blok kopolimeridir.

Termoplastik elastomer veya stirenik blok kopolimerler, Amerika Birleşik Devletlerinde kurulu Shell Firmasında çalışan Dr. N. Reginald Legge tarafından bulunmuştur. Stirenik kopolimerler SBS, SIS ve SE/BS olarak üç ana bölüme ayrılırlar. Burada bitüm ile en iyi bağ kurabilen SBS kopolimeri seçilmiştir.

Bitümün SBS ile modifiye edilmesi ile, bitüm üzerinde olumlu etkiler ortaya çıkmaktadır. Bunlardan bazıları, elastik geri dönme yeteneğinin artması, düşük sıcaklıklarda yüksek duktilite, çekme mukavemetinde artış, ısı hassasiyetinde azalma ve yorulma ömründe artma olarak sayılabilir.



Şekil 26. SBS (Stiren-Butadiyen- Stiren)

SBS ile modifiye edilmiş asfalt karışımları, normal bitümlü bağlayıcı karışımlara göre daha iyi performans göstermektedir. Özellikle plastik deformasyon ve yorulma çatlakları oluşumuna karşı gösterdikleri dirençten dolayı son yıllarda modifiye edilmiş bitümün kullanımında ciddi bir artış meydana gelmiştir.

2.3. Yapılan Deneyler

Bu 6 tasarımda üretilen SMA karışımların özelliklerinin belirlenmesi ve birbirleriyle kıyaslanması açısından çeşitli performans belirleyici deneyler yapılmıştır. Hazırladığımız SMA karışımlara uygulanan deneyler aşağıda sıralanmıştır.

- 1- Marshall Dizaynı ve Marshall Oranı Deneyi
- 2- Bitüm Süzülme Deneyi
- 3- Sudan Kaynaklanan Bozulmalara Karşı Direnç Deneyi
- 4- Tekrarlı Sünme Deneyi
- 5- Dolaylı Çekme Deneyi
- 6- Dolaylı Çekme Mukavemeti Deneyi
- 7- Tekerlek İzinde Oturma Tayini Deneyi (Rutting)

2.3.1. Marshall Yöntemine Göre Yapılan Deney ve Hesaplamalar

Bitümlü sıcak karışımların dizaynı için kullandığımız Marshall dizayn metodu SMA karışımların dizaynında da bir metod olarak kullanılabilir. Marshall metodu kavramı ilk olarak bitüm mühendisi Bruce Marshall tarafından formülize edilmiştir. Daha sonra “U.S. Corps of Engineers” (ABD istihkam sınıfı) kuruluşu tarafından çok geniş araştırma ve korelasyon çalışmalarıyla karışım dizayn kriterlerini geliştirmiştir. “American Society for Testing and Materials” Amerikan deney ve materyal topluluğu tarafından ASTM D 1559 Marshall test metodu adıyla standart hale getirilmiştir. Marshall test metodunun Türk standartlarındaki karşılığı TS 3720’ de verilmiştir. Bitümlü sıcak karışımların optimum bitüm içeriğinin belirlenmesinde kullanılan Marshall dizayn metodu sıkıştırma enerjisinde uygulanan bir miktar azaltmayla SMA karışımlar içinde kullanılır. Bitümlü sıcak karışımların dizaynı için sıkıştırılmasında 2 x 75 darbe kullanılırken, SMA karışımlarda 2 x 50 darbe kullanılır. Buradaki amaç Marshall tokmağı ile sıkıştırma enerjisi uygulanması sırasında SMA karışımındaki agregaların kırılarak granülometrinin bozulmamasıdır.

2.3.1.1. Marshall Dizayn Metodunun Yapılış Aşamaları

Marshall yöntemi, yalnızca maksimum boyutu 25 mm veya daha küçük agrega ihtiva eden ve penetrasyon veya viskozite ile sınıflandırılmış bitümlü bağlayıcı kullanılan sıcak karışım asfalt kaplama karışımlarına uygulanır. Metot sıcak karışım asfalt kaplamaların laboratuvar dizaynı için tasarlanmıştır. Marshall dizayn metodunda aşağıdaki aşamalar uygulanmıştır [117]

- 1) Agrega gruplarının granülometrisi ve kullanım oranları belirlendi.(kaba, orta, ince)
- 2) Karışım granülometrisinin şartname limitlerine uygunluğuna bakıldı.
- 3) Agrega özgül ağırlıkları hesaplandı.
- 4) Marshall briketleri düşükten büyüğe doğru artan bitüm yüzdelerinde ve uygun sıkıştırma, sıkıştırma sıcaklıklarında hazırlandı.
- 5) Hazırlanan briketler üzerinde yoğunluk, stabilite, akma, boşluk, VFA(asfaltla dolu boşluk), VMA(agregalar arası boşluk) hesapları yapıldı ve bitüm yüzdesi değişimine bağlı olarak grafikleri çizildi.
- 6) Optimum bitüm oranı hesaplandı ve optimum bitüm %’si değerinde yoğunluk, stabilite, akma, boşluk, VFA, VMA değerlerinin şartnameye uygunluğuna bakıldı.

Deneyisel çalışmalarda uyguladığımız Karayolları Teknik Şartnamesi (KTŞ) SMA Tip-1'in dizayn kriterleri Tablo 19.'da verilmiştir. Deneyin ayrıntılı tablosu "EKLER" bölümünde Ek Tablo 1. 'de verilmiştir.

Tablo 19. SMA Tip-1 dizayn kriterleri (KTŞ, 2006)

Özellikler	Şartname Limitleri
Briket Yapımında Uygulanacak Darbe Limitleri	50
Hava Boşlukları, (%)	2-4
Sıcak İklim Bölgelerinde hava boşlukları, (%)	3-4
Agregalar arası boşluk (VMA), (%), min. SMA Tip-1	16
Tekerlek izinde oturma *(30 000 devir, 60°C'de),(%), maks.	6
Elyaf miktarı, %	0,3-1,5
Schellenberger bitüm süzülme deneyi, (%), maks.	0,3

*Fransız NF P 98-253-1 deneyi ile tespit edilecektir.

KTŞ'ne uygun şekilde oluşturulan granülometri sonucunda karışım bünyesinde yer alacak olan agreganın kaba, ince ve filler cinsinden yüzde dağılımı Tablo 20.'de belirtilmektedir.

Tablo 20. Optimum bitümün saptanması için alınana yüzdeler

Agrega	Değer
Kaba Agregası Yüzdesi (No:4 üzeri)	67,4
İnce Agregası Yüzdesi (No:4-No:200 arası)	21,7
Filler Yüzdesi (No:200'den geçen)	10,9

Çalışmada kullanılacak agrega ve bitüme ait özgül ağırlık değerleri tespit edilmiş ve Tablo 21'de verilmiştir.

Tablo 21. Karışımdaki agregaların ve bitümün özgül ağırlıkları

Özgül ağırlıklar	Değer
Kaba agrega hacim özgül ağırlığı	2,770
Kaba agrega zahiri özgül ağırlığı	2,825
İnce agrega hacim özgül ağırlığı	2,735
İnce agrega zahiri özgül ağırlığı	2,770
Filler zahiri özgül ağırlığı (Kireçsiz)	2,730
Filler zahiri özgül ağırlığı (%1 Kireç katkılı)	2,720
Bitüm özgül ağırlığı	1,025



Şekil 27. Hazırlanan briketler ve slabların bir kısmından görünüm

2.3.1.2. Marshall Oranı (S/A) deneyi

Stabilite/akma oranı Marshall oranı olarak tanımlanmakta, karışım rijitliğinin ve asfalt betonunun deformasyon karşısındaki direncinin bir göstergesi olmaktadır. Oran değerleri, briketlerin deformasyon direncinin değerlendirilmesi amacıyla kullanılmıştır. Daha yüksek bir oran değeri, daha rijit bir karışım ve bundan dolayı daha dirençli bir karışım olabilmektedir. Marshall oranı, taslak olarak (BSEN 12697–34: Sıcak karışım asfaltlar için Marshall Deneyi) yeniden düzenlenmiştir.



Şekil 28. Stabilite ve akma değerlerini ölçen alet

Bu test tekil yüklemeli ampirik testler kategorisine ait olmakla birlikte, iki niceliğinin doğrudan saptanmasını sağlamaktadır: Marshall akışı (mm) ve stabilite (kN); Marshall akışı, asfalt betonunun deformasyona karşı direncinin göstergesidir [118].

Marshall oranı deneyi kapsamında, Şekil 28.'de belirtilen aletin kelepçeleri arasına (Marshall tasarımıyla oluşturulan) standart silindirik asfalt numuneleri yerleştirildi ve basınca maruz bırakıldı. Numunenin deforme olmasını (akmasını) sağlayan değer tespit edildi ve gerekli dönüşümlerle “kg” cinsine çevrildi. Buradaki akma miktarı da diğer akma göstergesinden okundu. Bu değer 0.001 inch'e karşılık geldiğinden mm'ye çevirmek için 0.0256 ile çarpılarak “mm” cinsinden tespit edildi. Deneyin ayrıntılı tablosu “EKLER” bölümünde Ek Tablo 9 'da verilmiştir.

2.3.2. Bitüm Süzülme Deneyi

SMA karışımlar diğer bitümlü sıcak karışım kaplamalara göre daha zengin bitüm içermektedir. SMA dizaynları açık granülometriye sahiptir. Belli elek aralıklarında daha fazla, belli elek aralıklarında ise daha az agregaya vardır. Bu yüzden kaba agregalar arasındaki boşluk normal karışımlara göre daha fazla bitüm kullanılarak kapatılmaktadır. Karışım hazırlanırken sıcaklıktan dolayı karışım bünyesindeki bu fazla bitüm akıcı bir özellik kazanıp mineral agregaya karışımından süzülerek ayrılmaktadır. Burada SMA karışımlar içinde katkı maddelerinin önemi ortaya çıkmaktadır. Katkı maddelerinin karışımların içinde homojen bir şekilde dağılıp bitümü bünyesinde tutarak bitümün süzülmesini engelleme görevini üstlenirler.

Schellenberger bitüm süzülme deneyi; Almanların geliştirdiği bir deney yöntemi olup, uluslararası düzeyde geçerli başka bir deney yöntemi olmadığı için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu deney SMA karışımların dizayn kriterleri arasında bulunmaktadır.

Deneyin yapılışı; 1000 ml'lik cam beherin boş ağırlığı tartıldı, 135°C'de hazırlanan 1000 gr SMA karışımı 1000 ml'lik cam beher konularak 0,1 gr hassasiyetinde tartıldı. Beher, üzeri kapatıldıktan sonra 1 saat süre ile, 170°C sıcaklıktaki etüvde bekletildi. Bu sürenin sonunda etüvden çıkartıldı ve karışım beheri sarsmadan boşaltıldı. Cam beher yapışan agregaya varsa agregaya temizlendi. Deney sonu cam beher 0,1 gr hassasiyetinde tartıldı ve boş beher ağırlığı çıkartıldı. Süzülen bitüm miktarı ilk başlangıçta deneye alınan karışım miktarına oranlanarak bulundu. Şartname değeri maks. % 0,3 olmalıdır. Çıkan sonuç; % 0,2' den küçükse iyi, % 0,2 ile % 0,3 arasında ise kabul edilebilir, % 0,3' den büyükse kabul edilemez anlamındadır. Bitüm süzülme deneyinin yapılış aşamaları Şekil 29-31.'de görülmektedir .



Şekil 29. SMA karışımının hazırlanması ve cam beherin boş ve karışım dolu tartımı



Şekil 30. Etüvde 170°C'de 1 saat bekleyen karışımın cam beherden boşaltılması



Şekil 31. Süzülme deneyi sonra oluşan durumlar

Hazırlanan 6 adet karışım tasarımı için yapılan Schellenberger bitüm süzülme deneyleri optimum bitüm oranlarında yapılmıştır.



Şekil 32. Süzülme deneyi aşamalarından görünüm

2.3.3. Sudan Kaynaklanan Bozulmalara Karşı Direnç Deneyi

Marshall briketleri hazırlanarak koşullu, ve koşulsuz şartlar altında sıkıştırılmış bitümlü karışımların sudan kaynaklanan bozulmalara karşı direnci için standart deneyi, indirek çekme mukavemeti dediğimiz kısaca İÇM deneyi yapılmıştır. AASHTO T 283’de açıklanan bu metot, laboratuarda sıkıştırılmış bitümlü karışımların hızlandırılmış su etkileri nedeniyle oluşan çap düzlemindeki çekme mukavemeti değişiminin ölçümünü ve bu deney için numune hazırlanmasını kapsar. Bu metot ile; karışım dizayn deneyiyle bağlantılı olarak bitümlü karışımları, plantlerde üretilen bitümlü karışımları ve herhangi bir yaştaki üstyapıdan alınan karotlar test edilebilir [119].

2.3.3.1. Sudan Kaynaklanan Bozulmalara Karşı Direnç Deneyinin Yapılışı

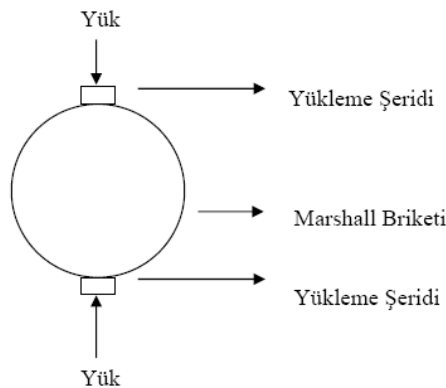
Dizayn değerlerine uygun olarak hazırlanan Marshall briketleri koşullu ve koşulsuz gruplara ayrıldı. Koşulsuz gruptaki briketler deneye kadar oda sıcaklığında tutuldu ve sızdırmaz plastik torbalarda saklandı. Sonrasında 2 saat süreyle 25°C’de su banyosunda tutuldu ve her koşulsuz numuneler sırasıyla basınç plakası arasına koyuldu. Şekil 40.’da görüldüğü gibi yük, numune çapı boyunca uygulandı. Yükleme şeritleri numune çapına bağlı olmak üzere; 4” çapındaki briket numuneleri için, genişliği 13 mm olan yükleme şeritleri kullanıldı. Deney makinesine (Örnek: Pres gibi) bağlanan numuneye deney aletinin başlığının hareketi dakikada 2” veya 50,8 mm olacak şekilde yük uygulandı. Maksimum değere ulaşıldığı anda numunede çap boyunca düşey çatlak oluşumu gözlemlendi. Aletin göstergesinden okunan yük değeri kaydedildi ve İÇM (İndirek Çekme Mukavemeti) değerleri hesaplandı. Şekil 33’de İÇM deneyi için kullanılan yükleme ünitesi görülmektedir.



Şekil 33. İÇM deneyinde kullanılan yükleme ünitesi

Koşullandırılacak gruptaki briketler sırasıyla tabanına metal parçalar konmuş vakum kabı içine yerleştirildi. Numune yüzeyini en az 25 mm aşacak şekilde oda sıcaklığındaki (25°C) damıtık su ile dolduruldu. 5 dakika boyunca 10-26 inch Hg gibi kısmi bir vakum uygulandı, vakum kesildi ve numune doymuş hale gelmesi için 10 dakika su içinde bırakıldı. Hazırlanan briketlerin hava boşluğunun %55-80 'i arasında suyla doymuş hale getirildi, vakumlanmış numuneler her birinin içinde 10 ml su bulunan poşetlere koyuldu ve poşetler kapatıldı. 16 saat -18°C' de derin dondurucuda bekletildi, sonrasında çıkarılarak 24 saat süreyle 60°C' lik su banyosunda tutuldu, sonrasında çıkarılarak 2 saat süreyle 25°C' de su banyosunda tutuldu. Her koşullu numune sırasıyla iki basınç plakası arasına konuldu, yükleme şeritleri numunenin iki kenarına da yerleştirildi. Şekil 34'de görüldüğü gibi yük numune çapı boyunca uygulandı. Ardından İÇM değerlerinin hesabına geçildi.

Sonraki aşamada hesaplanan değerler; koşullu grubun değerleri ile koşulsuz grubun değerleri kıyaslandı. Burada gruplar içi ve gruplar arası karşılaştırmalar yapılarak, sonuçlar elde edilmiş ve birbirleriyle kıyaslanmıştır. Deneyin ayrıntılı tablosu "EKLER" bölümünde Ek Tablo 2 'da verilmiştir.



Şekil 34. İÇM numuneleri, yük uygulanması ve yükleme şeritleri

Çekme mukavemeti aşağıda belirtilen şekilde hesaplandı.

$$St = \frac{2P}{\pi \cdot t \cdot D}$$

(10)

Burada;

St : çekme mukavemeti, psi

P : Maksimum yük, lb

T : Numune kalınlığı, inch

D : Numune çapı, inch şeklindedir.

1 kg = 2,2048 lb

1 kg / cm² = 14,223 psi

1 inch = 2,54 cm

alınıp dönüştürmeler yapıldığında formül aşağıdaki hale gelir.

$$St = \frac{0,062659 \cdot P}{t}$$

(11)

Burada;

P : maksimum yük, kg

T : numune kalınlığı, cm

St : çekme mukavemeti, kg/cm² dir.

2.3.4. Tekrarlı Sünme Deneyi

Tekrarlı sünme deneyi bitümlü karışımların plastik deformasyonlara karşı gösterdiği mukavemeti ölçmek için kullanılan en önemli deneylerden biridir. Hareketli trafik yükünü temsil etmek için tekrarlı olarak yük uygulaması yapılmaktadır. Tekrarlı sünme deneyi özellikle katkı cinsleri arasındaki performans farkını göstermesi açısından çok önemli bir deney yöntemidir.



Şekil 35. Sünme deneylerinin yapıldığı cihaz ile test düzeneği

2.3.4.1. Tekrarlı Sünme Deneyinin Yapılışı

Marshall Tasarım Deneyine uygun olarak üretilen örneklerin deney öncesinde birim hacim ağırlıkları tespit edilmiş ve aşağıdaki işlem sırasına göre deney gerçekleştirilmiştir.

- Numuneler istenen sıcaklıkta ± 1 °C sıcaklık kontrollü bir hücreye yerleştirilir ve deney sıcaklığına gelinceye kadar beklenildi.
- Sabitlenmiş olan numunenin bozulmasına sebep olan yükün %5 ile %25 arasındaki basınç yükü uygulandı.
- Ön hazırlık sonunda geri dönen düşey deformasyon ölçüldü ve buradan da sünme modülü hesaplandı.
- Ön hazırlık yükünün sıfıra inmesi ile, ± 2 'lik hata ile tekrarlı yük uygulandı.
- Tüm yükleme süresince düşey deformasyonlar kaydedildi.
- Geri dönen deformasyonun ölçülmesi için düşey yer değiştirmeler ölçüldü.

Tablo 22. Tekrarlı sünme deneylerinde uygulanan parametreler

Deney Parametresi	Değer
Deney sıcaklığı	5°C 25°C 40°C
Alıştırma gerilmesi	30 kPa.
Alıştırma gerilmesi uygulama süresi	1 dak.
Alıştırma gerilmesi dinlenme süresi	1 dak.
Deney yükleme gerilmesi	300 kPa. (43,513 psi)(3,06 kg/cm ²)
Vuruş periyodu	1000 ms (1sn)
Yüklü süre	500 ms
Yüksüz süre	500 ms
Deneyi sonlandıran vuruş sayısı	64800 (18 saat)
Dinlenme süresi	60 dak.

2.3.5. Dolaylı Çekme Mukavemeti Deneyi

Dolaylı çekme mukavemeti deneyi, bitümlü karışımların ısı ve yorulmadan dolayı oluşan çekme gerilmelerini karakterize eder. Numunelere bozuluncaya kadar bir basınç yükü uygulanır. Bu deneyde ekipman olarak Marshall stabilitesi deney aleti ve Dolaylı Çekme gerilmesi deney ekipmanları kullanılmıştır. Çalışmalarda karışımların dolaylı çekme mukavemeti değerleri 40°C için ölçülmüştür.

2.3.5.1. Dolaylı Çekme Mukavemeti Deneyinin Yapılışı

- Marshall Tasarım Deneyine uygun olarak üretilen numunelerin deney öncesinde birim hacim ağırlıkları tespit edildi.
- Numuneler istenen sıcaklıkta ± 1 °C sıcaklık kontrollü bir hücreye yerleştirildi ve deney sıcaklığına gelinceye kadar beklendi. Eğer numunelerin gerçek sıcaklıkları ölçülemiyor ise numuneler sıcaklık kontrollü hücrede 12 saat boyunca bekletildikten sonra deneye tabii tutulurlar.
- Numuneler deney ekipmanına yerleştirildi.
- Ön hazırlık amacıyla numunelere yarı sinüzoidal yük uygulandı ve numunelerin yük doğrultusuna dik eksenleri işaretlendi.

- Ön hazırlık deney sonucunda yatay eksen boyunca oluşan deformasyonlar ölçüldü ve numunelerin esneklik modülleri tesbit edildi.
- Deney esnasında yük, deformasyon miktarı 25 °C sıcaklık ve daha üzerindeki sıcaklıklarda dakikada 2" (5 cm) ve 10 °C ve daha düşük sıcaklıklarda ise dakikada 0,05" ve 0,065" (1,27 ve 1,65 cm) olacak şekilde uygulanır.
- Deney esnasında numuneye uygulanan yük, yatay ve düşey doğrultuda oluşan deformasyonlar yükleme zamanının tamamında kaydedildi. Yatay ve düşey deney ekipmanında bir bozulmanın oluşmaması için numunenin kırılmasından önce deney durduruldu.
- Hesaplamalar

$$St = \frac{Pf}{h} \times 0,156 \quad (12)$$

Dolaylı Çekme Mukavemeti St (psi)

Pf = Numunenin bozulduğu andaki yük (pound)

h = Numune yüksekliği (inch)

Poisson Oranı γ

$$\gamma = \frac{DR \times 0,0673 - 0,8954}{DR \times (-0,2494) - 0,156} \quad (13)$$

$$DR = \frac{Yt}{Xt} \quad (14)$$

Yt = Düşey deformasyon

Xt = Yatay deformasyon

Esneklik Modülü (E)

$$E = \frac{Sh}{Xt} \times (0,2692 + \gamma \times 0,9974) \quad (15)$$

$$Sh = \frac{P}{Xt} \quad (16)$$

Çekme Deformasyonuna ε_t (mikron)

$$\varepsilon_t = \Delta h \times \left[\frac{0,03896 + \gamma \times 0,1185}{0,0673 + \gamma \times 0,2496} \right] \quad (17)$$

Δh = Toplam yatay deformasyon

Basınç Deformasyonu ε_c (mikron)

$$\varepsilon_c = \Delta v \times \left[\frac{-0,1185 - \gamma \times 0,03896}{-0,8954 + \gamma \times 0,156} \right] \quad (18)$$

Δv = Toplam düşey deformasyon

2.3.6. Dolaylı Çekme Deneyi

Dolaylı Çekme Deneyi, farklı sıcaklıklar ve yükleme periyotları altında yapılmaktadır. Deneyde her bir sıcaklık ve yükleme periyodu için numunelere ait esneklik modülü değerleri belirlenir. Bitümlü karışımların dolaylı çekme gerilmesi deneyi ile esneklik modülü değerlerinin tespit edilmesinde numunelere yarı sinüzoidal (haversin) bir formda basınç yükü uygulanması suretiyle yapılır. Yük, silindirik asfalt numunesi üzerine düşey olarak uygulanır ve numune içerisinde oluşan yatay ve düşey deformasyonlar ölçülür.



Şekil 36. Deney cihazına yerleştirilmiş numune görünümü

2.3.6.1. Dolaylı Çekme Deneyinin Yapılışı

- Numuneler sıcaklık kontrollü hücreye yerleştirilerek belirlenen sıcaklığa gelmesi için 24 saat beklendi. Numunelerin istenen sıcaklığa gelip gelmediği kukla numune içerisine yerleştirilen bir derece ile tespit edildi.
- Numuneler deney ekipmanına yerleştirildi.
- Ön hazırlık yüklemesi yapılarak numunenin yerleşmesi sağlandı.
- Numuneye dolaylı çekme mukavemeti değerinin %10'u ile 50'si arasında değişen bir yük belirlenen bir periyot boyunca beş kez yarısinüzoidal (haversin) olarak uygulandı ve numune içerisinde oluşan yatay ve düşey deformasyonlar ölçüldü.
- Deney aşamasında yük tekerrüründe 0,33, 0,5 ve 1 Hz'lik frekansların uygulandı.
- Esneklik modülü değeri için bir numuneye iki defa deney uygulandı. İlk deney tamamlandıktan sonra numune 90° döndürülerek ikinci kez deneye tabii tutuldu ve esneklik modülü değeri olarak iki deney sonucunun ortalaması alındı.
- Deneyin tahribatsız olması nedeniyle, bir numuneye birden daha fazla deney yapılması imkanı vardır. Bu nedenle numunede kalıcı deformasyonları azaltmak için deneye en düşük sıcaklıklarda, en kısa yükleme süresi ve en düşük yük ile başlanıldı.

Her bir deney sonucu için Esneklik Modülü (E) değerleri aşağıdaki şekilde hesaplandı.

$$E = \frac{P \times (\gamma + 0,27)}{h \times \Delta h} \quad (19)$$

E = Esneklik modülü (Mpa)

P = Uygulanan yük (kN)

γ = Poisson oranı

h = Numune yüksekliği (in.)

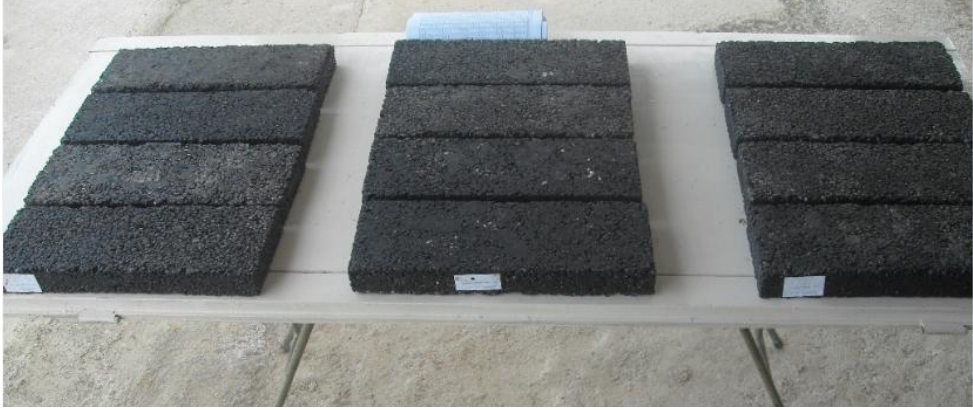
Δh = Geri dönen deformasyon

2.3.7. Tekerlek İzi Deneyi

Üstyapı üzerinde yuvarlanan tekerleğin etkisini daha iyi belirlemek, çatlak başlangıcı ve ilerlemesini daha iyi anlatmak amacı ve asfalt plakların yorulma karakteristiklerini araştırmak için Tekerlek-İzi deneyi geliştirilmiştir [120].

Laboratuar ortamında karışımların tekerlek izi (rutting) açısından performanslarını bulmaya yarayan deney araçlarından dünyada en yaygın olarak kullanılanlar;

- LCPC, Köprüler ve Yollar Merkez Laboratuvarının (Fransa) geliştirdiği ölçüm cihazı;
- Almanya (Hamburg) tekerlek izi ölçüm cihazı;
- Ulaşım Araştırma Laboratuvarı test aleti;
- Amerikan Georgia tekerlek izi ve yorulma cihazı;
- Amerikan Purdue Üniversitesi tekerlek izi ölçüm cihazı;
- Güney Amerika MML53 test ekipmanı olarak sıralanabilir.



Şekil 37. Tekerlek izi deneyi uygulanacak olan slablardan görünüm

Bu test yöntemlerinin her biri farklı bir sistemde asfalt numuneleri üzerinde iz oluşturduğundan birbirlerinden farklı sonuçlar ortaya çıkmaktadır. Örneğin Almanya’da metal tekerlek kullanılırken İngiltere, Fransa ve Amerika’da lastik tekerlek kullanılmaktadır;

Türkiye’de LCPC Fransa Yollar Laboratuvarının geliştirdiği test cihazı KGM Araştırma Başmühendisliği tarafından kullanılmaktadır. LCPC test cihazı ısı ayarlı ve tekerlek izi deneyinin yapıldığı ana ünite ile, sıkıştırma düzeneği olmak üzere iki ayrı ekipmandan oluşmaktadır.



Şekil 38. Tekerl izi deneyi için kullanılan sıkıştırma düzeneği



Şekil 39. Tekerlek izi deneyi (LCPC) aleti

2.3.7.1. Tekerlek İzi Deneyinin Yapılışı

LCPC deney ekipmanında numuneler, 500 mm uzunluğunda, 180 mm genişliğinde, 50 mm kalınlığında hazırlandı. Test sıcaklığı 60°C olup, test başlamadan 12 saat önce numuneler bu sıcaklıkta muhafaza edildi. Her bir tekerlek 5000 N yük uygulayacak şekilde tasarım edilmiş olup, tekerleklerin lastik basıncı 0,6 Mpa (87 psi) olarak korunmalıdır [121].

Numuneler daha önce belirlenmiş bir sıkışma derecesine kadar sıkıştırıldı. Burada numuneler SMA karışımlar için minimum arazi sıkışma değeri olan %98 yoğunluğa kadar sıkıştırıldı. Deney ortamı 60°C'ye getirilmeden önce, numunelere 1000 devirlik bir ön sıkıştırma uygulandı. Daha sonra sıcaklık ayarlanarak ölçümler alınmaya başlandı. Ölçümler 1000, 3000, 5000, 10000, 30000 ve 50000'de yapıldı. Ölçümler yapıldıktan sonra tekerlek izinde oturma miktarları aşağıdaki gibi bulundu [122].

$$Y=A\left[\frac{N}{1000}\right]^B \quad (20)$$

Burada;

$Y = N$ devirde oturma (TİO)

$A = 1000$ devirde oturma

B= Logaritmik koordinatlarda doğrusal hattın eğimidir.

Tekerlek izinde genellikle 30000 tekerlek geçişinde bulunan oturma değeri kullanılmaktadır [123].



Şekil 40. Tekerlek izi deneyi sonrası slablardan görünüm

3. BULGULAR VE İRDELEME

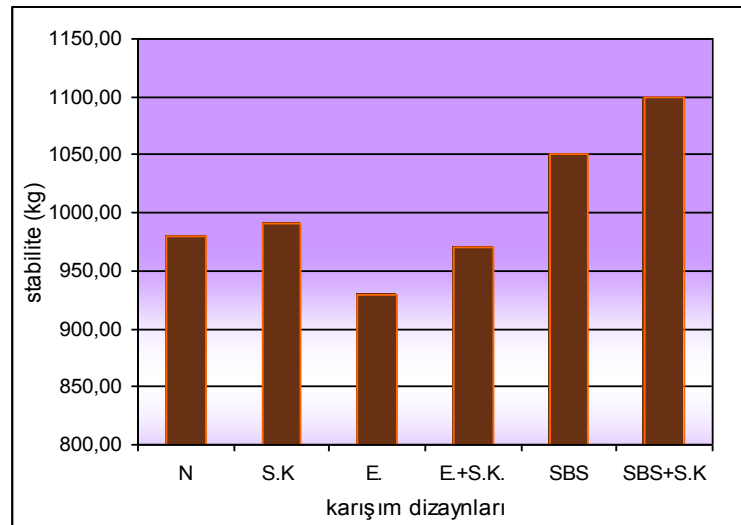
3.1. Marshall Yöntemine Göre Yapılan Deney ve Hesaplamalar

Çalışmada 6 adet dizayn yapılmış olup optimum bitüm miktarları saptanmıştır. Optimum bitüm miktarlarında üretilen numunelerle yapılan deneylerden elde edilen karakteristik değerler, karşılaştırmalı olarak görülebilmesi amacıyla bütün karışım tasarımları için Tablo 23.'de verilmektedir.

Tablo 23. Tasarım numuneleri Marshall deneyi bulguları

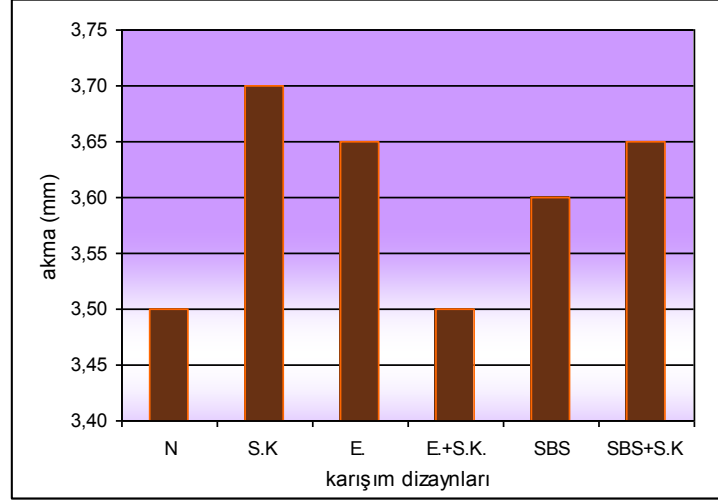
	N	S.K	E	E+S.K	SBS	SBS+S.K
Optimum bitüm yüzdesi	6,05	6,17	6,43	6,45	6,61	6,73
Stabilite, Kg	980	990	930	970	1050	1100
Pratik yoğunluk, gr/cm ³	2,452	2,446	2,450	2,445	2,449	2,443
Boşluk yüzdesi, %	3,2	3,24	2,74	2,86	2,55	2,59
Akma, mm	3,5	3,7	3,65	3,5	3,6	3,65
VMA,%	16,2	16,44	16,53	16,69	16,70	16,97
Asfalt dolu boşluk yüzdesi %	80,2	80,5	83,4	82,9	84,7	84,7

Sönmüş kireç özellikle stabilite üzerinde hem tek başına hem de diğer katkı maddeleri ile birlikte olumlu etki göstermiştir. Stabilite, akma, optimum bitüm miktarları, boşluk ve pratik yoğunluk grafikleri sırasıyla Şekil 41-45.'de verilmiştir.



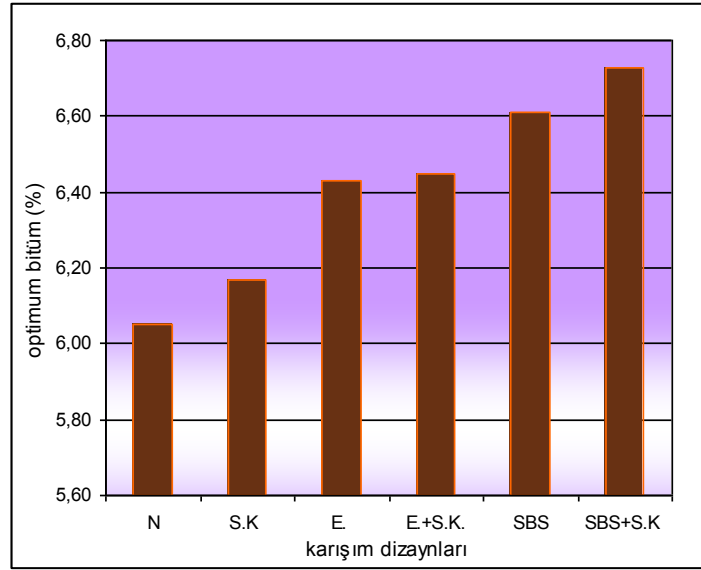
Şekil 41. Tasarım numuneleri Stabilite (kg) değerleri grafiği

Şekil 41.'de görüldüğü gibi, “Sönmüş kireç” katkılı tasarım, “Katkısız (N)” tasarımdan daha yüksek bir stabilite değerine ulaşırken, “SBS” katkılı tasarımın gerisinde kalmıştır. “SBS+S.K.” katkılı tasarımın stabilite değerinin “N” tasarımın satabilite değerine nisbeten %12 daha büyük olduğu görülmektedir. Sönmüş kireç bütün tasarımlarda etkili olmuş ve karışımların stabilite değerlerinde önemli artış sağlamıştır.



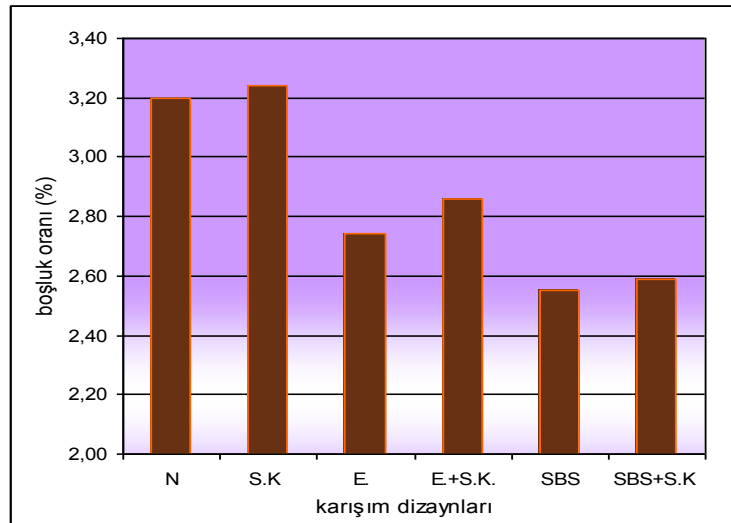
Şekil 42. Tasarım numuneleri Akma (mm) değerleri grafiği

Şekil 42.'den de izlenebileceği üzere, ”Sönmüş kireç” katkılı SMA karışım tasarımı en yüksek akma değerine ulaşırken ”Katkısız (N)” ve ”Elyaf +Sönmüş kireç” katkılı tasarımlar en düşük değerde kalmışlardır. ”Elyaf” ve ”SBS +Sönmüş Kireç” katkılı tasarımlar da yüksek akma değerleri göstermişlerdir. Sönmüş kireç ilavesinin akma oranında artışa sebebiyet verdiği görülmektedir. Diğer katkı maddelerinde de aynı durum gözlenmektedir.



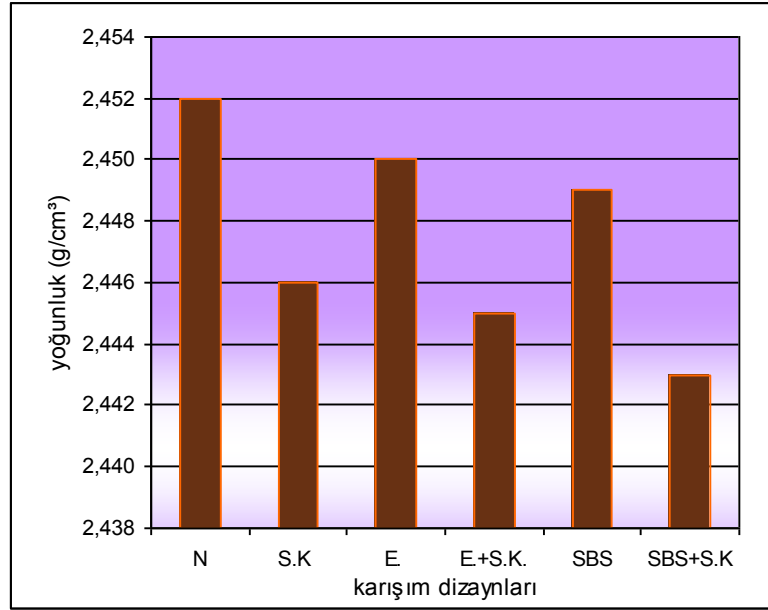
Şekil 43. Tasarım numuneleri Optimum bitüm yüzdeleri grafiği

Şekil 43.’ten de izlenebileceği üzere, optimum bitüm yüzdesi açısından değerlendirildiğinde, en düşük değer “Katkısız (N)” SMA tasarımında, en yüksek değer ise “SBS+Sönmüş Kireç” katkılı tasarımda karşımıza çıkmaktadır. “SBS” katkılı tasarımın “Elyaf” katkılı tasarıma, “Elyaf” katkılı tasarımın da “Sönmüş Kireç” katkılı tasarıma oranla daha yüksek optimum bitüm muhtevası değerine sahip olduğu görülmektedir. Ortimum bitüm miktarındaki artış ilave maliyet getirmesine rağmen sağladığı stabilite artışı ve buna bağlı olarak hizmet ömrünün artması yönündeki olumlu etkisi başlangıç maliyeti fazlasıyla karşılayacaktır.



Şekil 44. Tasarım numuneleri Boşluk yüzdeleri grafiği

Şekil 44.’te görüldüğü gibi, Boşluk oranı yüzdesi açısından bakıldığında en yüksek boşluk oranının “Sönmüş Kireç” katkılı SMA tasarımında, en düşük boşluk oranının ise “SBS” katkılı tasarımda olduğu görülmektedir. Ayrıca Sönmüş kirecin ilave edildiği tasarımların boşluk oranını arttırma yönünde etki gösterdiği gözlenmiştir. Sönmüş kirecin SBS ile birlikte kullanılmasının çok daha iyi sonuçlara götürdüğü görülmektedir.



Şekil 45. Tasarım numuneleri Pratik yoğunluk grafiği

Şekil 45.’te görüldüğü üzere, en yüksek pratik yoğunluk değeri “Katkısız (N)” SMA tasarımında, en düşük yoğunluk değeri ise “SBS+Sönmüş kireç” katkılı tasarımda görülmektedir. Ayrıca Sönmüş kirecin, ilave edildiği tasarımların yoğunluğunda azalmaya yönelik etki gösterdiği de gözlemlenmiştir. Grafiksel olarak Şekil 41-45.’den de görüldüğü gibi Sönmüş kirecin tasarıma etkisi gayet net olarak ortaya çıkmaktadır.

Tasarımların ardından elde edilen optimum bitum muhtevaları doğrultusunda deneysel çalışmalarda kullanılacak olan briketler ve slablar (Şekil 46. ve 47.) üretilmiştir.



Şekil 46. Hazırlanan slablardan görünüm



Şekil 47. Hazırlanan briketlerden görünüm

Bu briketler Bölüm 2.'de de bahsedildiği gibi aşağıda sıralanan deneylere tabi tutulmuşlardır.

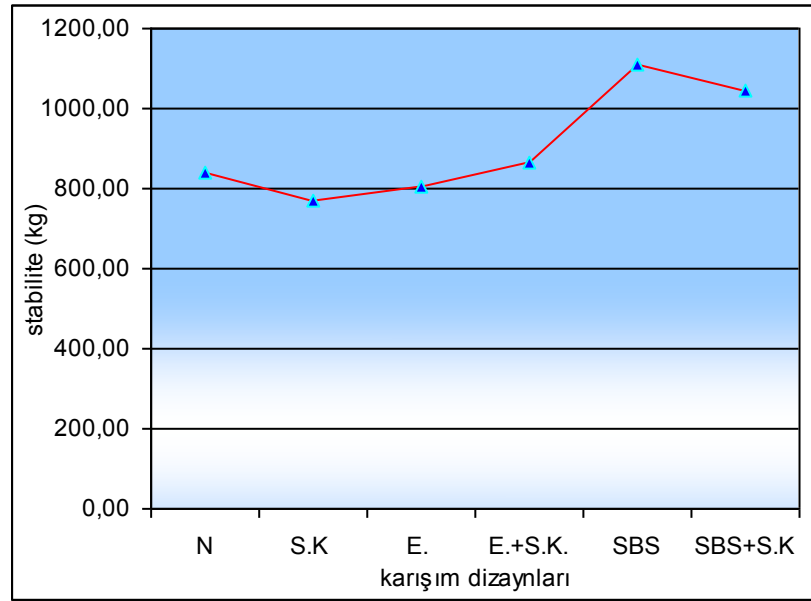
- 1- Marshall Dizaynı ve Marshal Oranı Deneyi
- 2- Bitüm Süzülme Deneyi
- 3- Sudan Kaynaklanan Bozulmalara Karşı Direnç Deneyi
- 4- Tekrarlı Sünme Deneyi
- 5- Dolaylı Çekme Deneyi

6- Dolaylı Çekme Mukavemeti Deneyi

7- Tekerlek İzinde Oturma Tayini Deneyi (Rutting)

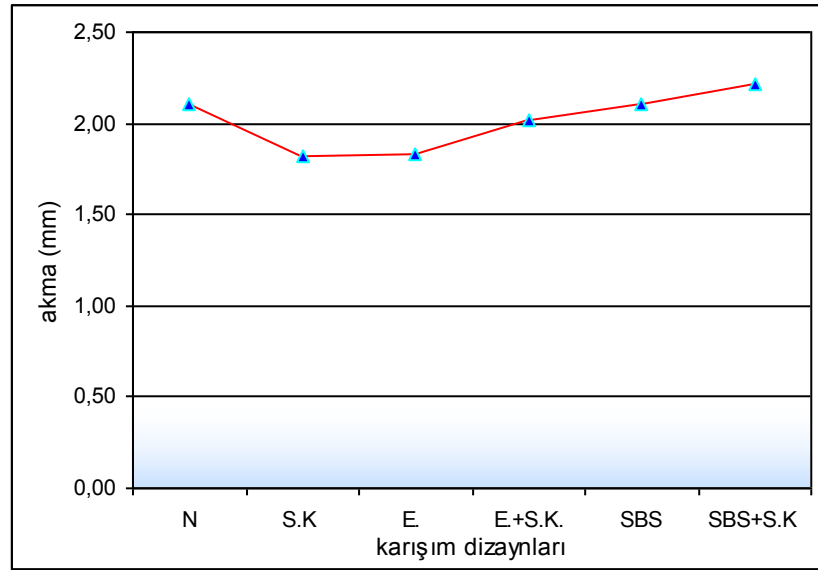
3.1.1. Marshall Oranı (S/A) Deneyi Sonuçları

Her bir tasarımdan alınan 3'er numune ile yapılan deneyler neticesinde elde edilen stabilite, akma ve stabilite/akma oranları grafikleri sırasıyla Şekil 48-50.'de verilmiştir.



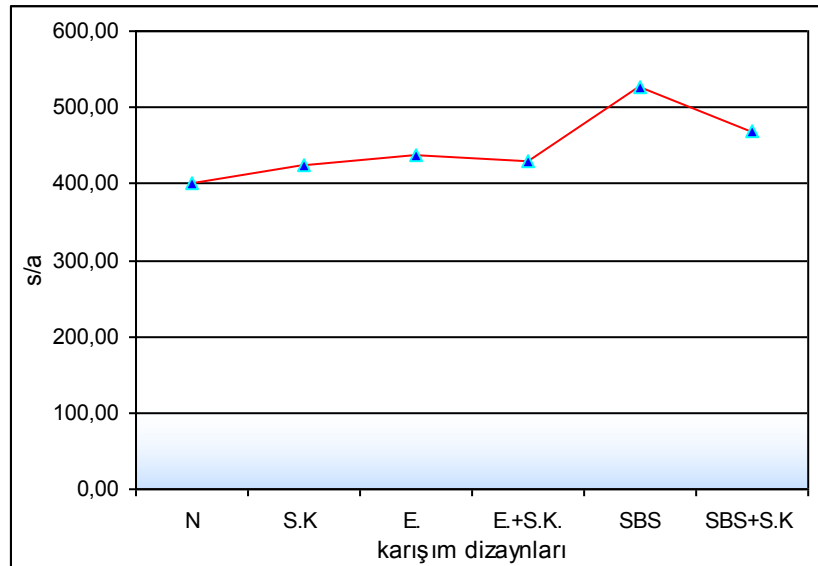
Şekil 48. Deney numuneleri Stabilite grafiği

Şekil 48'de "Elyaf" ve "Sönmüş kireç" katkıli tasarımların birbirine yakın değerlerde olduğu, "Elyaf+Sönmüş kireç" katkıli tasarımlarda ise daha yüksek stabilite değeri elde edildiği görülmektedir. En yüksek stabilite değerleri ise "SBS" katkıli tasarımda elde edilmiştir.



Şekil 49. Deney numuneleri Akma grafiği

Şekil 49.'da stabilite değerlerinde olduğu gibi “Elyaf” ve “Sönmüş kireç” katkı tasarımlarının birbirine yakın değerlerde olduğu, “Elyaf+Sönmüş kireç” katkıli tasarımlarda ise daha yüksek akma değeri elde edildiği görülmektedir. Düşük akma değeri veren “Sönmüş kireç” katkıli tasarım, sönmüş kirecin elyaf yerine rahatlıkla kullanılabilir olduğunu göstermektedir.



Şekil 50. Deney numuneleri Stabilite/akma grafiği

Şekil 50.'de görüldüğü üzere stabilite/akma oranı bakımından “Elyaf” ve “Sönmüş kireç” katkıli tasarımlar birbirine yakın değerlerdedir. “SBS” katkıli tasarımda bu oran en büyük değere ulaşmıştır. SMA karışımlarda Sönmüş kirecin elyaf yerine rahatlıkla kullanılabilir olduğunu bu grafiklerde açıkça görülmektedir.

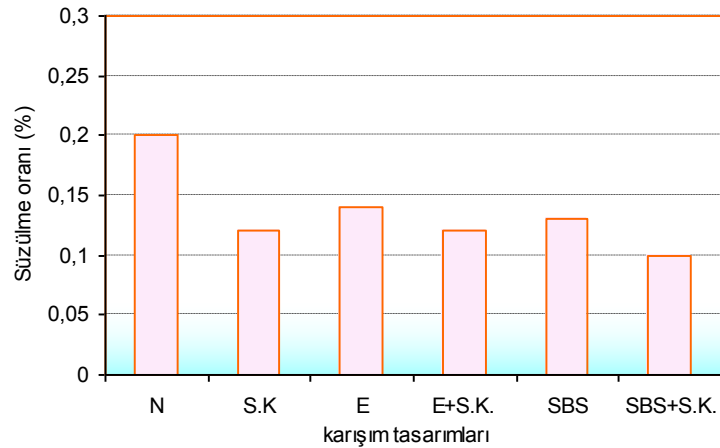
3.2. Bitüm Süzülme Deneyi Sonuçları

Schellenberger bitüm süzülme deneylerinin sonucunda elde edilen değerler Tablo 24.'te verilmiştir.

Tablo 24. Schellenberger bitüm süzülme deney sonuçları

SMA Karışım Dizaynları	Süzülme Sonucu Yüzde (%)
Katkısız	0,20
%1 Sönmüş Kireç Katkıli	0,12
%0,6 Elyaf Katkıli	0,14
%0,6 Elyaf + %1 S.Kireç Katkıli	0,12
%5 SBS Katkıli	0,13
%5 SBS + %1 S.Kireç Katkıli	0,10

Tablo 24.'te görüldüğü gibi “Sönmüş kireç” katkıli tasarım bitüm süzülme deney sonucu “Elyaf” katkıli tasarıma oranla daha düşük değerdedir. “Elyaf+Sönmüş kireç” katkıli tasarım sonuçları sadece “Elyaf” katkıli deney sonuçlarından, “SBS+Sönmüş kireç” katkıli tasarım deney sonuçları da sadece “SBS” katkıli deney sonuçlarından daha düşük değerler ortaya koymaktadır. SMA karışımından istenilen özellik süzülme oranının düşük değerlerde olmasıdır.



Şekil 51. Schellenberger bitüm süzülme deney grafiği

Bitüm süzülme deneyinde en iyi sonuçları veren tasarımların tümünde sönmüş kireç yer almaktadır. En olumsuz değer ise “Katkısız (N)” tasarımında ortaya çıkmıştır. Bu değer en olumlu değer olan “SBS+Sönmüş kireç” katkılı tasarım değerine kıyasla 2 kat olduğu tablodan gözlenmektedir.

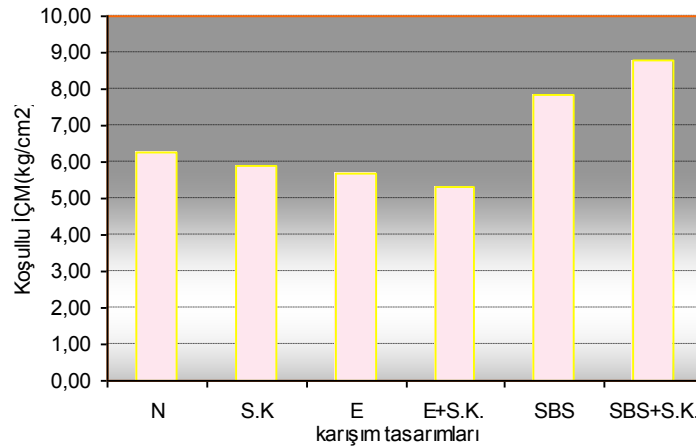
3.3. Sudan Kaynaklanan Bozulmalara Karşı Direnç Deneyi Sonuçları

Tüm karışım tipleri için yapılan Sudan kaynaklanan bozulmalara karşı direnç deneyi sonuçları Tablo 25.’te verilmiştir.

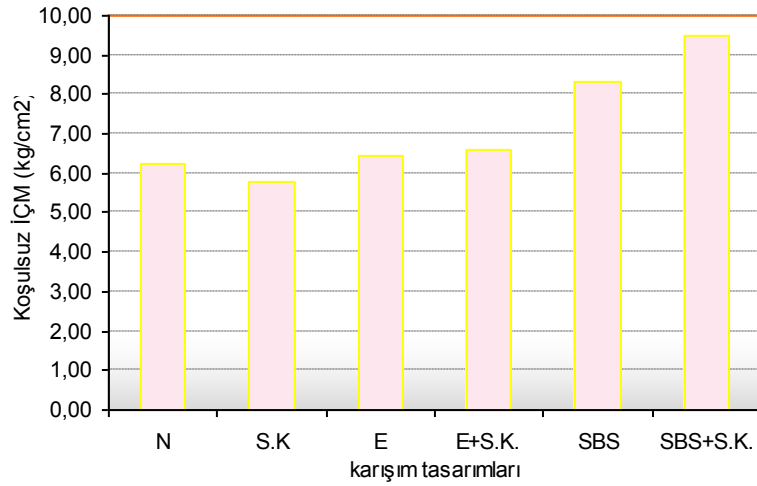
Tablo 25. Sudan kaynaklanan bozulmalara karşı direnç deneyi sonuçları

SMA Karışım Dizaynları	Koşullu (kg/cm ²)	Koşulsuz (kg/cm ²)
Katkısız	6,26	6,24
%1 Sönmüş Kireç Katkılı	5,88	5,80
%0.6 Elyaf + %1 Sönmüş Kireç Katkılı	5,33	6,58
%0.6 Elyaf Katkılı	5,66	6,47
% 5 SBS Katkılı	7,83	8,35
% 5 SBS + %1 Sönmüş Kireç Katkılı	8,78	9,48

Deney sonuçlarında görüldüğü gibi SMA karışımlarda koşullu briketlerde “Sönmüş Kireç” katkılı tasarım “Elyaf+Sönmüş kireç” katkılı tasarıma oranla %10, sadece “Elyaf” katkılı tasarıma oranla ise %4 daha iyi dayanım göstermiştir. Ayrıca “SBS+Sönmüş Kireç” katkılı tasarımın, sadece “SBS” katkılı tasarıma oranla %12 daha etkili olduğu görülmektedir.



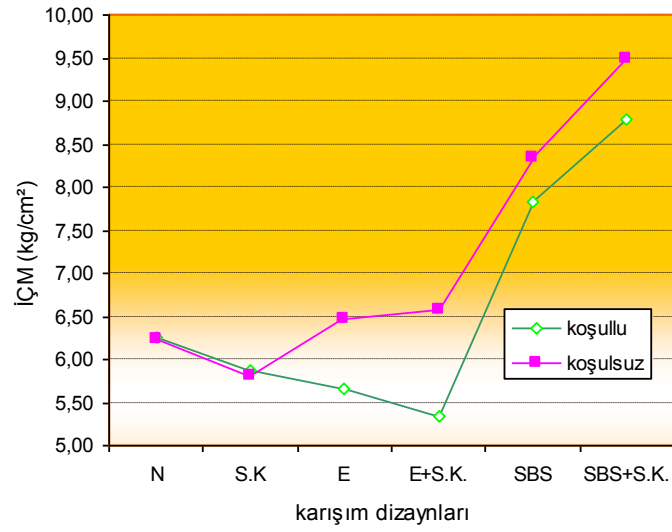
Şekil 52. Sudan kaynaklanan bozulmalara karşı direnç grafiği (Koşullu)



Şekil 53. Sudan kaynaklanan bozulmalara karşı direnç grafiği (Koşulsuz)

Koşulsuz briketlerin sudan kaynaklanan bozulmalara karşı direnç deneyi sonucunda nasıl bir davranış gösterdiklerine bakıldığında, Şekil 53.'de görüldüğü üzere; “Elyaf+Sönmüş kireç “ katkılı tasarımın sadece “Sönmüş kireç “ katkılı tasarıma oranla %13, sadece “Elyaf” katkılı tasarıma oranla ise %2 daha iyi dayanım gösterdiği görülmektedir. Ayrıca koşulsuz “SBS+Sönmüş Kireç” katkılı tasarımın, sadece “SBS” katkılı tasarıma oranla %14 daha etkili olduğu da görülmektedir. Bu noktada arazi şartlarına daha yakın olan ve suyun karışımlar içindeki donma çözülme etkisiyle verdiği zararın anlaşılmasında etkili olan ve Şekil 52.'de belirtilen koşullu durumdaki değerler göz önüne alındığında Sönmüş kirecin elyaf katkı maddesinin yerini rahatlıkla tutabileceği, ayrıca elyafla birlikte kullanılmasının, sadece elyaf kullanıldığındaki dayanım değerlerinden daha olumlu sonuçlar doğurduğu görülmektedir.

Koşullu ve koşulsuz durum için su hasarı deneyi verilerini içeren grafik Şekil 54.'te verilmektedir.

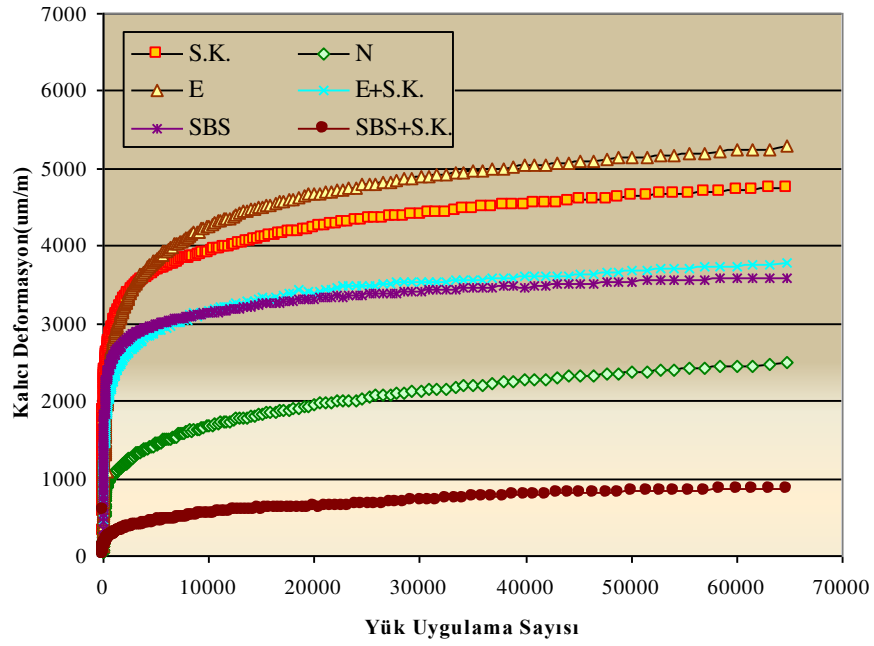


Şekil 54. Su Hasarı deneyi grafiği (Koşullu-Koşulsuz)

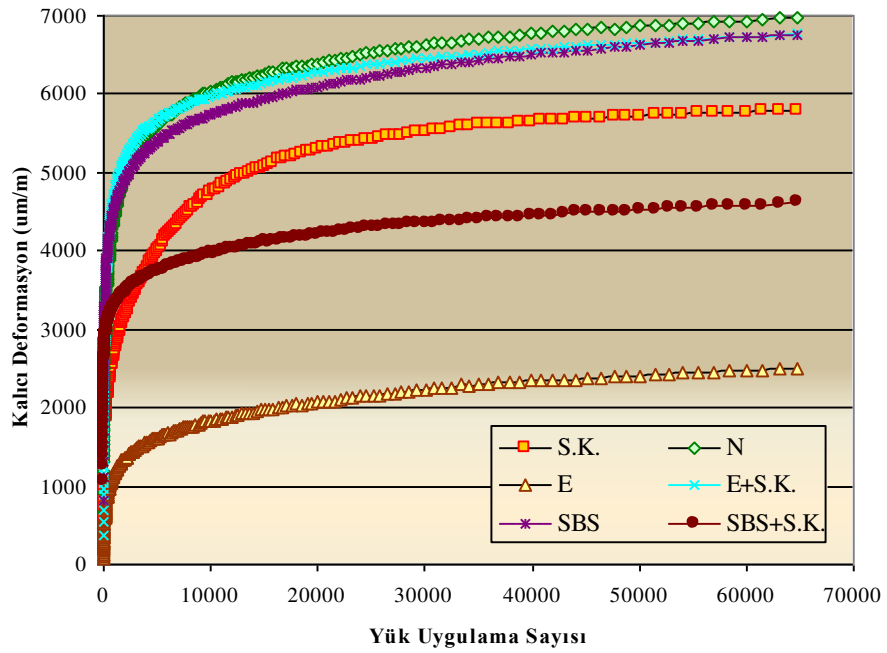
Şekil 54.'te koşullu durumdaki “Sönmüş kireç” katkıli karışım değerinin, koşulsuz durumdaki değerden yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum Sönmüş kirecin olumsuz koşullara (su hasarı, sıcaklık değişimi) karşı göstermiş olduğu direnci ortaya koymaktadır.

3.4. Tekrarlı Sünme Deneyi Sonuçları

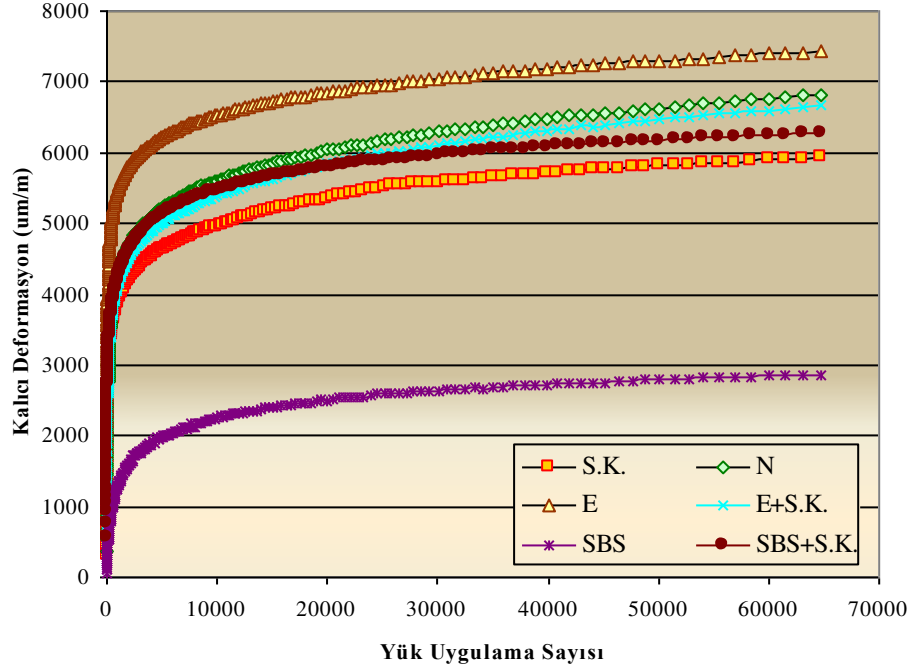
Her bir tasarım için hazırlanmış olan deney numuneleri üzerinde üç ayrı sıcaklıkta yapılan (5°C, 25°C ve 40°C) Tekrarlı Sünme deneyi sonuçları sırasıyla Şekil 55-57.'de verilmiştir.



Şekil 55. 5°C’de Tekrarlı Sünme deneyi sonuçları grafiği



Şekil 56. 25°C’de Tekrarlı Sünme deneyi sonuçları grafiği



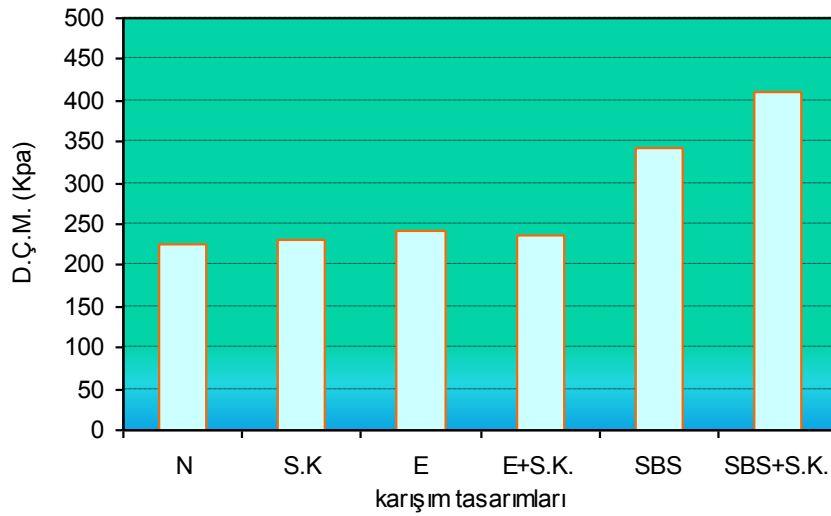
Şekil 57. 40°C’de Tekrarlı Sünme deneyi sonuçları grafiği

Şekil 55.’te 5°C’de bulunan deney sonuçları incelendiğinde, yük arttıkça deformasyonlarda en önemli artışın “Elyaf” katkılı karışımda olduğu görülmektedir. “SBS” katkılı karışım kalıcı deformasyon sıralamasında orta sıralarda yer alırken “SBS+S.K.” katkılı karışımda 5°C’de en az kalıcı deformasyon meydana geldiği görülmektedir. Şekil 56’da 25°C oluşan deformasyonlar görülmektedir. Sıcaklık artışıyla birlikte (5°C’den 25°C’ye) “SBS+S.K.” katkılı karışımdaki deformasyon değerlerinde artış gözlenmiş olup, en yüksek değerler “N” karışımlarda ve “E+S.K.” katkılı karışımlarda görülmektedir. En düşük kalıcı deformasyon değerinin 25°C’de “Elyaf” katkılı karışımda görülmesi de dikkat çekicidir. Şekil 57.’de ise 40°C oluşan deformasyonlar görülmektedir. Bu sıcaklık değerinde “SBS” katkılı katkılı karışımın en az deformasyon değerine sahip olduğu görülmüyor. “E+S.K.” ve “E” katkılı karışımlar 40°C’de büyük deformasyon değerleri göstererek yüksek sıcaklıklarda ağır taşıt trafiğine dirençli olmadıklarını göstermişlerdir.

3.5. Dolaylı Çekme Mukavemeti Deney Sonuçları

Dolaylı Çekme Mukavemeti sonuçları (Şekil 58.) incelendiğinde en yüksek değer 411 kpa (60 psi) ile “SBS+S.K” katkılı karışımlarda elde edilmiştir. İkinci sırada ise, 342 kpa ile SBS katkılı karışım gelmektedir. Bunları “E” katkılı karışım ile “E+S.K” katkılı

karışımlar takip etmekte olup en küçük değerler S.K katkıli karışım ile beklenildiği gibi ardından gelen N (Katkısız) karışımda karşımıza çıkmaktadır. Asfalt kaplamaların düşük sıcaklıklarda ve trafik yükleri altında oluşan çekme gerilmelerine karşın direncinin bir göstergesi olan bu deney Sönmüş Kireç katkısının Elyaf ile neredeyse aynı dayanım katkısını sağladığını, (SBS) Stiren-Butadiyen-Stiren ile birlikte kullanıldığında ise SBS karışımların tek başlarına çekme gerilmelerine karşı göstermiş oldukları direnci daha da yüksek değerlere taşıdığını göstermektedir.



Şekil 58. 40°C’de Dolaylı Çekme Mukavemeti deneyi grafiği

3.6. Dolaylı Çekme Deneyi Sonuçları

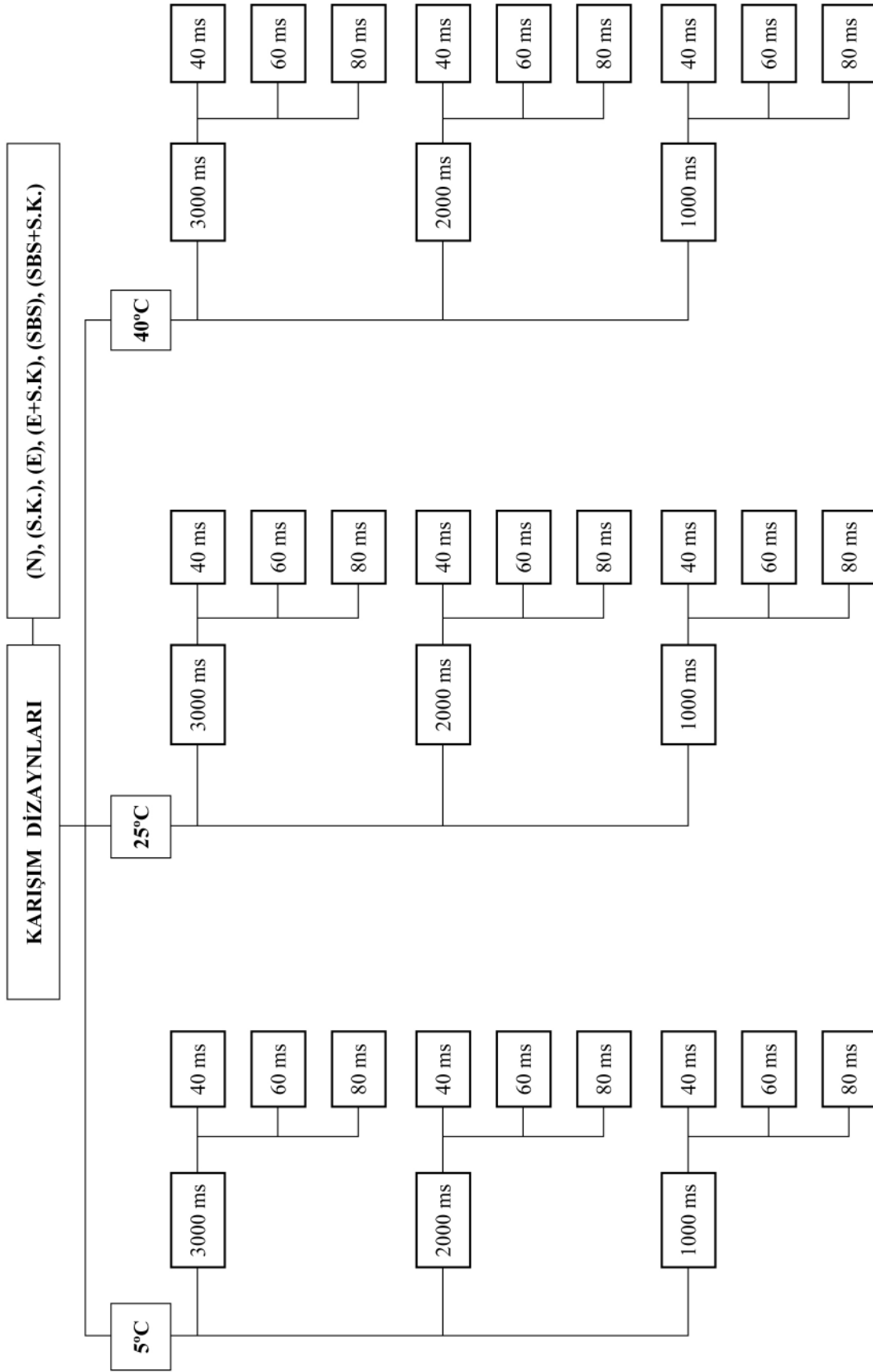
Burada her bir sıcaklık ve yükleme periyodu için numunelere ait esneklik modülleri bulunmuştur. Deney ASTM D-4123-82 standardına uygun olarak ve Şekil 59’da verilen akış şemasına göre yapılmıştır.

Her bir karışım cinsi için üretilen briketler 5 °C, 25 °C ve 40 °C sıcaklıklarda ve 1000 ms (1,00 Hz), 2000 ms (0,50 Hz), ve 3000 ms (0,33 Hz) yükleme periyodunda deneylere tabi tutulmuşlardır. Her bir yükleme periyodunda üç farklı yükleme hızı seçilerek, yükleme hızının deney sonuçlarına etkisi de saptanmaya çalışılmıştır. Tablo 26.’da yükleme periyodu ile yükleme hızı deney programı görülmektedir.

Tablo 26. Deneylerde kullanılan yükleme periyodu ile yükleme hızları

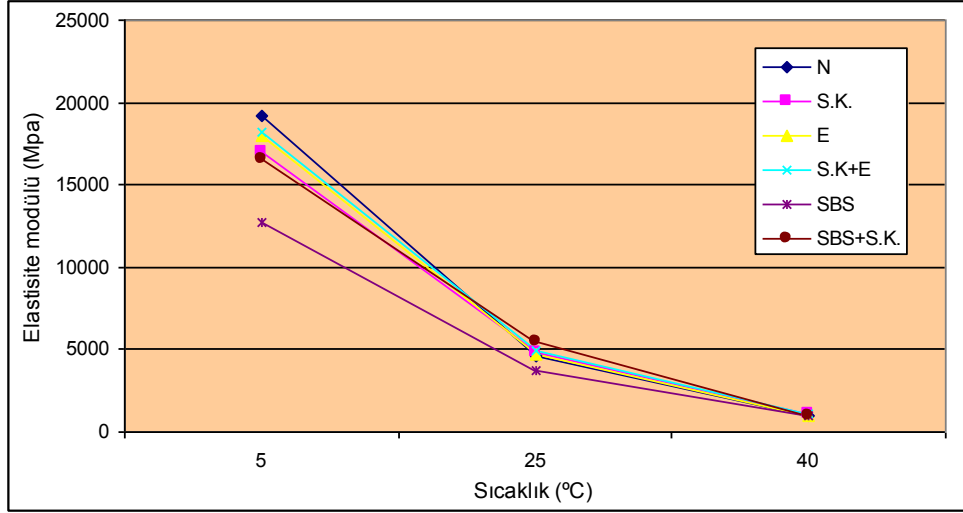
Yükleme Periyodu		Yükleme Hızı (ms)
Hz.	Tekerrür Süresi (ms)	
0,33	3000	40, 60, 80
0,50	2000	40, 60, 80
1,00	1000	40, 60, 80

Tabloda görülen tekerrür süresi, trafik yoğunluğunu, yükleme hızı ise dingil geçiş hızının bir göstergesidir. Diğer bir ifade ile, yüksek tekerrür süresi düşük yoğunluklu trafiği, yüksek yükleme hızı ise düşük taşıt geçiş hızını göstermektedir.



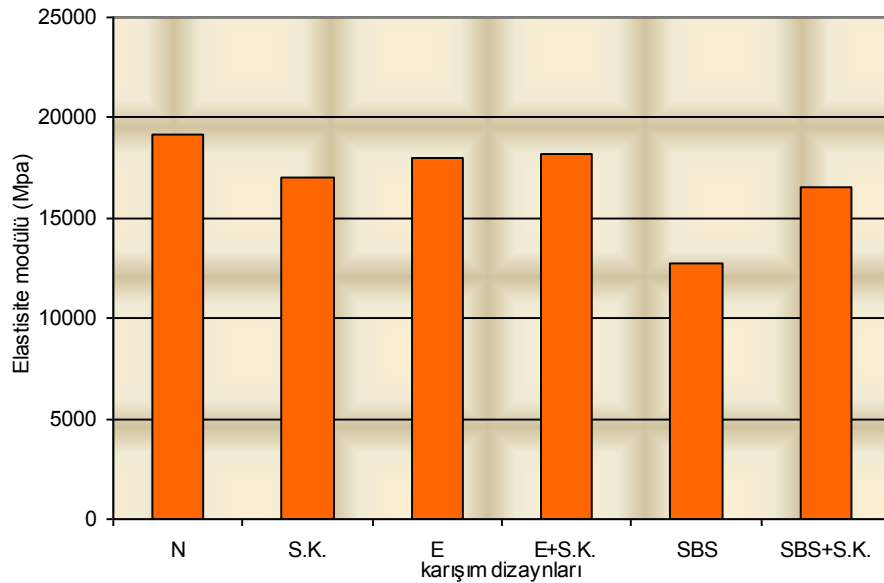
Şekil 59. Dolaylı Çekme Deneyi sistematığı

Esneklik modülünün sıcaklığa bağlı olarak değişimine baktığımızda; Şekil 60.'da görüldüğü gibi, esneklik modülü değerleri tüm karışımlarda en yüksek 5 °C'de, en düşük 40 °C'de bulunmuştur. Bulunan bu değerler, viskoelastik olarak davranan malzemelerin davranışı ile uyumludur.



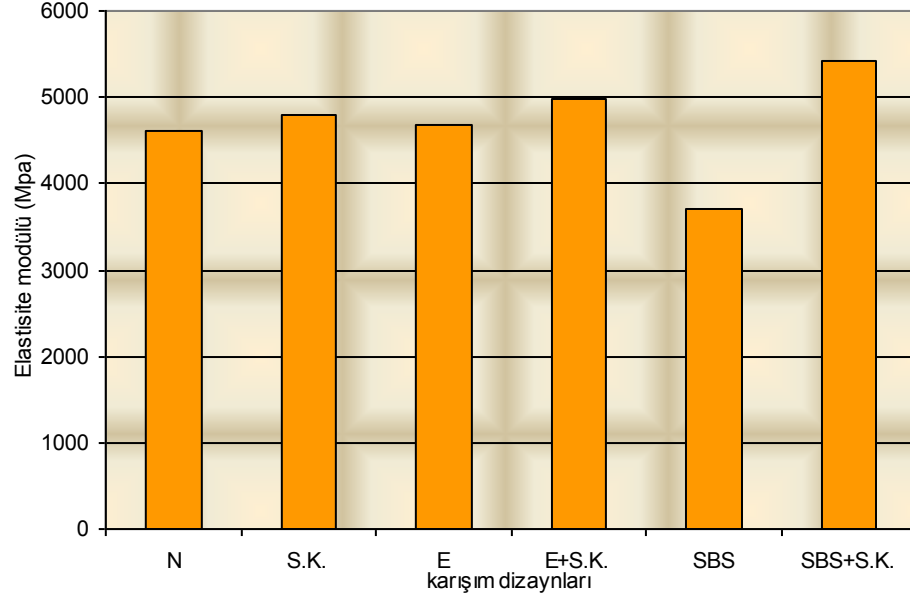
Şekil 60. Esneklik modülünün sıcaklığa göre değişimi

Şekil 61'den, Şekil 63.'e kadar esneklik modül değerlerinin karışım cinslerine göre değişimleri görülmektedir. Burada 5 °C'de en yüksek esneklik modülünün 19.208 Mpa ile "N" karışımlarda bulunduğu, diğer değerlerin 18.179 Mpa ile 12.709 Mpa arasında olduğu görülmektedir. "N" karışımlarda 5°C gibi düşük sıcaklıkta bulunan bu yüksek esneklik modülünün, "N" karışımların düşük sıcaklıklarda çatlak oluşmasına karşı nispeten daha az dirençli oldukları söylenebilir (Şekil 61).



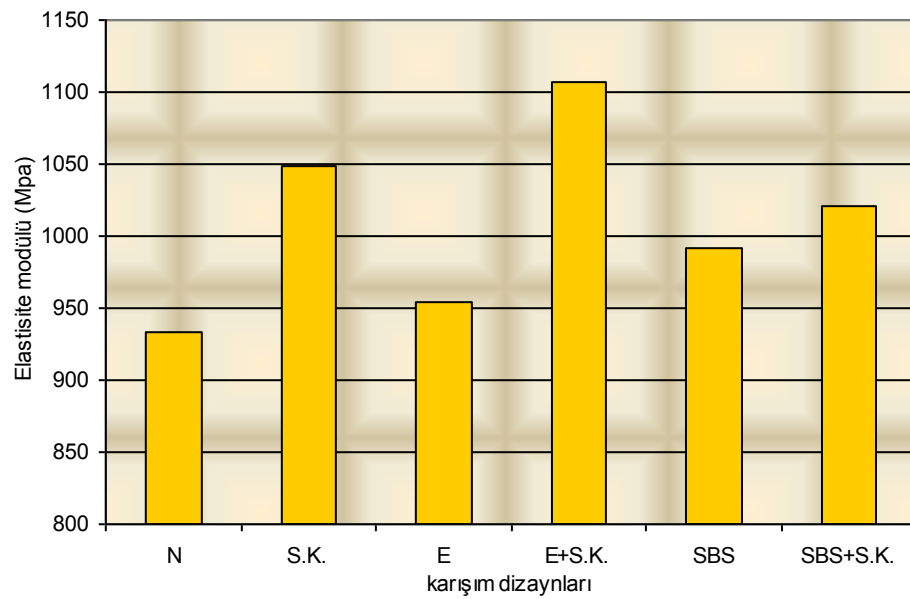
Şekil 61. Karışımların esneklik modülleri (sıcaklık 5 °C, yükleme hızı 60 ms)

Şekil 62’de görüldüğü gibi 25 °C en yüksek esneklik modülü 5.431 Mpa ile SBS+S.K.’li karışımda bulunmuş aynı sıcaklıkta sırasıyla S.K.+E, S.K., E, ve N karışım tasarımlarında yüksek esneklik modülleri (4976, 4795, 4686, 4615 Mpa) görülmüştür. En düşük esneklik modülü ise SBS (3699 Mpa) tasarımında görülmektedir.



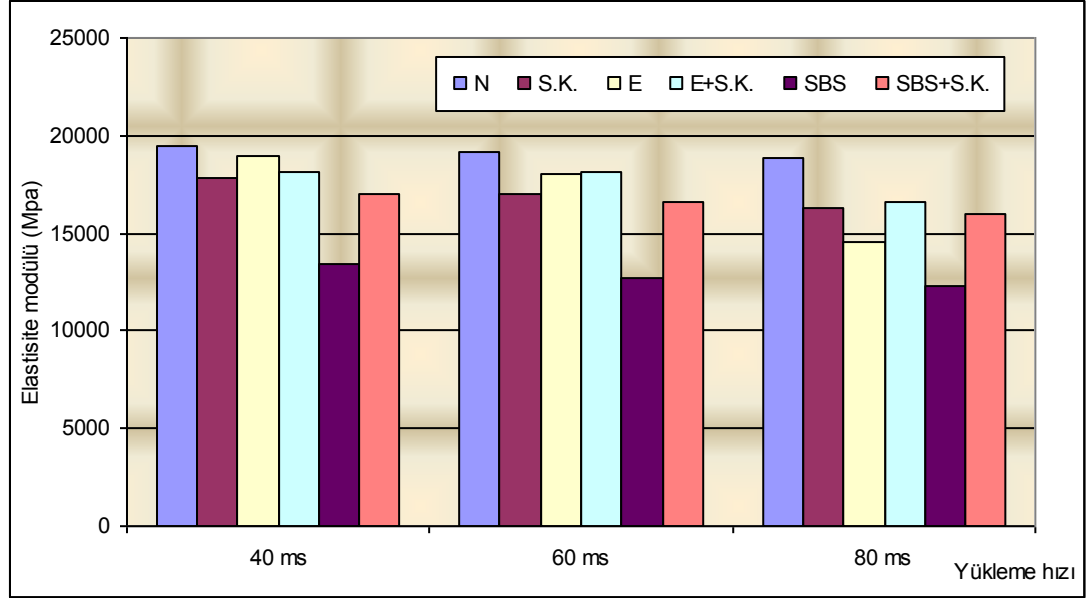
Şekil 62. Karışımların esneklik modülleri (sıcaklık 25 °C, yükleme hızı 60 ms)

40°C’de bulunan sonuçlar Şekil 70’de gösterilmiştir. Burada en yüksek esneklik modülleri 1107 Mpa ile S.K.+E, daha sonra 1048 Mpa ile S.K. ve 1021 Mpa ile SBS+S.K.’de bulunmuştur. En düşük esneklik modülü ise N (934 Mpa) tasarımında görülmektedir.

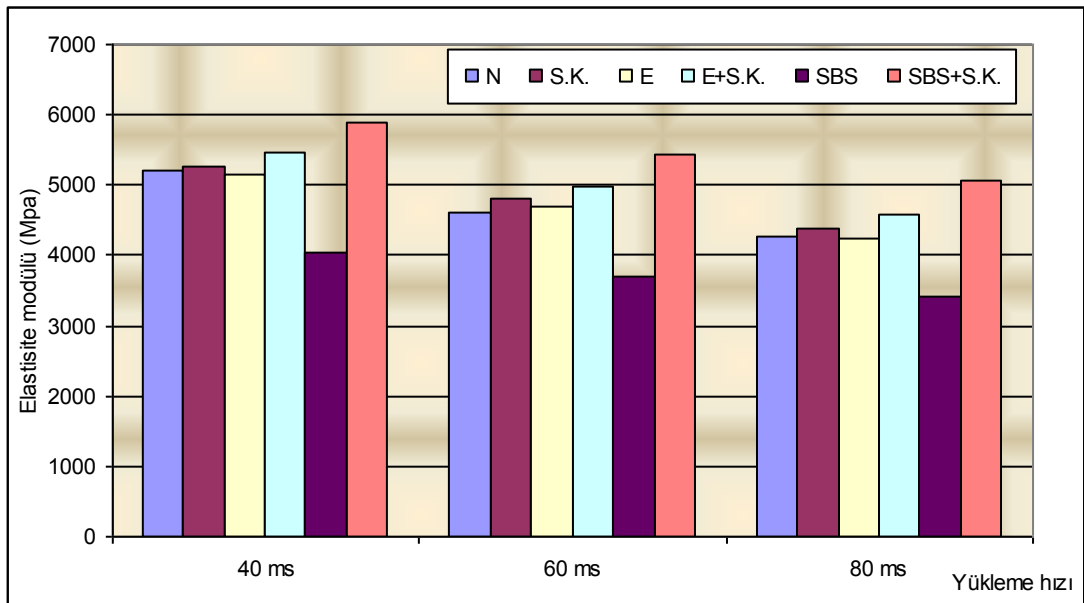


Şekil 63. Karışımların esneklik modülleri (sıcaklık 40 °C, yükleme hızı 60 ms)

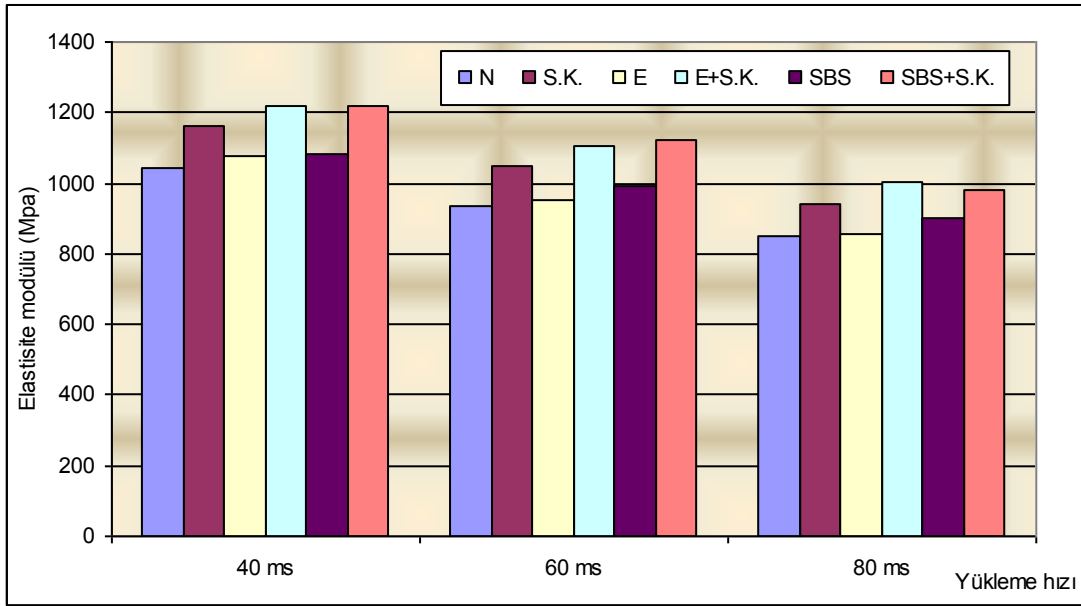
Yüksek sıcaklıklarda yüksek esneklik modüllerine sahip karışımların, bu sıcaklıklarda çatlak oluşumuna karşı en dirençli karışımlar olduğu söylenebilir. Şekil 64-66.'da ise, her bir sıcaklıkta esneklik modüllerin yükleme hızlarına bağlı olarak değişimleri verilmiştir.



Şekil 64. Karışımların esneklik modülü – yükleme hız ilişkisi (5 °C)



Şekil 65. Karışımların esneklik modülü – yükleme hız ilişkisi (25 °C)



Şekil 66. Karışımların esneklik modülü – yükleme hız ilişkisi (40 °C)

Esneklik modülü-yükleme hız ilişkisi sıcaklığa bağlı olarak incelendiğinde tekerrür süresi 2000 ms ve yükleme hızı 60 ms iken yüksek sıcaklıkta çatlak oluşumuna karşı en büyük direnç “E+S.K.” karışımında, ardından “S.K.” katkılı karışımında görülmektedir. Sonrasında sırasıyla “SBS+S.K.”, ”SBS.”, “E.” ve “N” şeklinde devam etmektedir. Sönmüş kirecin etkili bir katkı maddesi olduğu ve diğer katkı maddeleri ile birlikte ortaya koymuş olduğu performans rahatlıkla görülmektedir.

3.6.1. Yükleme Hızının Esneklik Modülü Üzerindeki Etkisi

1000 ms, 2000 ms ve 3000 ms tekerrür sürelerinin her biri için 40 ms, 60 ms ve 80 ms yükleme hızlarında deneyler yapılmıştır. Şekil 67.’de karışım tiplerine göre esneklik modülünün yükleme hızına göre değişimi verilmiştir. Yani yükleme hızının 80 ms’den 40 ms’ye çıkması durumunda esneklik modülündeki en fazla değişim (artış veya azalış) bulunmuş ve bu hesaplama aşağıdaki gibi yapılmıştır. Örnek olarak; S.K. karışım için, 25 °C’de bulunan esneklik modülleri Tablo 27.’de gösterilmiştir.

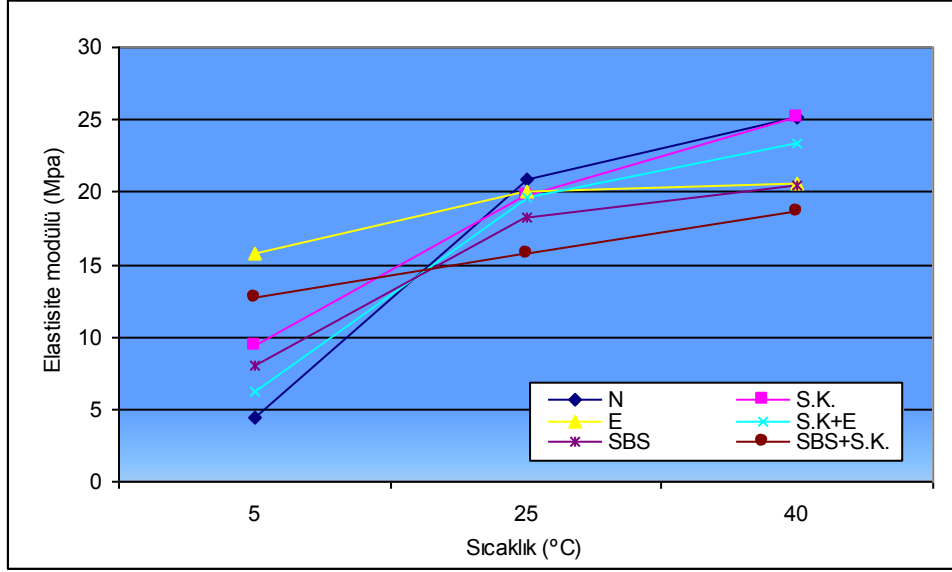
Tablo 27. 25 °C’de bulunan esneklik modülleri

Tekerrür Süresi (ms)	3000			2000			1000		
Yükleme Hızı (ms)	40	60	80	40	60	80	40	60	80
Esneklik Modülü (mpa)	5267	4837	4428	5268	4795	4374	5305	4830	4427

Yükleme hızının esneklik modülü üzerindeki ortalama değişim miktarı;

$$\text{Esneklik Modülü Değişim} = \frac{5267 + 5268 + 5305}{4428 + 4374 + 4427} - 1 \quad \text{olarak bulunmuştur.}$$

Bu şekilde her karışım türü için hesaplanan esneklik modülünün yükleme hızına göre ortalama değişim miktarları Şekil 67.'de gösterilmiştir.

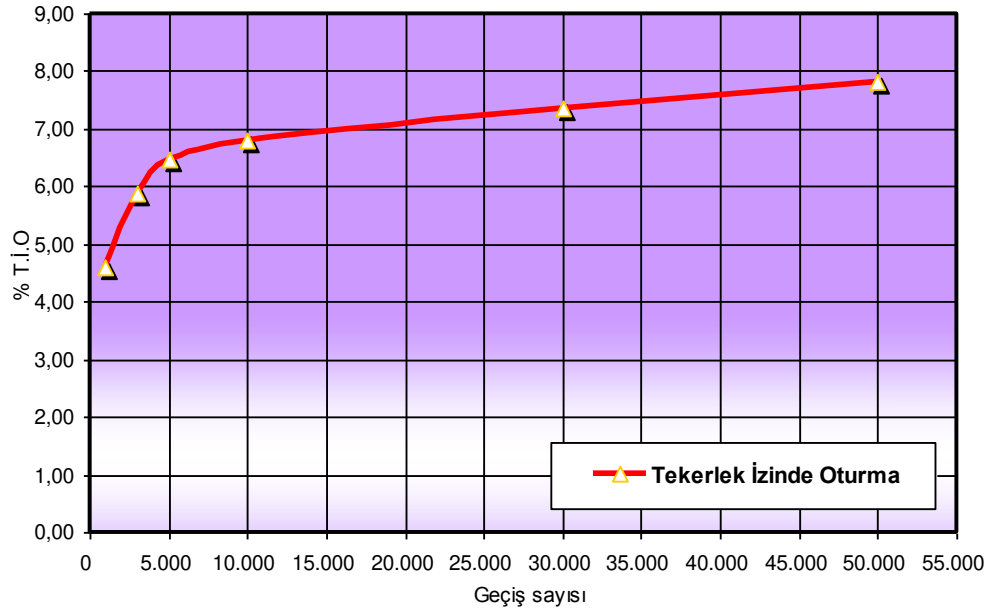


Şekil 67. Farklı sıcaklıklarda yüklem hızının esneklik modülü üzerindeki değişim yüzdesi

Şekil 67. incelendiğinde “S.K.” katkılı karışımda yüklem periyoduna göre, yüklem hızındaki değişim esneklik modüllerinde % 25,2'lere varan değişimler görülmektedir. Burada düşük sıcaklıkta (5 °C) yüklem hızı, esneklik modülünü ortalama % 9,4 oranında değiştirirken, 25 °C'de ortalama % 19,7 ve 40 °C'de % 25,2 oranında değiştirmektedir. Şekil 67.'de de görüldüğü gibi diğer karışımlarda da benzer durum gözlemlendiğinden, denebilir ki yüklem hızı orta ve yüksek ısılarda esneklik modülünü, düşük sıcaklıklara nazaran daha fazla değiştirmektedir.

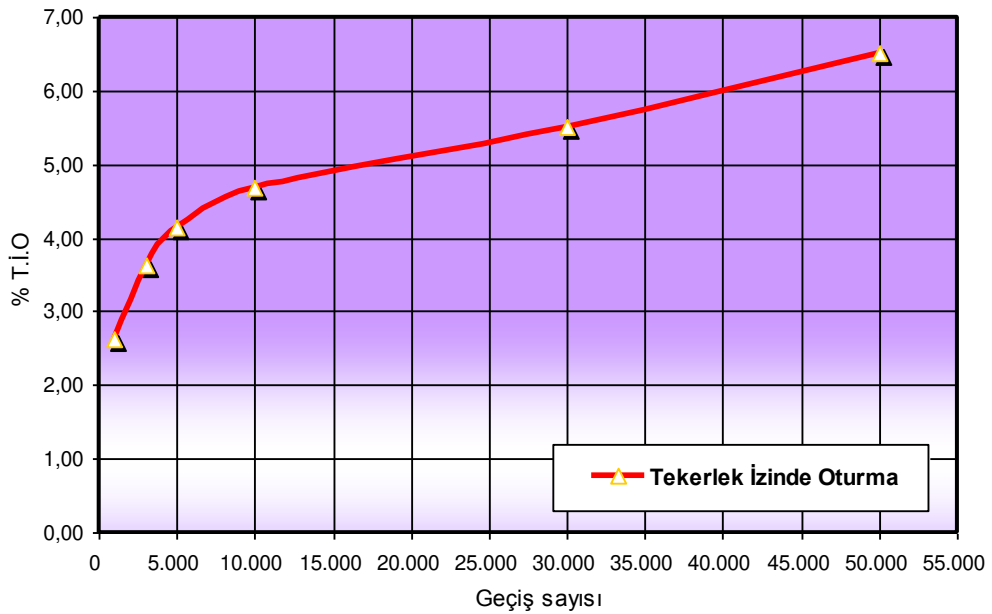
3.7. Tekerlek İzinde Oturma Deneyi Sonuçları

Tekerlek izi deneyinde tüm tasarımlar için hazırlanmış olan 6 çift slaba, deney ortamı 60°C'ye getirilmeden önce, 1000 devirlik bir ön sıkıştırma uygulanmıştır. Daha sonra sıcaklık ayarlanarak ölçümler alınmaya başlanmış, ölçümler 1000, 3000, 5000, 10000, 30000 ve 50000 olarak alınmıştır.



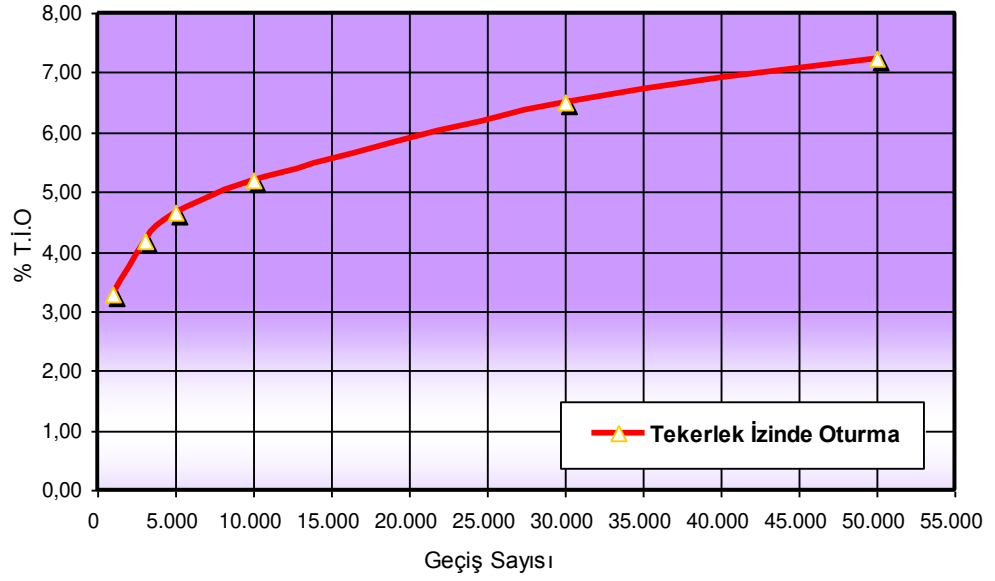
Şekil 68. Katkısız karışım tekerlek izinde oturma deneyi grafiği

KGM şartnamesinde, tekerlek izinde oturma değerinin (T.İ.O.) 30000 devirde en çok % 6 olarak verildiği göz önüne alındığında “N” karışımında bu değerin aşıldığı (% 7,35) görülmektedir.



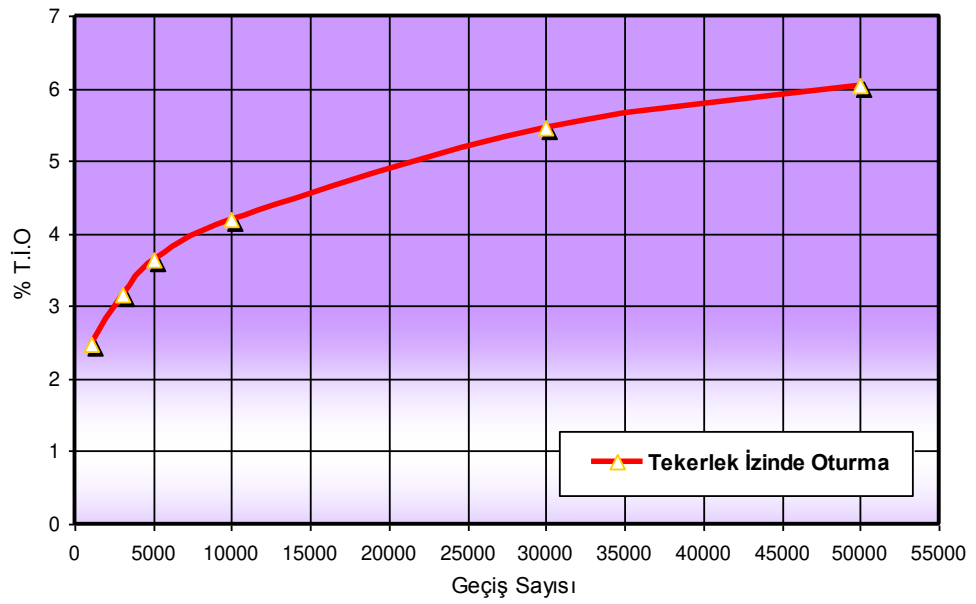
Şekil 69. Sönmüş kireç katkılı karışım tekerlek izinde oturma deneyi grafiği

“S.K.” katkılı karışımında 30000 devirdeki T.İ.O. değerinin % 5,5 olduğu görülmekte olup bu değer KGM şartnamesinde belirtilen değerin (% 6) altındadır.



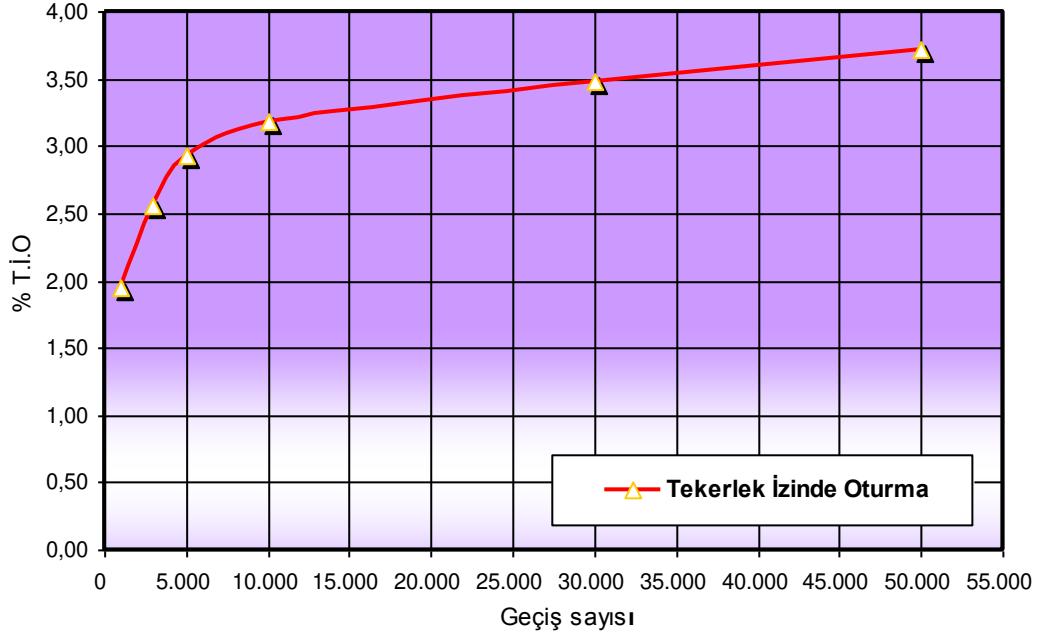
Şekil 70. Elyaf katkılı karışım tekerlek izinde oturma deneyi grafiği

“E” katkılı karışımında 30000 devirdeki T.İ.O. değeri % 6,49’dur. “N” katkılı karışımından sonra % 6 değerini aşan ikinci karışımın olarak gözlenmiştir.



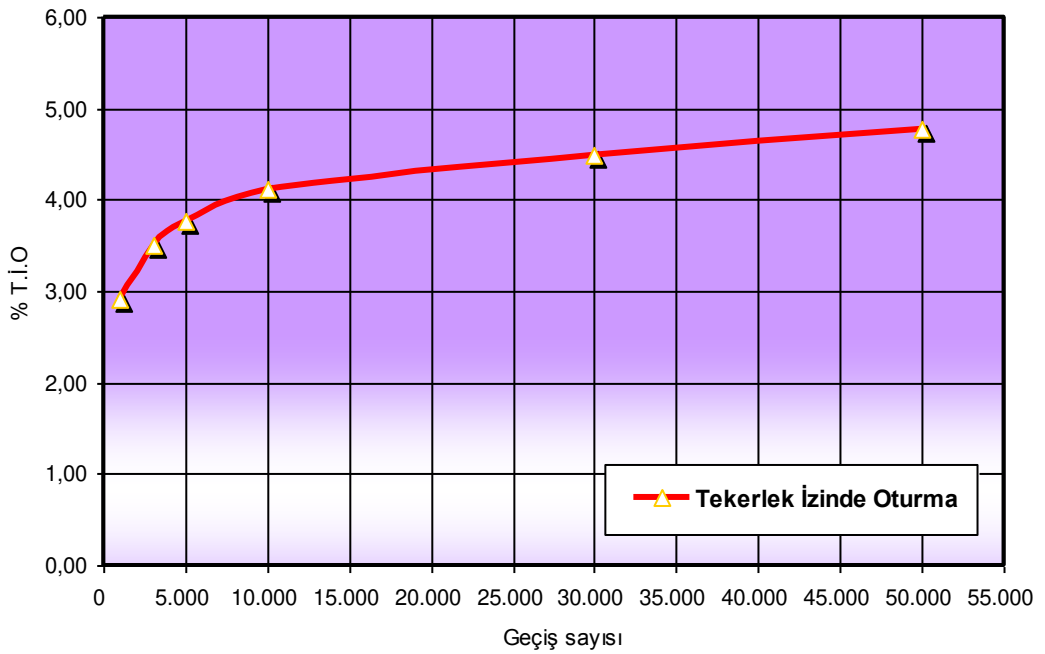
Şekil 71. Elyaf+Sönmüş kireç katkılı karışım tekerlek izinde oturma deneyi Grafiği

“E+S.K.” katkılı karışımın 30000 devirdeki T.İ.O. değerinin % 5,47 olduğu görülmektedir. Burada da % 6 değerinin aşılmadığı görülmektedir.



Şekil 72. SBS katkıli karışım tekerlek izinde oturma deneyi grafiği

“SBS” katkıli karışımın 30.000 devirdeki T.İ.O. değeri % 3,48 olarak gözlenmiştir. Bu karışımlar arasında en küçük oturma değeridir.

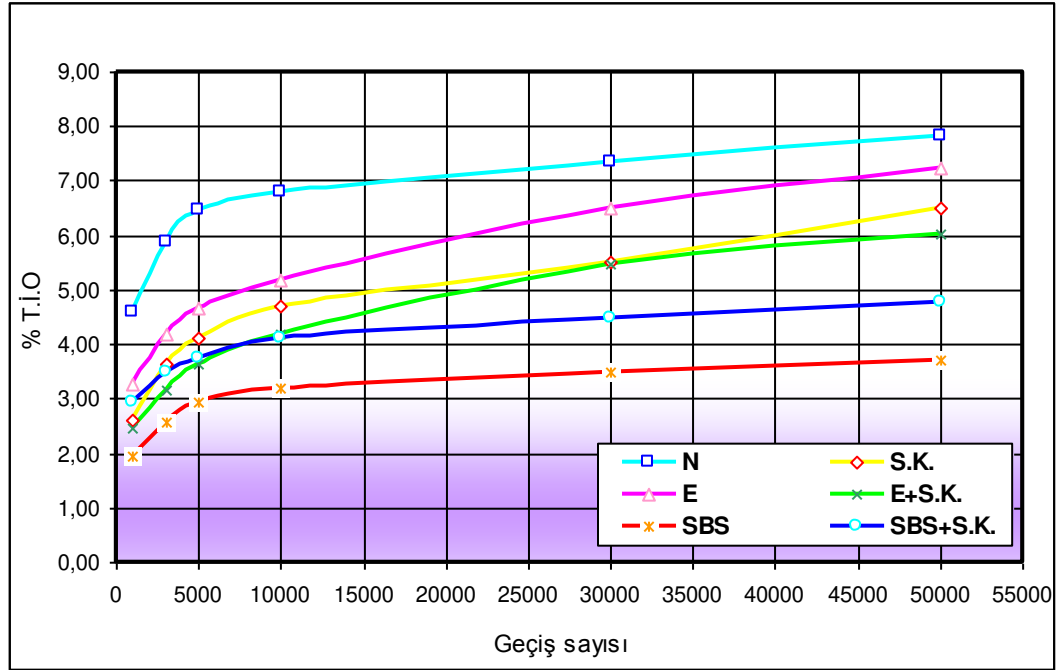


Şekil 73. SBS+Sönmüş kireç katkıli karışım tekerlek izinde oturma deneyi grafiği

“SBS+S.K” katkıli karışımın 30000 devirdeki T.İ.O. değeri % 4,48’dir. Bu değer, karışımlar arasında “SBS” katkıli karışımdan sonra en küçük değer olarak tespit edilmiştir.

T.İ.O değerleri içerisinde en büyük değere (% 7,35) sahip olan “N” karışım gösteriyor ki katkı maddeleri kullanılarak bu yüzdelerde gözle görülür azalmalar meydana getirilebiliyor.

Her bir tasarım için hazırlanmış olan birer çift numune (Slab) üzerinde yapılan tekerlek izinde oturma deneyi sonuçları karşılaştırma yapmaya yönelik olarak toplu halde Şekil 74.’de verilmiştir.



Şekil 74. Tekerlek izinde oturma deneyi tüm sonuçlar grafiği

Şekil 74.’te görüldüğü üzere T.İ.O. yüzdeleri yani plastik deformasyon oluşumları kıyaslandığında “Katkısız” (N) ve “Elyaf” katkılı tasarımların en yüksek seviyede oturma meydana getirmiş oldukları görülmektedir. ”SBS” katkılı tasarımın en düşük T.İ.O. değerini verdiği görülmekle beraber, “Elyaf+Sönmüş Kireç” katkılı tasarımın ve “SBS+Sönmüş Kireç” katkılı tasarımın T.İ.O. yüzdesinin Sönmüş Kireç” katkılı tasarımdan daha düşük olduğu görülmektedir. Sönmüş kireç ile elyafın birlikte kullanılması, bu iki katkı maddesinin yalnız başlarına kullanılmasından daha olumlu bir etki göstermektedir.

Genel olarak, yüksek asfalt içeriğinin yüksek plastik akma davranışına sebep olduğu bilinmektedir. Agrega yapısından ziyade asfalt çimentosu tarafından taşınmış yüklenmeler sonucunda ve agregada daneleri arasındaki içsel sürtünme kayıpları sebebi ile oluşan yüksek plastik davranış büyük kaplama deformasyonlarına yol açabilmektedir [124]. Bu bakımdan SMA karışımlarda agregada ve katkı maddesi seçiminde hassas davranmak gerekmektedir.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, dünyada gelişmiş ülkeler tarafından yaygın olarak kullanılan ve özellikle son yıllarda içinde kullanım oranı artarak devam eden SMA (Stone Mastic Asphalt) karışımların performansının artırılması hedeflenmiştir. Çalışmada, endüstriyel bir hammadde olan ve kullanım alanları oldukça geniş olan sönmüş kirecin katkı maddesi olarak kullanılmasının getireceği sonuçlar araştırılmıştır. Bu amaç doğrultusunda birbirinden farklı 6 adet karışım tasarımı gerçekleştirilmiş ve bu tasarımlar üzerinde Marshall Oranı, Bitüm Süzülme, Su Hasarı, Dolaylı Çekme, Dolaylı Çekme Mukavemeti, Tekrarlı Sünme ve Tekerlek İzinde Oturma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalardan ve deney çıktılarından yola çıkarak elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir.

1) Karayollarında; artan trafik hacmi, taşınan yüklerin artması, bunlara iklim ve yapım koşullarından gelen olumsuz etkilerin de katılmasıyla yorulma, tekerlek izi oluşumu (TİO) ve ondülasyon gibi kalıcı deformasyonlar oluşmaktadır. Yolların bozulma sebeplerinin başında ağır taşıtların etkili olduğu aşırı yüklemekten kaynaklanan plastik bir deformasyon türü olan tekerlek izi oluşumları meydana gelmektedir. Ağır taşıt trafiğinin esnek üstyapılarda oluşturduğu bozulmaları geciktirici karışım türü olarak SMA karışımların ön plana çıktığı görülmektedir.

2) SMA karışımların dünyada kullanım oranları artmaktadır. Avrupa ve dünyada sıcak karışım imalatlarında yön SMA karışımlara doğru giderken ülkemizin de bu durumun dışında kalamayacağı ve kullanım oranının artacağı kesindir. Yatırımlarımızın büyük bir kısmını dışarıdan aldığımız borçlarla finanse ettiğimiz düşünülürse, yaptığımız her türlü mühendislik imalatlarında kalite, ekonomi ve uzun ömür üçlüsü ön planda olmalıdır. Bu amaçla yol imalatlarımızda özellikle trafiği yoğun olan, ağır taşıt trafiği ve taşınan yüklerin büyük değerlerde olan kesimlerde, uzun ve büyük eğim değerlerine sahip yol kesimlerinde, ülke olarak, SMA karışım imalatlarının yapımını gerçekleştirecek planlamaları yapmalı ve uygulayıcı kararlar almalıyız. Ancak SMA karışımlar zengin bitüm ve bitümün süzülmesini önleyen selülozik elyaf (fiber) türü malzemeler içerdiği için normal bitümlü karışımlara göre daha maliyetli bir imalat türüdür. Bu noktada SMA karışımlar içindeki bitüm oranını düşüremeyeceğimiz ortadadır. O halde SMA karışımlar

içinde kullanılan fiber yerine geçebilecek bir malzeme düşünme durumu ortaya çıkmıştır. SMA karışımlar için, ülkemizde bol miktarda bulunan büyük rezervleri olan ve gösterdiği özellikler, kullanım alanları bakımından geniş bir yelpazeye sahip olan sönmüş kireç kullanılabilir bir katkı malzemesidir. Çalışmanın bulguları literatürle paralellik sergilemektedir. Sönmüş kirecin özellikle diğer katkılarla birlikte kaplama performansına olan etkisi açıkça görülmektedir. Bu bağlamda, maliyeti yüksek olan katkıların miktarları azaltılarak, sönmüş kireçle birlikte kullanılmalarının yaygınlaşması faydalı olacaktır.

3) Marshall metodu ile yaptığımız dizayn çalışmalarının sonucunda sönmüş kireç oranının çok fazla artmasının bitüm oranını artırdığı ayrıca karışımın işlenebilirliği bakımından bazı sıkıntılar çıkardığı, işlenebilirlik oranının düştüğü laboratuardaki çalışmalar sonucunda görülmüştür. Karışım içindeki optimum bitüm oranının artması istenilen bir şey değildir. Bu yüzden % 1 sönmüş kirecin SMA karışımlar için kullanılmasına karar verilmiştir. “Elyaf” katkılı karışım ile “Sönmüş kireç” katkılı karışımın dizayn değerlerini kıyaslayacak olursak; optimum bitüm oranı “Elyaf” katkılı karışım için % 6,43 “Sönmüş kireç” katkılı karışım için % 6,17, boşluk oranı “Elyaf” katkılı karışım için % 2,74, “Sönmüş kireç” katkılı karışım için % 3,24’dür. Diğer dizayn kriterlerinde de birbirine yakın değerler elde edilmiştir.

4) Marshall Oranı (Stabilite/akma) değerlerinde “Elyaf” ve “Sönmüş kireç” katkılı tasarımların birbirine yakın değerlerdedir. “SBS” katkılı tasarımda bu oran en büyük değere ulaşmıştır. SMA karışımlarda Sönmüş kirecin elyaf yerine rahatlıkla kullanılabilir olduğu açıkça görülmektedir.

5) Bitüm süzülme deneyinde en iyi sonuçları veren tasarımların tümünde sönmüş kireç yer almaktadır. En olumsuz değer ise katkısız tasarımda ortaya çıkmıştır. Bu değer en olumlu değer olan “SBS+Sönmüş kireç” katkılı tasarım değerine kıyasla 2 kat olduğu gözlenmiştir.

6) SMA karışımlarda dolaylı çekme deneyinde koşullu briketlerde “Sönmüş Kireç” katkılı tasarım “Elyaf+Sönmüş kireç “ katkılı tasarıma oranla %10, sadece “Elyaf” katkılı tasarıma oranla ise %4 daha iyi dayanım göstermiştir. Ayrıca “SBS+Sönmüş Kireç” katkılı tasarımın, sadece “SBS” katkılı tasarıma oranla %12 daha etkili olduğu görülmektedir. Koşulsuz briketlerde ise, “Elyaf+Sönmüş kireç” katkılı tasarımın “Sönmüş kireç “ katkılı tasarıma oranla %13, “Elyaf” katkılı tasarıma oranla ise %2 daha iyi dayanım göstermiştir. Ayrıca koşulsuz “SBS+Sönmüş Kireç” katkılı tasarımın, sadece “SBS” katkılı tasarıma oranla %14 daha etkili olmuştur. Bu noktada arazi şartlarına daha yakın olan ve suyun

karışımlar içindeki donma çözülme etkisiyle verdiği zararın anlaşılmasında etkili olan koşullu durumdaki değerler göz önüne alındığında Sönmüş kirecin elyaf katkı maddesinin yerini rahatlıkla tutabileceği, ayrıca elyafla birlikte kullanılmasının, sadece elyaf kullanıldığındaki dayanım değerlerinden daha olumlu sonuçlar doğurduğu görülmektedir.

7) Dolaylı Çekme Mukavemeti (40°C’de) bakımından en yüksek değer in SBS+Sönmüş Kireç katkılı karışımlarda elde edildiği görülmektedir. İkinci sırada ise SBS katkılı karışım gelmektedir. Burada Sönmüş Kirecin, SBS katkısı ile birlikte kullanıldığında meydana getirdiği çekme gerilmesi mukavemeti artışı dikkat çekmektedir. Ayrıca Elyaf katkılı karışım ile Sönmüş kireç katkılı karışım değerleri incelendiğinde ortaya çıkan paralellik, sönmüş kirecin fiber katkı maddesi olarak kullanılabilirliği ile ilgili verileri güçlendirmektedir.

8) Tekrarlı Sünme deneyi neticesinde 5°C’de bulunan deney sonuçları incelendiğinde, yük arttıkça deformasyonlarda en fazla artışın “Elyaf” katkılı karışımda olduğu görülmektedir. “SBS” katkılı karışım kalıcı deformasyon sıralamasında orta sıralarda yer alırken “SBS+S.K.” katkılı karışımda 5°C’de en az kalıcı deformasyon meydana geldiği görülmektedir. Sıcaklık artışıyla birlikte (5°C’den 25°C’ye) “SBS+S.K.” katkılı karışımdaki deformasyon değerlerinde artış gözlenmiş olup, en yüksek değerler “N” karışımlarda ve “E+S.K.” katkılı karışımlarda görülmektedir. En düşük kalıcı deformasyon değerinin 25°C’de “Elyaf” katkılı karışımda görülmesi de dikkat çekicidir. 40°C oluşan deformasyon değerinde “SBS” katkılı katkılı karışımın en az deformasyon değerine sahip olduğu görülüyor. “E+S.K.” ve “E” katkılı karışımlar 40°C’de büyük deformasyon değerleri göstererek yüksek sıcaklıklarda ağır taşıt trafiğine dirençli olmadıklarını göstermişlerdir.

9) Esneklik modül değerlerinin karışım cinslerine göre değişimi incelendiğinde 5 °C’de en yüksek esneklik modülünün 19.208 Mpa ile “N” karışımlarda bulunduğu, diğer değerlerin 18.179 Mpa ile 12.709 Mpa arasında olduğu görülmektedir. “N” karışımlarda 5 °C gibi düşük sıcaklıkta bulunan bu yüksek esneklik modülü ile “N” karışımların düşük sıcaklıklarda çatlak oluşmasına karşı nispeten daha az dirençli oldukları söylenebilir. Esneklik modülü-yükleme hız ilişkisi sıcaklığa bağlı olarak incelendiğinde tekerrür süresi 2000 ms ve yükleme hızı 60 ms iken yüksek sıcaklıkta çatlak oluşumuna karşı en büyük direnç “E+S.K.” karışımda, ardından “S.K.” katkılı karışımda görülmektedir. Sonrasında sırasıyla “SBS+S.K.”, “SBS.”, “E.” ve “N” şeklinde devam etmektedir. Sönmüş kirecin etkili bir

katkı maddesi olduğu ve diğer katkı maddeleri ile birlikte ortaya koymuş olduğu performans rahatlıkla görülmektedir.

10) SMA karışımların açık bir karışım granülometrisine sahip olması sebebiyle T.İ.O. oluşumlarını geciktirmede ilk sıradadır. Açık granülometriye sahip SMA karışımlar; üzerine trafik etkisinden gelen yüklerini kaba agregaların birbirine temas ederek birbirlerine aktarması ile plastik deformasyon oluşumunu yani kalıcı tekerlek izi oluşumunu azaltmaktadır. Tekerlek izinde oturma tayini sonuçlarına göre “Sönmüş Kireç” katkılı karışımlar; Karayolları Genel Müdürlüğü’nün 2006 yılı içinde hizmete sunduğu Karayolları Teknik Şartnamesi ilgili SMA bölümü dizayn kriterleri asında sayılan ve önemli bir dizayn kriteri olan 30000 devirde oluşacak maksimum % 6 TİO değerinin altında değerler ortaya koymuştur. “S.K.” katkılı karışımda 30000 devirde T.İ.O. değeri %5,5, “E+S.K.” katkılı karışımın %5,47, “SBS+S.K” katkılı karışımın ise % 4,48’dir. Bu karışımlar arasında “SBS” katkılı karışım en küçük değer (%3,48) olarak tespit edilmiştir. Tekerlek izinde oturma değerleri içerisinde en büyük değere (%7,35) sahip olan “N” karışım gösteriyorki katkı maddeleri kullanılarak bu yüzdelerde gözle görülür azalmalar meydana getirilmekte ve sönmüş kireç en az elyaf kadar oturma değerindeki düşüşlerde etkili olabilmektedir.

Bu çalışmanın devamı yönünde ileride yapılabilecek çalışmalar için şu öneriler sıralanabilir.

1) SMA karışımlarda sönmüş kireç uygulamasının diğer katkı maddelerine kıyasla özellikle kimyasal reaksiyonlar yönünün incelenmesinin, sıcak asfalt karışımlara özellikle de SMA karışımlara olan katkısının belirginleşmesi yönünden önemli bir katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Bunun için sönmüş kirecin özellikle farklı agrega cinsleri ile olan etkileşiminin incelenmesi ve uyumlu davranış sergilediği agrega tiplerinin tespit edilmesi yönündeki çalışmalar faydalı olacaktır.

2) Sönmüş kireç katkılı numunelerin diğer katkı maddelerine kıyasla SMA karışımlardaki davranışlarının incelenmesi yönünde daha uzun süreli ve farklı koşullandırmalar yöntemleri (Sıcaklık ,su banyosu süresi, koşullandırma tekrar sayısı v.b.) ve farklı performans derecelendirme yöntemleri kullanılarak da konu ele alınabilir.

5. KAYNAKLAR

1. OECD Road Transport Research, Full-scale pavement tests. Report prepared by an OECD Scientific Expert Group, Paris, 1985.
2. Bell, C. A., Sosnovske, D. ve Wieder J. A., Aging, binder validation, National Research Council, 1992, Washington D.C., 384-385.
3. Şamlıoğlu, K., Asfalt Katkı Maddelerinin Bitümlü Karışımların Davranışına Etkisi, Karayolları Vakfı Dergisi, Kasım-Aralık (1995), 22-28.
4. Institute, Mix Design Methods For Asphalt Concrete And Other Hot Mix Types, Manuel Series, Sixth Edition, 1985.
5. Tunç, A., Kaplama Mühendisliği ve Uygulamaları, Asil Yayın Dağıtım, Ankara, 2004.
6. Archilla, A. R., Development of a Pavement Rutting Model From Experimental Data, Journal of Transportation Engineering, August (2000), 291-293.
7. Ramanathan, K., Stallings, R.L., Newsome, J.R., Ultrasonic Technique For The Measurement Of Adhesion Of Asphalt To Aggregate, Journal Of Adhesion Science And Technology, 5, (1991), 181-190.
8. Vanelstraete, A. ve Verhasselt, A., "Effects of Hydrated Lime on the Rheological Properties of Mastics Before and After Aging and on the Behavior and Construction Aging of Mastics, Road Research Center, Brussels, Belgium.
9. Vallerga, B.A., Association Of Asphalt Paving Technologists, 1995, Symp. On Asphalt Durability, 538-560.
10. Heavy Duty Surfaces, The Arguments For SMA, EAPA, Netherlands 1998.
11. Petersen, J.C., Plancher, H., Harnsbergen, P.M., Lime Treatment Of Asphalt To Reduce Age Hardening And Improve Flow Properties, Proceedings, AAPT, (1987) 56.
12. Shuler, S., Douglas, I., Improving Durability Of Open-Graded Friction Courses, Transportation Research Record, 1259, (1990), 35-41.
13. Akili, W., The Effect Of Moisture On Laboratory-Prepared Asphalt Mixtures, Journal Of Testing And Evaluation, 21 (1993), 73-83.
14. Mohammed, L., Abadie, G.P., Mechanistic Evaluation Of Hydrated Lime in HMA Mixtures, TRB, 2000.

15. Cawsey, D.C., Raymond-Williams, R.K., Stripping Of Macadams: Performance Tests With Different Aggregates, Highways And Transportation, (1990), 16-21.
16. Corte JF, Brosscaud Y, Simonceli JP, Caroff G., Investigation of rutting of asphalt surface layers: influence of binder and axle load configurations, Transportation Research Board, (1994), 83-89.
17. Cooley, L. A., Kandhal, P. S., Buchanan, M. S., Fee, F., Epps, A., Loaded Wheel Testers in The United States: State of The Practice, Transportation Research E-Circular, U.S.A 2000.
18. Akzo Nobel, Adhesion Promoters, Technical Bulletin.
19. Scherocman, J.A., Construction of SMA Test Section in the USA.
20. İMO, Stone Mastik Asfalt ve Selüloz Fiber Stabilizasyonu, 1998, Bildiriler 176.
21. Yıldız, K., “Marshall Dizayn Metodu İle Optimum Bitüm Muhtevasının Belirlenmesinde Deney Parametrelerinin Sonuca Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2003.
22. Radenberg, M.,”Effect of Hydrated Lime Addition on the Deformation of Hot Mix Asphalt in the Wheel Tracking Test, Paper Presented at Lhoist HMA Symposiom, June 1998, Dusseldorf Germany.
23. Dunning, Kuroda vd., An Example Of Refuse Of Asphalt Mixture, Hoso (Pavement), Japan, 1976.
24. İnan, M., Cisimlerin Mukavemeti, İTÜ, İstanbul, 1981.
25. Brown E.R., Experience with SMA in the USA, 1993, NCAT, 93.
26. Umar, F., Ağar, E. “Yol Üstyapısı”, İstanbul Teknik Üniversitesi Yayını, İstanbul, 1991.
27. Mostafa AE, Gerardo WF, Imad LA., Quantitative Effect of Elastomeric Modification On Binder Performance at İntermediate And High Temperatures. Journal of Materials in Civil Engineering, 1 (2003), 32–40.
28. Verstraeten, J., Bituminous Materials with A High Resistance to Flow Rutting, Piarc Technical Committee on Flexible Roads, Paris, 1995.
29. Maupin, G.W., Effectiveness Of Anti-stripping In The Field, Virginia Transportation Research Council, U.S.A, 1995
30. Brown, E. R., Haddock, J. E., Crawford C., Investigation of Stone Matrix Asphalt Mortars, 1995, Transportation Research Record, 95-102.

31. Brown, E.R., Manglorker, H., Evaluation of Laboratory Properties of SMA Mixtures, 1993, NCAT Report, 93.
32. Aschenbrener T., Comparison of Results Obtained From The French Rutting Tester With Pavements of Known Field Performance., October 1992, Colorado Department of Transportation Report, 11.
33. Rogge, D. F., Leahy, R. B., Blair, R., Cold-In-Place (CIP) Recycling with Lime, July 1995, Transportation Research Instit., 23.
34. Atlas, R.M., Microbial Degradation Of Petroleum Hydrocarbons: An Environmental Perspective, Microbiology Review, 45 (1981), 180-209.
35. Crandall, R.C., A Report On Hydrated Lime For Use In Experimental Hot-Mix Asphaltic Concrete, 1961, Texas Highways, 8-13.
36. Verhasselt, A., F. S. Choquet, Comparing Field and Laboratory Aging of Bitumens on a Kinetic Basis, 1391 1993, Transportation Research Record, 30-38.
37. Slater, K., Phillips, P., Woodside, A.R. and Woodward, W. D. H., Assesing the Performance of SMA As a Surfacing in Urban Enviroment, Euroasphalt & Eurobitumen Congress, 1996.
38. Welborb, J.Y., Physical Properties As Related To Asphalt Durability; State of The Art, 999 1984, Transportation Research Record, 31-36.
39. Keyvanklıoğlu, N., Köprüler ve Viyadüklerde Kullanılan Modifiye Asfalt-Bazlı Yalıtım Örtüsü, 1. Asfalt Sempozyumu, 1996, Ankara, Bildiriler, 176-183.
40. Hunter, R.N., Bituminous Mixtures In Road Construction, Thomas Telford Services Ltd., Thomas Telford House, London 1994.
41. Johansson, L., Influence of Hydrated Lime On Bitumen Hardening, Licentiate Thesis, TRITA-IP FR 95-8, Royal Institute of Technology, Highway Engineering, Stockholm 1995.
42. Orhan, F., “Bitümlü Karışımlar Laboratuvarı Çalışmaları” T.C. Bayındırlık Ve İskan Bakanlığı, Karayolları Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı Üstyapı Şubesi Müdürlüğü, Ankara 2006.
43. Sağlık, A., Güngör, G. A., “Karayolları Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi”, T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Karayolları Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı Üstyapı Şubesi Müdürlüğü Yayını, Ankara 2006.
44. Parkinson, D., Five Years of U.K. Thin Surfacing, Highways & Transportation, (1997), 13-19.
45. Karayolları Teknik Şartnamesi, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Karayolları Genel Müdürlüğü, Yayın No: 267, Ankara, 2006.

46. Hınıslıoğlu, S., Açar E., Use of Waste High Density Polyethylene As Bitumen Modifier in Asphalt Concrete Mix, 2003.
47. Tunç, A., Esnek Kaplama Malzemeleri El Kitabı, Asil Yayın Dağıtım, Ankara, 2004.
48. Scherocman, J. A., Mix Design, Production and Placement and Compaction of Stone Mastic Asphalt Pavements, Annual Meeting of the American Association, USA, 1993,1-16.
49. Asphalt Institute, Cause and Prevention Of Stripping In Asphalt Pavements, College Park, Maryland, Educational Series-10.
50. Jones, G. M., The Effect of Hydrated Lime on Asphalt in Bituminous Pavements, NLA Meeting, Utah DOT, May 1997, 12.
51. Habib B. A., Zahw M. A., “A Study on Evaluation of Permanent in Hot Asphalt Concrete Mixes”, Rilem, 1997, 18.
52. Asphalt Institute, Cause and Prevention Of Stripping In Asphalt Pavements, College Park, Maryland 20740. Educational Series –10, Second Edition.
53. Johannson, L., Bitumen Aging and Hydrated Lime, Royal Institu of Technology, 1998, 22.
54. Ulmgren N, Functional Testing of Asphalt Mixes For Permanent Deformation By Dynamic Creep Test Modification of Method and Round Robin Test, Eurasphalt & Eurobitume Congress 1996, 11-15.
55. Kennepohl, J.A. vd., Stone Mastic Asphalt Trials in Ontorio, 1993, 142.
56. Ramaswamy, S.D., Low, E.W., The Effects Of Amino Antistrip Additives On Stripping Of Bituminous Mixes, Highways And Transportation, (1993), 9-13.
57. Tayfur S., “Taş Mastik Asfalt (SMA) Kaplamalar İçin Uygun Karışımın Araştırılması ve Bir Hizmet Ömrü Modeli Geliştirilmesi”, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2001.
58. Schmiedlin, R.B., Stone Mastic Asphalt, The Wisconsin Experience, 1616 1998, Transportation Research Record. 34-41.
59. Finke, F.L., A Report On Hydrated Lime For Use In Experimental Hot-Mix Asphaltic Concrete, Texas Highways, (1961), 18.
60. Bonnot, J., Bitümlü Bağlayıcılar ve Bitümlü Karışımlar Üzerine Avrupa Standartları Tasarıları, II.Asfalt Sempozyumu, 1998, Ankara, 22.

61. Van Dijck W., Practical Fatigue Characterization of Bituminous Mixes, Proceedings, The Association of Asphalt Paving Technilogist, (1975), 38.
62. Harris, B. M., Stuart, K. D., Analysis of Mineral Fillers and Mastics Used in Stone Matrix Asphalt, Association of Asphalt Paving Technologists, 64 (1995), 44-46.
63. Zoorob, S.E. and Suparma, L.B., Laboratory Design and Investigation of the Properties of Continuously Graded Asphaltic Concrete Containing Recycled Plastics Aggregate Replacement (plastiphalt), Cement&Concrete Composites, 22 (2000), 233-242.
64. Uluğtekin, E., Creep Properties Of Asphaltic Concrete Under Repeated Loading, ODTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Master tezi, Ankara, 1999.
65. Ilıcalı, M., Tayfur, S., Özen, H., Sönmez, İ., Eren, K., “Asfalt ve Uygulamaları”, Yıldız Teknik Üniversitesi Yayını, İstanbul, 2001.
66. Valkering CP, Lancon DJL, Hilster ED, Stoker DA., Rutting Resistance of Asphalt Mixes Containing Non-conventional and Polymer-modified Binders, AAPT Conference, February 1990, USA, 19-21.
67. Oruç Ş. “Yoğun Granülometrilili Emülsifiye Asfalt Betonunda Çimentonun Karışım Performansı Üzerindeki Etkisi”, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2002.
68. Şiş, A., Şartname Sınırlarındaki Agrega Granülometrisinin Asfalt Betonunun Fiziksel Özelliklerine ve Optimum Bitüm oranına Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2000.
69. P. Autret, A. de Boissoudy, J.-C. Gramsammer, Le manège de fatigue. Bulletin de liaison des Laboratoires des Fonts et Chaussées, 1997.
70. Postacıoğlu, B., Cisimlerin Yapısı ve Özellikleri, İTÜ, İstanbul, 1981.
71. Umar, F., Ağar, E., Yol Üst Yapısı, İTÜ, İstanbul, 1985.
72. TC Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Karayolları Genel Müdürlüğü, Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı, Bitümlü Karışımlar Laboratuvar El Kitabı, Ankara, 1993.
73. Kennepohl, J.A., Davidson, J.K., Introduction of SMA in Ontario., 2001.
74. Hınıslıoğlu S, Agar E, Use of the Waste High Density Polyethylene As Bitumen Modifier in Asphalt Concrete Mix., Materials Letters, 4640 2003.
75. Davies, J.T., and Rideal, E.K., Interfacial Phenomena, Academic Press, New York, 1963.

76. Freddy L. Roberts, P.S. Kandahl, E.R. Brown, D. Y. Lee and T.W. Kennedy, Hot mix asphalt materials, mixture design and construction, NAPA Education Foundation, Lanham (MD), 1991.
77. Winterkorn, H.F., Surface Chemical Aspects Of the Bond Formation Between Bituminous Materials and Mineral surfaces, Proceedings, The Association Of Asphalt Paving Technologists, 79-85.
78. KGM, SMA Karışım Taslak Şartnamesi, Ankara, 1998.
79. Hughes, I., Lamb, D.R., Pordes, O., Adhesion In Bitumen Macadam, 1960.
80. Hubbard, P., Adhesion of Asphalt To Aggregates In The Presence of Water, Proceedings, Highway Research Board, 238.
81. Brown S. F., Practical Test Procedures for Mechanical Properties of Bituminous Materials, 111 1995, Proc. Instn. Civ. Engrs. Transp., 289-297.
82. Yüce, R., The Influence of Some Dimensional Factors and Elastic Foundation Support on Fatigue of Asphalt Concrete, Doktora Tezi, ODTÜ, Ankara, 1972.
83. Asphalt Aggregate Mixture Analysis System (AAMAS), NCHRP Report, (1991), 338.
84. Raxler, R.N., Asphalt, Its Composition, Properties and Uses, Reinhold Publishing Corporation, New York, 1961.
85. Noureldin, A. S., Long Term Performance Of Asphalt Cement Binders; A Dual View, Physical Properties of Asphalt Cement Binders, American Society For Testing and Materials, Philadelphia 1995.
86. Lee, K.W., Prediction And Evaluation Of Moisture Effects On Asphalt Concrete Mixtures In Pavement Systems, Texas University, December 1982.
87. Hicks R.G. and Todd V.S., Life Cycle Costs For Lime In Hot Mix Asphalt, Report&Software for National Lime Association, 2001.
88. Mohamed, H.H., Stripping Of Asphalt Concrete Surfaces, Doctorate Thesis, Carleton University, Canada, 1993.
89. Scherocman, J.A., Mix Design, Production, Placement and Compaction of SMA Pavement., 1997.
90. Ilıcalı, M., Erdemir Cürufunun Yol Üstyapı Malzemesi Olarak Kullanılabilirliği, Doktora Tezi, YTÜ, İstanbul, 1988.
91. Öztürk, A., Çubuk, K., M., “Karayolu Esnek Üstyapı Tasarımında Yeni Bir Yöntem: Yüksek Performanslı Asfalt Kaplama”, Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 19(2) (2004), 175-184.

92. Kutluhan, S., Ağar, E., “Bitümlü Sıcak Karışımlarda Tekerlek İzi oluşumunun İncelenmesi”, 4. Ulusal Asfalt Sempozyumu, 2004 Ankara, Bildiriler, 213-223.
93. AASHTO T 283 Standard, Standard Method of Test for Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture Induced Damage,U.S.A, 2003.
94. Petersen, J.C., Chemical Composition of Asphalts As Related To Asphalt Durability; State of Art, Transportation Research Record, (1984), 13-30.
95. Saltan, M., Karaşahin, M., Esnek Üstyapıların Değerlendirilmesinde Tahribatsız Test Yöntemlerinin İncelenmesi,1.Ulusal Asfalt Sempozyumu, 1996, İstanbul.
96. KGM, SMA Şartnamesi (Özel), 1998.
97. Pavement Rutting Tester, Operating Manual, 1989.
98. Pendrys, J.P., Biodegradation of Asphalt Cement-20 By Aerobic Bacteria, Applied And Environmental Microbiology, 55 (1989), 62.
99. Chen J.S., Liao M.C., Evaluation of Internal Resistance in Hot Mix Asphalt Concrete, Construction and Building Materials, 16 (2002), 313-319.
100. TS 3720., Bitümlü Kaplama Karışımlarının Hesap Esasları Marshall ve Hubbart Field Metotları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 1983.
101. P. Autret, A. de Boissoudy, J.C. Gramsammer, Le manege de fatigue. Bulletin de liaison des Laboratoires des Fonts et Chaussees, No 155 1988.
102. TC Bayındırlık Bakanlığı, Karayolları Genel Müdürlüğü, Araştırma Dairesi Başkanlığı, Bitümlü Malzemeler Laboratuar El Kitabı, Yayın No 239, Ankara, 1988.
103. Caltabiano M.A., Waters T.J., The Effect of Sample Compaction On The Mix Characteristics. 8th AAPA International Asphalt Conference, 1991, Sydney Australia, 19.
104. Harvey, J., Lee, T., Sousa, J., Pak, J., ve Monismith C. L., Evaluation of Fatigue and Permanent Deformation Properties of Several Asphalt-Aggregate Field Mixes Using Strategic Highway Research Program A-003A Equipment, Transportation Research Record, 123-133.
105. ULUÇAYLI, M., Bitümlü karışımların tasarımında yeni gelişmeler “Yoğurmalı Pres”, YTMK., 1997.
106. Krutz, N.C., Stroup-Gardiner, M., Relationship Between Permanent Deformation Of Asphalt Concrete And Moisture Sensitivity, Transportation Research Record, 1259 (1990), 163-168.

107. Khudyakova, T.S., Rozental, D.A., Mashkova, D.A., Korshunova, I.A., Effect of Mineral Material On Adhesive Strength of Asphalt Mineral Mixtures, Chemistry And Technology of Fuels And Oils, 26 (1991), 646-648.
108. Lee, A.R., Adhesion In Relation To Bituminous Road Materials, Journal Of The Society Of Chemical Industry, 55 (1936), 23.
109. Ağır Yüklere Maruz Üstyapılar Taş Mastik Asphalt-SMA, Çeviri Editörü Zeliha Temren, Asfalt Mütahhitleri Derneği, (2005), 5-10, 17-19.
110. Epps, J. A., Hydrated Lime Hot Mix, Presentation Manual, FHWA, AASHTO, NLA, 1992.
111. Robertus C, Mulder EA, Koole RC. SBS Modified Bitumen for Heavy Duty Asphalt Pavements, Second International Conference on Roads and Airfield Pavement Technology, September 1995, Singapore.
112. Önal, A. M., Kahramangil, M., Bitümlü Karışımlar Laboratuvar El Kitabı, T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Karayolları Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı, Ankara, 1993.
113. Versraeten, J., The Use of Bituminous Mixes In Road Consriction And Measures Against Rutting, Fatigue And Thermal Cracking, Contribution To The JH'S Program, December, 1992, Tokyo.
114. Aksoy, A., Asfalt Kaplamalarda Kireç Taşı Petrografisi-Soyulma İlişkisi Üzerine Bir Araştırma, Doktora Tezi, KTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2001.
115. Lesueur, D., Little, D.N. ve Epps, J. A., Effect of Hydrated Lime On The Rheology, Fracture ve Aging of Bitumen and Asphalt Mixture,” Paper Presented at Lhoist HMA Symposium, June 1998, Dusseldorf Germany.
116. Lesueur, D., Little, D.N., Effect Of Hydrated Lime On Rheology, Fracture And Aging Of Bitumen, Transportation Research Board, (1999), 23.
117. Little D.N. and Epps J., The Benefits of Hydrated Lime In Hot Mix Asphalt, Report For National Lime Association, (2001), 13.
118. Little, D. N., Laboratory Testing Asphalt Mixture Incorporating Crushed River Gravel Stockpile Treated with Lime Slurry, Prepared for Chemical Lime Corporation, Texas Transportation Institute, 1994.
119. Loo, V.P.J., Practical Approach To The Prediction of Rutting in Asphalt Pavements: the Shell Method”, Transportation Research Board, (1976).
120. Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu, Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu Yapı Malzemeleri I Çalışma Grubu Raporu., Ankara, 2001.

121. Majidzadeh, K., Brovald F.N., State of The Art: Effect of Water On Bitumen Aggregate Mixtures, Highway Research Board Special Report, (1968), 98.
122. Majidzadeh, K., Stadler, R.R., Effect of Water On Behavior of Sand-Asphalt Mixtures Under Repeated Loading, Highway Research Record, (1969), 273.
123. Malkoç, G., Asfalt Çimentosunun Kimyasal Yapısı, Modifikasyona Etkisi ve Bu Kapsamda Ülkemiz Ürünlerinin Değerlendirilmesi, 3. Asfalt Sempozyumu, Ankara, 2000.
124. Mastrofini, D., Scarsella, M., The Application of Rheology To The Evaluation of Bitumen Aging, 2000, Fuel, 1005-1015.

6. EKLER

Çalışmada ele alınan tasarımlar için hazırlanmış olan silindirik briketlerin karakteristik özellikleri ve yapılan deney sonuçları ayrıntılı listeleri aşağıda yer alan Ek Tablolarda verilmiştir.

Ek Tablo1. Silindirik briketlerin karakteristikleri

Dizayn	B. N.	Boy Ort.	Hav. Ağ.	Su. Ağ.	D. Y. Ağ.	V	Dp
Katksız	1	63,1	1203,9	713,7	1205,5	491,8	2,448
	2	62,8	1197,9	711,6	1199,9	488,3	2,453
	3	62,6	1192,7	708,2	1194,6	486,4	2,452
	4	64,1	1223,0	724,9	1225,1	500,2	2,445
	5	63,3	1198,5	711,5	1200,7	489,2	2,450
	6	63,4	1205,4	715,4	1207,6	492,2	2,449
	7	63,3	1201,0	713,4	1203,2	489,8	2,452
	8	63,6	1206,0	714,3	1207,2	492,9	2,447
	9	63,9	1210,4	718,3	1212,1	493,8	2,451
	10	64,1	1206,1	715,2	1208,1	492,9	2,447
	11	63,4	1205,0	713,9	1206,1	492,2	2,448
	12	63,7	1203,2	715,7	1207,0	491,3	2,449
	13	64,2	1216,4	723,1	1218,4	495,3	2,456
	14	62,2	1189,2	706,7	1191,3	484,6	2,454
	15	63,2	1201,8	712,4	1203,7	491,3	2,446
	16	63,3	1196,9	709,4	1198,3	488,9	2,448
	17	63,6	1214,7	719,7	1215,7	496,0	2,449
	18	63,2	1210,4	719,4	1212,0	492,6	2,457
%1 S.Kireç	19	64,4	1202,8	711,2	1205,2	494,0	2,435
	20	63,3	1199,7	710,6	1202,7	492,1	2,438
	21	63,5	1204,1	713,7	1207,0	493,3	2,441
	22	64,2	1208,3	716,3	1210,9	494,6	2,443
	23	64,0	1207,1	715,6	1209,4	493,8	2,445
	24	63,5	1204,2	713,2	1206,6	493,4	2,441
	25	64,3	1204,0	712,0	1207,1	495,1	2,432
	26	64,5	1204,7	713,2	1206,9	493,7	2,440
	27	63,9	1211,2	717,9	1214,0	496,1	2,441
	28	65,5	1214,4	718,8	1216,3	497,5	2,441
	29	63,1	1195,0	717,5	1198,7	481,2	2,483
	30	63,6	1201,1	712,2	1204,7	492,5	2,439
	31	65,2	1208,4	717,6	1212,0	494,4	2,444
	32	64,4	1204,6	712,8	1207,3	494,5	2,436
	33	63,8	1198,7	710,9	1201,9	491,0	2,441
	34	64,5	1213,5	718,5	1215,4	496,9	2,442
	35	63,0	1194,3	706,9	1196,8	489,9	2,438
	36	64,5	1212,7	718,0	1215,7	497,7	2,437

Ek Tablo 1. devamı

%1 S.Kireç+ %0,6 Elyaf	37	65,1	1204,6	714,3	1208,4	494,1	2,438
	38	65,2	1206,8	715,5	1209,9	494,4	2,441
	39	64,6	1201,3	712,9	1204,6	491,7	2,443
	40	65,0	1205,9	713,8	1208,8	495,0	2,436
	41	65,5	1210,1	718,1	1213,4	495,3	2,443
	42	65,8	1226,2	728,5	1228,8	500,3	2,451
	43	64,2	1190,2	707,6	1194,0	486,4	2,447
	44	65,3	1206,4	716,0	1209,4	493,4	2,445
	45	65,6	1218,5	722,7	1220,0	497,3	2,450
	46	65,2	1222,2	725,7	1225,0	499,3	2,448
	47	64,4	1198,9	711,4	1201,5	490,1	2,446
	48	65,1	1206,5	714,7	1208,8	494,1	2,442
	49	65,2	1211,7	718,1	1214,5	496,4	2,441
	50	65,7	1219,0	722,3	1220,7	498,4	2,446
	51	65,5	1217,6	721,1	1219,5	498,4	2,443
	52	65,4	1216,5	722,2	1219,7	497,5	2,445
	53	66,1	1222,8	726,4	1225,3	498,9	2,451
	54	65,3	1214,2	719,4	1216,6	497,2	2,442
%0,6 Elyaf	55	64,6	1221,3	726,4	1224,1	497,7	2,454
	56	63,8	1193,8	708,1	1195,2	487,1	2,451
	57	64,5	1194,5	708,2	1196,1	487,9	2,448
	58	63,3	1213,7	718,6	1215,0	496,4	2,445
	59	64,7	1214,6	720,4	1216,2	495,8	2,450
	60	63,4	1199,2	711,7	1201,8	490,1	2,447
	61	64,2	1207,9	713,8	1209,0	495,2	2,439
	62	65,5	1214,2	719,5	1216,1	496,6	2,445
	63	64,1	1217,4	721,5	1218,8	497,3	2,448
	64	65,7	1215,9	721,7	1218,4	496,7	2,448
	65	63,1	1208,2	717,4	1210,1	492,7	2,452
	66	63,0	1206,2	714,3	1207,8	493,5	2,444
	67	63,7	1216,9	721,8	1218,3	496,5	2,451
	68	64,4	1209,4	718,2	1211,8	493,6	2,450
	69	63,5	1210,9	717,3	1212,2	494,9	2,447
	70	63,2	1201,7	711,4	1203,1	491,7	2,444
	71	65,7	1213,9	720,5	1215,6	495,1	2,452
	72	64,7	1214,3	720,5	1216,1	495,6	2,450
%5 SBS	73	63,7	1192,6	706,8	1193,8	487,0	2,449
	74	63,6	1209,5	716,8	1211,0	494,2	2,447
	75	66,1	1226,6	727,6	1228,0	500,4	2,451
	76	64,1	1211,0	718,4	1212,9	494,5	2,449
	77	64,1	1213,3	719,8	1214,6	494,8	2,452
	78	64,4	1210,2	717,0	1211,6	494,6	2,447
	79	64,2	1208,0	716,0	1209,9	493,9	2,446
	80	66,6	1219,3	723,4	1220,7	497,3	2,452
	81	64,7	1212,4	719,3	1213,6	494,3	2,453
	82	64,2	1212,0	719,3	1213,8	494,5	2,451
	83	64,0	1205,5	715,3	1207,7	492,4	2,448
	84	65,5	1217,2	722,4	1218,4	496,0	2,454
	85	65,2	1212,2	718,6	1214,2	495,6	2,446
	86	65,6	1214,5	721,0	1216,9	495,9	2,449
	87	65,8	1214,8	722,5	1217,9	495,4	2,452
	88	65,9	1216,8	720,5	1217,8	497,3	2,447
	89	65,4	1213,9	719,8	1215,3	495,5	2,450
	90	64,7	1207,7	716,9	1209,2	492,3	2,453

Ek Tablo 1. devamı

%5 SBS+ %1 S.Kireç	91	65,1	1219,6	721,3	1220,9	499,6	2,441
	92	64,7	1220,8	722,5	1222,0	499,5	2,444
	93	65,5	1213,3	717,9	1214,7	496,8	2,442
	94	64,1	1218,3	720,7	1220,0	499,3	2,440
	95	64,3	1207,3	715,6	1209,7	494,1	2,443
	96	64,5	1212,4	716,7	1213,8	497,1	2,439
	97	65,1	1224,1	724,6	1226,0	501,4	2,441
	98	64,8	1221,1	720,7	1223,0	502,3	2,431
	99	65,0	1224,2	724,2	1226,3	502,1	2,438
	100	65,8	1220,9	721,0	1222,0	501,0	2,437
	101	64,7	1217,0	720,4	1219,2	498,8	2,440
	102	65,1	1190,2	705,6	1193,0	487,4	2,442
	103	65,3	1196,2	708,2	1198,8	490,6	2,438
	104	65,7	1217,1	720,0	1218,8	498,8	2,440
	105	65,4	1204,4	713,9	1207,1	493,2	2,442
	106	65,9	1227,0	726,4	1228,0	501,6	2,446
	107	65,4	1223,5	724,2	1225,4	501,2	2,441
	108	66,8	1236,8	732,9	1238,7	505,8	2,445

Ek Tablo 2. Sudan hasarı deney sonuçları listesi

Katkısız Karışım					
Briket No:	Dp	Briket Yüksekliği (cm)	Yük (kg)	KOŞULLU İÇM (kg/cm ²)	KOŞULSUZ İÇM (kg/cm ²)
16	2,448	6,33	625	6,19	-
17	2,449	6,36	675	6,65	-
18	2,457	6,32	600	5,95	-
7	2,452	6,33	525	-	5,20
8	2,447	6,36	625	-	6,16
9	2,451	6,39	750	-	7,35
%1 Sönmüş Kireç Katkılı Karışım					
Briket No:	Dp	Briket Yüksekliği (cm)	Yük (kg)	KOŞULLU İÇM (kg/cm ²)	KOŞULSUZ İÇM (kg/cm ²)
34	2,442	6,45	600	5,83	-
35	2,438	6,30	600	5,97	-
36	2,437	6,45	600	5,83	-
25	2,432	6,43	675	-	6,58
26	2,440	6,45	550	-	5,34
27	2,441	6,39	560	-	5,49

Ek Tablo 2. devamı					
%0.6 Elyaf + %1 Sönmüş Kireç Katkılı Karışım					
Briket No:	Dp	Briket Yüksekliği (cm)	Yük (kg)	KOŞULLU İÇM (kg/cm2)	KOŞULSUZ İÇM (kg/cm2)
52	2,445	6,54	500	4,79	-
53	2,510	6,61	600	5,69	-
54	2,442	6,53	575	5,52	-
43	2,447	6,42	560	-	5,47
44	2,445	6,53	690	-	6,62
45	2,450	6,56	800	-	7,64
%0.6 Elyaf Katkılı Karışım					
Briket No:	Dp	Briket Yüksekliği (cm)	Yük (kg)	KOŞULLU İÇM (kg/cm2)	KOŞULSUZ İÇM (kg/cm2)
70	2,444	6,32	575	5,70	-
71	2,452	6,57	575	5,48	-
72	2,450	6,47	600	5,81	-
61	2,439	6,42	600	-	5,86
62	2,445	6,55	700	-	6,70
63	2,448	6,41	700	-	6,84
% 5 SBS Katkılı Karışım					
Briket No:	Dp	Briket Yüksekliği (cm)	Yük (kg)	KOŞULLU İÇM (kg/cm2)	KOŞULSUZ İÇM (kg/cm2)
88	2,447	6,59	775	7,37	-
89	2,450	6,54	900	8,62	-
90	2,453	6,47	775	7,51	-
79	2,446	6,42	950	-	9,27
80	2,452	6,66	725	-	6,82
81	2,453	6,47	925	-	8,96
% 5 SBS + %1 Sönmüş Kireç Katkılı Karışım					
Briket No:	Dp	Briket Yüksekliği (cm)	Yük (kg)	KOŞULLU İÇM (kg/cm2)	KOŞULSUZ İÇM (kg/cm2)
106	2,446	6,59	975	9,27	-
107	2,441	6,54	1000	9,58	-
108	2,445	6,68	800	7,50	-
97	2,441	6,51	925	-	8,90
98	2,431	6,48	975	-	9,43
99	2,438	6,50	1050	-	10,12

Ek Tablo 3. SBS katkılı tasarım için T.İ.O. deneyi sonuçları

ELEK	3/4"	1/2"	3/8"	#4	#10	#40	#80
% geçen	-	-	-	-	-	-	-
SOL AC 60/70 % Dp=				Vh=			
DEVİR	1.000	1.000	3.000	5.000	10.000	30.000	50.000
°C	24°C	60°C	60°C	60°C	60°C	60°C	60°C
A1	3,74	4,42	4,48	4,68	4,76	4,88	4,92
A2	3,10	4,59	4,64	4,91	5,20	5,27	5,60
A3	4,00	4,08	4,42	5,22	5,26	5,32	5,43
B1	5,22	5,80	5,92	5,98	6,08	6,15	6,34
B2	4,37	5,10	5,27	5,56	5,58	5,68	5,84
B3	4,26	4,40	4,53	4,94	4,97	5,04	5,15
C1	3,04	3,70	3,88	4,01	4,13	4,40	4,47
C2	3,31	4,27	4,48	4,80	4,92	5,18	5,19
C3	3,60	4,40	4,73	4,78	4,79	4,97	5,09
D1	3,23	4,56	4,83	4,91	4,97	5,20	5,25
D2	3,40	4,38	4,72	4,75	4,89	4,95	5,06
D3	3,64	4,18	4,30	4,55	4,68	4,72	4,73
E1	3,16	4,22	4,70	4,73	4,84	4,91	4,95
E2	4,04	5,15	5,40	5,46	5,52	5,62	5,78
E3	3,33	4,07	4,35	4,36	4,41	4,55	4,65
ORTL =	3,70	4,49	4,71	4,91	5,00	5,12	5,23
%TİO =	-	0,79	1,01	1,21	1,30	1,43	1,53
		1,58	2,03	2,43	2,61	2,85	3,07
SAĞ AC 60/70 % Dp=				Vh=			
DEVİR	1.000	1.000	3.000	5.000	10.000	30.000	50.000
°C	24°C	60°C	60°C	60°C	60°C	60°C	60°C
E3	4,57	5,04	5,25	5,30	5,47	5,72	5,90
E2	4,26	4,75	5,42	5,60	5,85	5,89	5,93
E1	3,80	4,48	5,14	5,22	5,31	5,66	5,74
D3	3,98	5,03	5,42	5,52	5,66	5,79	5,82
D2	3,69	4,77	5,08	5,29	5,37	5,71	5,76
D1	3,45	4,13	4,44	4,72	4,84	5,12	5,24
C3	3,94	5,08	5,29	5,40	5,47	5,68	5,88
C2	3,95	5,21	5,82	5,88	5,94	6,18	6,21
C1	3,70	4,95	5,53	5,69	5,83	5,87	5,95
B3	3,81	4,90	5,33	5,43	5,63	5,72	5,79
B2	3,80	5,52	6,04	6,22	6,64	6,74	7,03
B1	3,44	4,78	4,94	5,14	5,26	5,40	5,49
A3	5,46	7,14	7,45	7,89	7,97	7,99	8,14
A2	5,36	7,64	7,80	8,10	8,37	8,70	9,17
A1	4,90	6,04	6,32	6,44	6,59	6,71	6,87
ORTL =	4,14	5,30	5,68	5,86	6,01	6,19	6,33
%TİO =	-	1,16	1,54	1,72	1,87	2,05	2,19
		2,31	3,09	3,43	3,75	4,10	4,37
DEVİR =	1.000	1.000	3.000	5.000	10.000	30.000	50.000
ORT %TİO=	-	0,97	1,28	1,46	1,59	1,74	1,86

Ek Tablo 4. Katkısız tasarım için T.İ.O. deneyi sonuçları

ELEK	3/4"	1/2"	3/8"	#4	#10	#40	#80
% geçen	-	-	-	-	-	-	-
SOL AC 60/70 % Dp=				Vh=			
DEVİR	1.000	1.000	3.000	5.000	10.000	30.000	50.000
°C	24°C	60°C	60°C	60°C	60°C	60°C	60°C
A1	5,72	5,99	6,03	6,42	6,78	7,03	7,19
A2	4,95	6,99	7,48	8,09	8,18	8,43	8,92
A3	4,54	6,20	6,35	6,80	6,89	6,99	7,08
B1	3,57	5,98	6,51	6,60	6,82	7,16	7,43
B2	3,75	6,98	7,09	7,45	7,73	8,03	8,36
B3	4,17	6,03	6,39	6,43	6,61	6,73	6,94
C1	3,52	6,14	6,15	6,96	7,12	7,48	7,83
C2	3,88	6,32	7,00	7,14	7,29	7,61	7,85
C3	4,05	6,13	6,56	6,70	6,85	6,97	7,05
D1	3,07	6,02	6,13	6,59	6,63	7,07	7,31
D2	3,67	5,75	6,58	6,75	6,86	7,02	7,34
D3	3,50	5,45	5,81	5,95	5,98	6,14	6,38
E1	3,68	5,89	6,32	6,56	6,71	6,95	7,18
E2	4,20	6,26	6,40	6,85	6,94	7,77	8,11
E3	3,67	4,98	5,27	5,37	5,56	5,72	6,00
ORTL =	4,00	6,07	6,40	6,71	6,86	7,14	7,40
%TİO =	-	2,08	2,41	2,71	2,87	3,14	3,40
		4,16	4,82	5,43	5,73	6,29	6,80
SAĞ AC 60/70 % Dp=				Vh=			
DEVİR	1.000	1.000	3.000	5.000	10.000	30.000	50.000
°C	24°C	60°C	60°C	60°C	60°C	60°C	60°C
E3	3,37	5,33	5,40	5,50	5,69	5,86	5,97
E2	3,14	5,66	6,39	6,50	6,81	7,33	7,66
E1	3,24	6,28	6,62	6,75	6,90	7,30	7,59
D3	2,27	3,76	3,86	4,20	4,40	4,85	4,89
D2	2,22	5,32	6,05	6,20	6,52	6,80	7,04
D1	2,38	3,16	6,50	6,75	6,90	7,28	7,54
C3	1,75	3,70	4,37	4,47	4,66	4,90	5,11
C2	1,75	5,08	6,20	6,40	6,54	6,91	7,37
C1	1,57	4,94	5,99	6,26	6,55	6,87	7,11
B3	2,35	3,56	4,26	4,74	4,76	4,80	5,00
B2	2,43	5,30	6,44	6,63	6,74	7,14	7,40
B1	1,94	5,17	5,80	6,24	6,51	6,62	6,84
A3	2,45	4,90	5,60	6,48	6,57	6,69	6,79
A2	2,11	4,85	7,28	7,40	7,66	7,83	8,01
A1	2,44	5,97	6,84	7,03	7,13	7,29	7,41
ORTL =	2,36	4,87	5,84	6,10	6,29	6,56	6,78
%TİO =	-	2,50	3,48	3,74	3,93	4,20	4,42
		5,01	6,96	7,49	7,86	8,41	8,84
DEVİR =	1.000	1.000	3.000	5.000	10.000	30.000	50.000
ORT %TİO=	-	2,29	2,94	3,23	3,40	3,67	3,91

Ek Tablo 5. Elyaf+Sönmüş kireç katkılı tasarım için T.İ.O. deneyi sonuçları

ELEK	3/4"	1/2"	3/8"	#4	#10	#40	#80
% geçen	-	-	-	-	-	-	-
SOL AC 60/70 % Dp=				Vh=			
DEVİR	1.000	1.000	3.000	5.000	10.000	30.000	50.000
°C	24°C	60°C	60°C	60°C	60°C	60°C	60°C
A1	5,22	5,87	6,98	7,33	7,49	8,17	8,45
A2	5,50	8,38	8,66	8,91	9,19	9,84	9,98
A3	5,00	5,97	5,98	6,06	6,63	7,32	7,76
B1	4,46	5,47	5,96	6,20	6,53	7,03	7,40
B2	4,49	5,51	5,98	6,06	6,36	6,93	7,43
B3	4,99	6,21	6,31	6,35	6,48	6,84	6,99
C1	4,42	5,46	5,71	6,17	6,25	6,89	7,16
C2	4,73	6,12	6,36	6,50	6,85	7,81	8,11
C3	4,50	4,51	4,72	4,88	5,12	5,52	6,09
D1	4,46	5,29	5,64	5,87	6,06	6,51	6,94
D2	4,69	6,25	6,82	6,89	7,32	7,98	8,40
D3	3,93	4,91	5,00	5,06	5,30	5,72	6,11
E1	5,90	6,34	6,57	6,75	7,06	7,51	7,73
E2	4,88	6,94	7,15	7,53	7,96	8,35	8,62
E3	4,11	5,27	6,57	6,84	7,05	7,43	7,72
ORTL =	4,75	5,90	6,29	6,49	6,78	7,32	7,66
%TİO =	-	1,15	1,54	1,74	2,02	2,57	2,91
		2,30	3,08	3,48	4,05	5,14	5,81
SAĞ AC 60/70 % Dp=				Vh=			
DEVİR	1.000	1.000	3.000	5.000	10.000	30.000	50.000
°C	24°C	60°C	60°C	60°C	60°C	60°C	60°C
E3	3,78	4,51	4,91	5,17	5,64	5,79	5,86
E2	4,21	5,88	6,29	6,48	6,88	9,80	9,92
E1	3,88	5,08	5,43	5,70	6,21	8,76	9,34
D3	3,82	5,59	6,01	6,17	6,40	6,82	7,13
D2	3,88	5,97	6,26	6,43	6,84	7,60	7,91
D1	4,27	5,92	6,37	6,66	6,77	7,26	7,33
C3	4,48	5,35	5,40	5,62	5,72	6,04	6,14
C2	4,50	5,97	6,25	6,42	6,79	7,49	7,71
C1	5,35	6,68	7,33	7,68	7,86	8,15	8,24
B3	5,96	6,24	6,32	6,59	6,92	7,09	7,32
B2	4,95	6,34	6,77	7,08	7,26	7,73	8,26
B1	5,25	7,14	7,41	7,85	8,06	8,56	8,92
A3	4,79	5,88	5,93	6,20	6,43	6,60	6,70
A2	5,26	6,52	6,85	6,95	7,21	7,56	7,89
A1	5,44	6,63	6,75	7,09	7,53	8,06	8,10
ORTL =	4,65	5,98	6,29	6,54	6,83	7,55	7,78
%TİO =	-	1,33	1,63	1,88	2,18	2,90	3,13
		2,65	3,26	3,77	4,36	5,80	6,26
DEVİR =	1.000	1.000	3.000	5.000	10.000	30.000	50.000
ORT %TİO=	-	1,24	1,59	1,81	2,10	2,74	3,02

Ek Tablo 6. SBS+Sönmüş kireç katkılı tasarım için T.İ.O. deneyi sonuçları

ELEK	3/4"	1/2"	3/8"	#4	#10	#40	#80
% geçen	-	-	-	-	-	-	-
SOL AC 60/70 % Dp=				Vh=			
DEVİR	1.000	1.000	3.000	5.000	10.000	30.000	50.000
°C	24°C	60°C	60°C	60°C	60°C	60°C	60°C
A1	2,63	4,37	4,45	4,57	4,84	5,01	5,02
A2	2,66	3,84	4,25	4,30	4,48	4,85	4,96
A3	1,34	2,94	3,34	3,39	3,52	3,68	3,86
B1	2,72	4,91	5,25	5,38	5,60	5,72	5,88
B2	2,10	4,03	4,18	4,32	4,61	4,73	4,96
B3	2,32	3,80	3,99	4,10	4,29	4,46	4,54
C1	3,30	5,46	5,81	6,02	6,22	6,47	6,69
C2	3,20	5,25	5,75	5,88	6,15	6,38	6,65
C3	2,77	4,55	4,88	4,96	5,08	5,22	5,43
D1	3,41	5,60	6,00	6,18	6,40	6,68	6,79
D2	3,66	6,40	6,71	6,86	7,02	7,13	7,31
D3	3,48	4,87	5,01	5,14	5,21	5,47	5,48
E1	4,73	7,07	7,44	7,59	7,70	7,75	7,99
E2	4,71	6,88	7,24	7,30	7,47	7,68	7,90
E3	4,17	5,34	5,46	5,48	5,55	5,65	5,75
ORTL =	3,15	5,02	5,32	5,43	5,61	5,79	5,95
%TİO =	-	1,87	2,17	2,28	2,46	2,65	2,80
		3,75	4,34	4,57	4,93	5,29	5,60
SAĞ AC 60/70 % Dp=				Vh=			
DEVİR	1.000	1.000	3.000	5.000	10.000	30.000	50.000
°C	24°C	60°C	60°C	60°C	60°C	60°C	60°C
E3	3,32	4,22	4,26	4,31	4,49	4,58	4,69
E2	3,54	5,03	5,10	5,31	5,33	5,61	5,90
E1	3,69	4,82	5,10	5,18	5,26	5,35	5,45
D3	3,70	4,59	4,62	4,88	5,06	5,13	5,17
D2	3,39	4,14	4,25	4,53	4,63	4,76	4,79
D1	3,54	4,71	4,72	5,06	5,33	5,46	5,53
C3	4,08	4,64	5,06	5,10	5,21	5,37	5,62
C2	4,38	4,53	4,61	4,73	5,01	5,25	5,38
C1	3,68	4,35	4,71	4,73	4,93	5,11	5,15
B3	3,65	4,30	4,54	4,56	4,89	5,25	5,26
B2	3,14	4,76	5,23	5,36	5,62	5,84	5,97
B1	4,16	5,66	5,88	6,10	6,36	6,40	6,67
A3	4,60	5,81	5,99	6,35	6,40	6,91	6,99
A2	5,01	6,31	6,85	6,89	7,03	7,10	7,46
A1	4,49	6,18	7,39	7,46	7,52	7,78	7,81
ORTL =	3,89	4,94	5,22	5,37	5,54	5,73	5,86
%TİO =	-	1,05	1,33	1,48	1,65	1,84	1,96
		2,09	2,66	2,96	3,29	3,67	3,93
DEVİR =	1.000	1.000	3.000	5.000	10.000	30.000	50.000
ORT %TİO=	-	1,46	1,75	1,88	2,05	2,24	2,38

Ek Tablo 7. Sönmüş kireç katkılı tasarım için T.İ.O. deneyi sonuçları

ELEK	3/4"	1/2"	3/8"	#4	#10	#40	#80
% geçen	-	-	-	-	-	-	-
SOL AC 60/70 % Dp=				Vh=			
DEVİR	1.000	1.000	3.000	5.000	10.000	30.000	50.000
°C	24°C	60°C	60°C	60°C	60°C	60°C	60°C
A1	5,77	7,35	7,40	7,43	7,83	8,06	8,48
A2	5,28	6,37	6,73	6,96	7,20	7,65	8,15
A3	5,14	5,91	6,09	6,15	6,43	6,56	6,99
B1	4,86	7,06	7,51	7,78	8,09	8,65	9,29
B2	5,64	7,03	7,60	7,69	8,04	8,64	9,40
B3	5,03	5,81	6,04	6,22	6,56	6,96	7,33
C1	5,78	7,73	7,97	8,04	8,36	8,75	9,21
C2	5,82	7,10	7,38	7,75	7,91	8,31	9,30
C3	4,83	5,31	5,53	5,74	5,93	6,32	6,71
D1	4,76	5,73	6,21	6,34	6,59	6,92	7,37
D2	5,27	6,30	8,57	8,65	8,81	9,02	9,35
D3	6,30	7,90	8,04	8,15	8,37	8,59	8,96
E1	6,33	7,03	7,60	7,80	8,13	8,55	9,38
E2	6,13	8,06	8,71	8,90	9,59	10,03	10,21
E3	5,46	6,11	6,29	7,03	7,08	7,15	7,27
ORTL =	5,49	6,72	7,18	7,38	7,66	8,01	8,49
%TİO =	-	1,23	1,68	1,88	2,17	2,52	3,00
		2,45	3,37	3,76	4,34	5,03	6,00
SAĞ AC 60/70 % Dp=				Vh=			
DEVİR	1.000	1.000	3.000	5.000	10.000	30.000	50.000
°C	24°C	60°C	60°C	60°C	60°C	60°C	60°C
E3	6,78	7,26	7,84	8,01	8,30	8,66	9,54
E2	7,55	8,50	8,65	10,70	10,96	11,43	12,26
E1	7,40	8,85	9,42	9,68	10,20	10,59	11,19
D3	6,46	8,19	8,24	8,25	8,41	8,81	9,47
D2	7,85	9,83	10,07	10,31	10,60	11,04	12,02
D1	6,54	8,28	9,24	9,41	10,30	10,63	10,75
C3	6,69	7,74	8,09	8,46	8,78	9,24	10,14
C2	6,68	7,98	8,60	8,80	9,19	9,45	10,60
C1	6,52	10,44	10,83	10,93	10,98	11,03	11,45
B3	6,68	7,12	8,50	8,51	8,54	9,29	9,36
B2	6,56	8,20	8,97	9,32	9,52	10,31	10,72
B1	6,00	7,66	8,53	8,77	9,03	9,26	9,75
A3	7,39	7,65	7,94	8,21	8,30	8,73	8,81
A2	6,13	7,43	7,56	7,76	8,03	8,49	8,53
A1	6,30	7,30	8,07	8,18	8,26	9,32	9,57
ORTL =	6,77	8,16	8,70	9,02	9,29	9,75	10,28
%TİO =	-	1,39	1,93	2,25	2,52	2,98	3,51
		2,79	3,87	4,50	5,05	5,97	7,02
DEVİR =	1.000	1.000	3.000	5.000	10.000	30.000	50.000
ORT %TİO=	-	1,31	1,81	2,07	2,35	2,75	3,25

Ek Tablo 8. Elyaf katkılı tasarım için T.İ.O. deneyi sonuçları

ELEK	3/4"	1/2"	3/8"	#4	#10	#40	#80
% geçen	-	-	-	-	-	-	-
SOL AC 60/70 % Dp=				Vh=			
DEVİR	1.000	1.000	3.000	5.000	10.000	30.000	50.000
°C	24°C	60°C	60°C	60°C	60°C	60°C	60°C
A1	5,28	6,51	6,84	7,04	7,16	7,34	7,87
A2	5,67	6,49	6,95	7,10	7,12	8,11	8,33
A3	5,54	5,70	5,78	6,14	6,60	6,85	7,27
B1	4,82	5,87	6,05	6,48	6,52	6,67	7,41
B2	4,76	6,19	6,29	6,67	6,75	7,21	7,72
B3	5,66	6,01	6,24	6,54	6,68	6,71	7,22
C1	5,07	6,13	6,42	6,66	6,91	7,49	7,75
C2	4,38	5,44	5,72	5,89	6,11	6,67	7,03
C3	4,18	4,87	5,17	5,28	5,47	5,87	6,23
D1	5,03	6,42	6,98	7,11	7,21	8,05	8,45
D2	5,02	6,39	6,60	6,70	6,85	7,34	7,73
D3	4,59	5,40	5,48	5,80	6,15	6,41	6,56
E1	4,82	5,64	5,82	6,34	6,75	7,20	7,42
E2	4,95	5,03	5,83	5,93	6,10	6,56	7,00
E3	5,96	6,35	6,38	6,60	6,85	7,07	7,16
ORTL =	5,05	5,90	6,17	6,42	6,62	7,04	7,41
%TİO =	-	0,85	1,12	1,37	1,57	1,99	2,36
5 cm için		1,69	2,24	2,74	3,13	3,98	4,72
SAĞ AC 60/70 % Dp=				Vh=			
DEVİR	1.000	1.000	3.000	5.000	10.000	30.000	50.000
°C	24°C	60°C	60°C	60°C	60°C	60°C	60°C
E3	4,67	6,42	6,95	7,21	7,77	8,55	8,96
E2	5,29	8,50	9,10	9,42	9,78	10,46	10,90
E1	4,51	7,52	8,22	8,35	8,77	9,33	9,82
D3	4,08	5,75	5,84	5,88	5,90	6,99	7,45
D2	4,34	7,18	8,05	8,30	8,40	9,80	10,17
D1	4,61	7,29	7,84	8,30	8,65	9,50	9,86
C3	3,23	4,97	5,66	5,93	6,11	6,95	7,36
C2	4,06	7,49	8,29	8,31	8,79	9,55	10,00
C1	3,73	6,71	7,36	7,92	7,93	9,33	9,74
B3	3,03	5,22	5,64	5,84	6,18	7,08	7,09
B2	3,10	6,21	6,90	7,24	7,67	8,80	8,91
B1	2,35	5,41	5,99	6,20	6,53	7,32	7,42
A3	2,80	4,45	5,60	5,75	6,00	6,55	6,68
A2	4,09	5,22	5,79	5,92	6,20	7,01	7,73
A1	2,99	5,08	5,58	5,70	6,54	7,18	7,96
ORTL =	3,79	6,23	6,85	7,08	7,41	8,29	8,67
%TİO =	-	2,44	3,06	3,29	3,62	4,50	4,88
5 cm için		4,87	6,12	6,59	7,25	9,00	9,76
DEVİR =	1.000	1.000	3.000	5.000	10.000	30.000	50.000
ORT %TİO=	-	1,64	2,09	2,33	2,59	3,24	3,62

Ek Tablo 9. Marshall oranı deneyi sonuçları

Briket No	Bitüm % (Wa)	Bitüm Mik.(gr)	Yükseklik (mm)	Havada ki Ağırlık (A)	Havadaki Ağırlık (gr) Doy. Yüzey (B)	Sudaki Ağırlık (C)	Hacmi (V)	Pratik Özgül Ağırlık (Dp)	Akma (mm)		Stabilite (kN.)	Düzeltilme Faktörü TS3720	Tahsis Edilmiş Stabilite (kg)	Akma inç
									(B - C)	(A / V)				
10	Katıksız		64,1	1206,1	1208,1	715,2	492,9	2,447	4,95		8,40	0,975	835	1,95
11			63,4	1205,0	1206,1	713,9	492,2	2,448	5,33		7,99	1,003	817	2,10
12			63,7	1203,2	1207,0	715,7	491,3	2,449	5,72		8,63	0,995	875	2,25
ORTALAMA								2,448	5,33				842	2,10
28	%1 S. Kirec		65,5	1214,4	1216,3	718,8	497,5	2,441	4,06		7,63	0,951	740	1,60
29			63,1	1195,0	1198,7	717,5	481,2	2,483	5,08		7,57	1,011	780	2,00
30			63,6	1201,1	1204,7	712,2	492,5	2,439	4,70		7,83	0,998	797	1,85
ORTALAMA								2,454	4,61				772	1,82
46	%1 S.Kireç+%0,6 Elyaf		65,2	1222,2	1225,0	725,7	499,3	2,448	5,21		8,88	0,957	866	2,05
47			64,4	1198,9	1201,5	711,4	490,1	2,446	4,83		9,08	0,978	905	1,90
48			65,1	1206,5	1208,8	714,7	494,1	2,442	5,33		8,46	0,960	828	2,10
ORTALAMA								2,445	5,12				866	2,02
64	%0,6 Elyaf		65,7	1215,9	1218,4	721,7	496,7	2,448	4,83		6,86	0,947	662	1,90
65			63,1	1208,2	1210,1	717,4	492,7	2,452	4,57		8,52	1,011	878	1,80
66			63,0	1206,2	1207,8	714,3	493,5	2,444	4,57		8,40	1,013	867	1,80
ORTALAMA								2,448	4,66				803	1,83
82	% 5 SBS		64,2	1212,0	1213,8	719,3	494,5	2,451	3,68		10,83	0,982	1084	1,45
83			64,0	1205,5	1207,7	715,3	492,4	2,448	6,22		11,55	0,988	1163	2,45
84			65,5	1217,2	1218,4	722,4	496,0	2,454	6,10		11,12	0,951	1078	2,40
ORTALAMA								2,451	5,33				1108	2,10
100	% 5 SBS+%1 S.Kireç		65,8	1220,9	1222,0	721,0	501,0	2,437	7,49		10,70	0,945	1031	2,95
101			64,7	1217,0	1219,2	720,4	498,8	2,440	5,08		11,24	0,970	1111	2,00
102			65,1	1190,2	1193,0	705,6	487,4	2,442	4,32		10,09	0,960	987	1,70
ORTALAMA								2,440	5,63				1043	2,22

Ek Tablo 10. Katkısız tasarım için dolaylı çekme deneyi sonuçları

Sıcaklık	Sıra No.	3000 (3)						2000 (2)						1000 (1)					
		40 (4)		60 (6)		80 (8)		40 (4)		60 (6)		80 (8)		40 (4)		60 (6)		80 (8)	
		µε	E	µε	E	µε	E	µε	E	µε	E	µε	E	µε	E	µε	E	µε	E
5 °C	13	5,906	19271	6,734	17267	6,734	17465	6,348	18657	6,458	18169	6,679	18383	6,569	18571	6,679	18387	6,9	18039
		6,458	18512	6,569	18280	6,845	17703	6,79	17662	7,066	17068	7,507	16201	6,569	18437	6,514	18689	7,231	16966
	14	6,679	17986	6,348	18781	6,293	19173	6,403	18953	6,624	20140	6,955	18997	6,348	20000	6,293	20096	6,679	19645
		6,293	19285	6,293	19821	6,9	18719	5,796	20688	6,734	19457	6,9	19446	5,962	21085	6,514	20345	6,679	19557
	15	6,238	19195	6,79	19398	7,01	18550	5,906	20439	6,569	20064	6,624	19772	5,741	21186	6,79	19368	6,734	19511
		6,017	19961	6,293	20565	6,569	19479	5,796	20677	6,569	20350	6,458	20387	5,603	21443	6,569	19891	6,79	19083
25 °C	ort	6,265	19035	6,504	19019	6,725	18515	6,173	19513	6,67	19208	6,854	18864	6,132	20120	6,56	19463	6,836	18800
	13	29,64	4861	33,06	4149	36,54	3717	29,31	4636	35,99	3823	37,48	3476	30,36	4351	36,54	3628	40,08	3292
		24,9	5505	28,04	4878	30,86	4372	25,89	5217	28,32	4778	31,08	4311	26,44	5143	29,09	4698	31,41	4284
	14	26,33	5303	29,09	4894	31,19	4510	26,39	5431	29,04	4880	31,13	4521	26,44	5469	28,98	4923	30,97	4591
		26,99	5323	28,87	4890	31,02	4468	26,22	5379	29,92	4688	31,63	4347	26,72	5266	31,57	4475	32,35	4281
	15	26,33	5186	28,65	4791	29,92	4547	25,61	5403	29,26	4769	30,3	4543	26	5372	29,86	4751	30,58	4573
40 °C		26,99	5116	29,37	4716	30,69	4469	26,94	5161	29,53	4750	31,08	4450	26,55	5311	29,53	4844	30,75	4554
	ort	26,86	5216	29,51	4720	31,7	4347	26,73	5204	30,34	4615	32,12	4275	27,08	5152	30,93	4553	32,69	4262
	13	89,42	1508	105,4	1270	125,6	1053	108,2	1225	121,6	1086	132,9	992,2	115,5	1150	127,7	1036	143,8	917,4
		117,1	1020	131,5	915,7	142	845,2	126,5	943,9	141,7	849,4	154,1	778,4	131,5	916,5	143,5	893,9	151	801,7
	14	111,5	1238	136,8	985,6	154	858,8	129,1	1034	144,3	919,5	156,3	844,4	129,9	1023	142,7	923	154,4	848,4
		132,1	962,3	146,8	877,6	161,1	794,8	136	941,5	148,7	871	160,4	802,4	133,3	968,3	148,5	866,1	159,7	809,4
15		95,33	1409	113,2	1181	131,8	999,5	116,8	1126	133,9	983,8	150,5	867,7	124,6	1056	138,2	954,9	154	848,7
		131,2	981,1	147,3	878,7	160,4	794,6	131,3	983	144,2	895,5	155,8	822,8	129	1001	141	922,6	146	880,3
	ort	112,8	1186	130,2	1018	145,8	891	124,6	1042	139,1	934,2	151,6	851,3	127,3	1019	140,3	932,7	151,5	851

Ek Tablo 11. Sönmüş kireç katkılı tasarım için dolaylı çekme deneyi sonuçları

SICAKLIK	SIRA NO.	3000 (3)						2000 (2)						1000 (1)					
		40 (4)		60 (6)		80 (8)		40 (4)		60 (6)		80 (8)		40 (4)		60 (6)		80 (8)	
		µε	E	µε	E	µε	E	µε	E	µε	E	µε	E	µε	E	µε	E	µε	E
5 °C	31	5,906	20278	6,403	19143	6,569	18504	6,017	20131	6,403	19866	6,679	18978	5,575	20895	6,514	19854	6,458	19804
		5,741	20143	6,238	20222	6,679	18899	5,299	21950	6,017	20136	6,182	19669	5,962	20345	6,238	19729	6,348	19201
	32	6,845	16882	7,342	15721	7,728	14988	7,342	15627	7,231	15712	7,949	15293	7,176	16413	7,507	15669	7,728	15064
		6,679	16373	7,286	16105	7,949	14874	7,176	16517	7,507	15735	7,899	15023	6,845	16390	7,507	15859	8,225	15025
	33	7,673	16075	7,838	15094	7,949	14947	6,9	16653	7,728	14971	8,335	14096	7,066	16411	7,949	14732	8,225	15005
25 °C		6,845	17134	7,728	15463	8,17	14784	7,286	16290	7,562	15813	8,17	14724	7,121	16635	7,618	15730	8,28	14676
	ort	6,615	17814	7,139	16958	7,507	16166	6,67	17861	7,075	17039	7,536	16297	6,624	17848	7,222	16929	7,544	16463
	31	24,4	5162	25,83	4987	27,32	4643	23,52	5555	26,05	5078	28,54	4603	23,79	5521	26,33	5068	28,65	4606
		23,85	5414	26,33	4920	28,87	4457	24,34	5314	26,61	4908	28,87	4493	24,18	5396	26,16	5020	28,7	4546
	32	25,23	5289	27,54	4823	30,3	4353	25,83	5125	28,54	4662	31,19	4228	25,89	5160	29,15	4618	31,19	4289
40 °C		26,39	4974	29,48	4470	31,85	4096	26,33	4998	29,81	4456	32,29	4073	26,77	4971	29,92	4489	31,91	4161
	33	24,12	5486	26,72	5032	29,53	4505	25,01	5377	27,38	4934	29,53	4522	24,9	5444	27,77	4918	30,08	4496
		25,06	5277	27,77	4793	28,87	4515	25,23	5238	28,1	4735	30,47	4327	24,95	5336	27,54	4870	29,75	4464
	ort	24,84	5267	27,28	4837	29,46	4428	25,04	5268	27,75	4795	30,15	4374	25,08	5305	27,81	4830	30,05	4427
	31	97,7	1299	114,2	1105	127,8	981,1	108,9	1151	121	1040	133,4	934,4	111,8	1118	124,6	1006	136,1	917
40 °C		115,1	1051	128,3	947,5	143	851,4	120,3	1007	134,7	906,2	148,3	822	122,6	995,5	134,2	911,3	147,3	834,5
	32	76,23	1761	94,06	1399	108,6	1179	95,16	1363	104,3	1236	116	1095	98,37	1321	107,6	1201	115	1112
		97,1	1298	107,3	1178	117,1	1060	101,1	1253	112,5	1119	123	1013	105,8	1196	116,4	1089	126,5	994,7
	33	96,77	1388	123,2	1071	133,9	966,2	112,4	1165	123,7	1055	137,2	941,9	116,1	1127	127,2	1033	137,6	942,9
	ort	119,3	1060	130,9	974	141,5	893,7	124	1019	135,7	933,1	152,4	835,9	128,2	992,3	140,2	916,9	150,3	852
		100,4	1310	116,3	1112	128,7	988,5	110,3	1160	122	1048	135	940,2	113,8	1125	125	1026	135,5	942,1

Ek Tablo 12. Elyaf +Sönmüş kireç katkılı tasarım için dolaylı çekme deneyi sonuçları

SICAKLIK	SIRA NO.	3000 (3)						2000 (2)						1000 (1)					
		40 (4)		60 (6)		80 (8)		40 (4)		60 (6)		80 (8)		40 (4)		60 (6)		80 (8)	
		µε	E	µε	E	µε	E	µε	E	µε	E	µε	E	µε	E	µε	E	µε	E
5 °C	49	6,79	16809	6,79	17186	7,618	16132	6,624	16778	6,734	17637	7,397	16651	6,79	18028	7,562	16488	8,004	15579
		6,845	17534	7,286	16763	7,286	16733	6,514	18430	6,845	17816	7,342	16813	7,066	17173	7,176	17273	7,507	16436
	50	6,845	18254	7,121	17569	7,673	16204	6,79	17859	6,9	18353	7,728	16132	6,845	17820	6,845	18101	7,231	17040
		6,845	17411	6,624	18353	7,176	17596	6,458	18398	6,955	18360	7,452	17112	6,238	19676	7,176	17963	6,569	19440
	51	6,845	17074	6,845	17596	6,845	17453	6,734	17660	6,79	18501	7,838	16083	6,514	19685	7,121	17733	7,121	17734
25 °C		6,679	18427	7,231	16850	7,231	17055	6,458	19575	6,624	18404	7,452	16666	6,9	18006	6,845	18133	6,734	18609
	ort	6,808	17585	6,983	17386	7,305	16862	6,596	18117	6,808	18179	7,535	16576	6,725	18398	7,121	17615	7,194	17473
	49	24,12	5336	26,28	4892	28,43	4515	24,12	5317	26,55	4893	27,99	4580	24,01	5403	26,39	4962	27,71	4665
		22,63	5627	25,34	5058	27,71	4561	23,63	5438	25,78	4990	27,93	4566	23,96	5397	26,11	5003	28,04	4610
	50	23,02	5640	26,94	4843	29,53	4346	23,96	5426	27,49	4739	29,2	4407	24,78	5273	27,54	4758	28,92	4483
40 °C		24,45	5240	27,77	4621	30,08	4206	25,17	5090	27,49	4695	30,42	4197	24,73	5218	27,77	4682	30,08	4291
	51	23,52	5792	25,39	5292	27,16	4810	22,85	5763	25,01	5283	26,83	4831	23,02	5721	24,9	5299	26	4975
		22,63	5700	24,67	5231	26,72	4773	22,63	5687	24,67	5255	26,33	4877	22,41	5793	24,4	5358	26,22	4912
	ort	23,4	5556	26,06	4990	28,27	4535	23,73	5453	26,16	4976	28,11	4576	23,82	5467	26,18	5010	27,83	4656
	49	100,6	1330	119,6	1132	132,5	1017	112,7	1209	123,8	1097	137,3	984,9	116,7	1163	131,3	1039	136,6	991,3
40 °C		118,2	1124	132,4	1010	145,5	918,1	120,2	1111	134,2	997,4	148,8	898,8	124,9	1083	136,8	987	144,5	923,8
	50	86,72	1563	100,5	1326	116,2	1119	97,15	1338	108,6	1195	119,9	1074	97,54	1318	109,8	1175	120,3	1060
		101,7	1234	112,9	1111	126,7	981,7	106,7	1165	118,2	1062	130,9	956,2	107,8	1166	117,9	1068	134,9	934,9
	51	93,84	1434	111,3	1182	121,2	1066	101,3	1271	110,5	1162	119,8	1060	99,97	1278	108,5	1180	117	1084
		100,4	1225	109,8	1134	120,8	1029	100,5	1222	110,5	1128	120,3	1036	99,25	1230	108,9	1145	117	1071
	ort	100,2	1318	114,4	1149	127,1	1022	106,4	1219	117,6	1107	129,5	1002	107,7	1206	118,9	1099	128,4	1011

Ek Tablo 13. Elyaf katkılı tasarım için dolaylı çekme deneyi sonuçları

SICAKLIK	SIRA NO.	3000 (3)						2000 (2)						1000 (1)					
		40 (4)		60 (6)		80 (8)		40 (4)		60 (6)		80 (8)		40 (4)		60 (6)		80 (8)	
		µε	E	µε	E	µε	E	µε	E	µε	E	µε	E	µε	E	µε	E	µε	E
5 °C	67	6,127	19930	7,01	17842	6,845	18200	6,458	18981	6,79	18291	7,01	17851	6,072	20298	6,679	18771	7,121	17628
		6,293	19432	6,569	18599	7,066	17652	6,624	18946	6,624	19453	7,121	18080	6,293	19974	6,679	19268	7,176	18017
	68	7,342	18063	7,455	17778	8,059	16321	7,397	17711	7,673	17107	7,838	16587	7,397	17333	7,673	17357	7,507	17598
		7,066	18468	7,838	16696	7,949	16338	7,066	18155	8,114	16098	7,949	16435	7,342	17773	8,28	16134	7,949	16534
	69	7,01	19481	6,734	19244	7,783	17301	6,9	19719	7,286	18707	7,562	17,87	7,231	18992	7,618	18035	7,618	17931
25 °C		7,121	19176	7,176	18931	7,673	17495	6,845	20015	7,397	18374	7,452	18144	7,01	19512	7,452	18380	7,949	17191
	ort	6,826	19092	7,131	18182	7,562	17218	6,882	18921	7,314	18005	7,489	14519	6,891	18980	7,397	17991	7,553	17483
	67	23,79	4700	23,24	4656	27,32	4047	22,02	4990	24,29	4468	27,43	4032	22,52	4907	24,4	4459	26,72	4157
		22,3	4862	24,45	4375	27,38	3983	22,52	4804	24,84	4334	27,32	4018	22,58	4839	24,23	4456	27,27	4061
	68	24,07	5198	26,77	4657	29,48	4211	24,9	5015	26,94	4628	29,48	4207	24,78	5088	26,88	4659	29,2	4283
40 °C		24,78	4986	27,6	4435	29,75	4105	25,01	4954	26,94	4565	29,64	4134	24,73	5010	27,21	4538	29,7	4188
	69	23,18	5827	25,01	5388	27,82	4814	23,96	5613	26,55	5113	29,09	4619	24,23	5526	26,77	5090	29,09	4627
		24,45	5393	27,05	4940	29,04	4548	24,45	5448	26,61	5011	29,53	4499	24,4	5449	26	5170	28,76	4652
	ort	23,76	5161	25,69	4742	28,46	4284	23,81	5137	26,03	4686	28,75	4251	23,87	5136	25,92	4728	28,46	4328
	67	104,5	1273	125,9	1047	140,7	920,9	118,8	1079	133,6	960,4	148,9	863,2	122,3	1049	135,8	948,6	149	863,6
40 °C		123,5	1004	139,3	903,4	152	823,5	127,4	977	140,4	894,8	153,1	819,5	126,5	985,5	140,2	899,8	151,4	833,6
	68	95,11	1358	117,9	1051	133,3	927,6	110,2	1121	123,4	993,2	141,8	860,8	115,5	1059	126,4	968,6	139,7	874,5
		118,2	1004	127,2	929,1	144,4	826,1	119,3	993,1	130,3	907,8	144,7	825	118,3	100,4	129,3	922,5	144,6	857,2
	69	99,53	1276	117,8	1063	134,2	927,9	94,17	1281	116,5	1045	131,2	943,6	110,8	1120	124	1001	137,1	911,1
		104,2	1124	122,5	971,5	140	862,6	118	1023	130,7	923	145,9	834	119,5	1011	133,4	914,6	145,5	848,8
	ort	107,5	1173	125,1	994,2	140,8	881,5	114,6	1079	129,2	954,1	144,3	857,7	118,8	887,4	131,5	942,5	144,5	864,8

Ek Tablo 14. SBS katkılı tasarım için dolaylı çekme deneyi sonuçları

Sıcaklık	Sıra No.	3000 (3)						2000 (2)						1000 (1)					
		40 (4)		60 (6)		80 (8)		40 (4)		60 (6)		80 (8)		40 (4)		60 (6)		80 (8)	
		µε	E	µε	E	µε	E	µε	E	µε	E	µε	E	µε	E	µε	E	µε	E
5 °C	85	10,21	11588	10,05	11408	10,65	10941	9,715	11947	9,991	11551	10,43	11114	9,991	11645	10,21	11369	10,49	11123
		9,715	11809	9,936	11429	10,21	11227	9,66	11868	9,826	11961	10,27	11214	9,605	12035	10,21	11304	10,49	11049
	86	8,39	14142	8,39	13772	8,777	13150	7,342	15777	7,783	14653	8,17	14003	7,507	15234	7,618	15002	8,39	13628
		7,949	14090	8,501	13214	8,556	13190	7,507	15023	8,335	13527	8,059	13981	7,673	14700	8,004	14075	8,501	13463
	87	8,28	13021	8,39	12658	8,777	12223	8,335	12806	8,666	12288	9,108	11868	8,225	13009	8,556	12525	9,108	11909
25 °C		8,777	12325	8,887	12007	8,887	11943	8,335	12923	8,666	12272	9,274	11520	8,17	13192	8,777	12231	8,942	12082
	ort	8,887	12829	9,025	12415	9,31	12112	8,482	13391	8,878	12709	9,218	12283	8,528	13303	8,896	12751	9,32	12209
	85	28,48	4514	29,97	7287	32,29	3951	27,27	4669	30,08	4284	32,29	3956	27,16	4736	30,08	4308	32,18	4013
		26,94	4679	30,03	4272	32,35	3926	27,21	4658	30,64	4210	32,29	3945	27,82	4635	30,36	4292	32,24	4003
	86	27,38	4283	30,8	3792	33,84	3464	28,76	4071	31,19	3745	33,56	3485	28,37	4094	30,91	3775	33,62	3499
40 °C		28,59	4021	31,08	3685	33,95	3384	28,65	4031	31,52	3665	34,33	3383	28,48	4091	30,91	3779	33,78	3481
	87	33,23	3480	36,27	3175	39,58	2915	33,45	3442	36,27	3179	40,35	2869	33,78	3426	36,43	3199	39,52	2948
		34,39	3352	37,37	3051	41,29	2788	34,56	3343	36,98	3113	40,68	2847	34,06	3415	37,2	3120	41,07	2837
	ort	29,84	4055	32,59	4210	35,55	3405	29,98	4036	32,78	3699	35,59	3414	29,95	4066	32,65	3745	35,4	3463
	85	108,7	1311	116,9	1174	131,7	1032	109,8	1252	123,7	1118	141	979	112,1	1229	120,3	1132	128,8	1041
40 °C		106,9	1207	119,5	1095	130,9	994,3	107,6	1201	120,6	1087	132,1	989,5	107,4	1210	121,1	1096	131	1007
	86	100,2	1423	107,1	1279	122,3	1090	104,2	1301	115,1	1178	124,2	1071	104,3	1280	114,4	1175	123,2	1081
		107,7	1213	118,2	1115	126,5	1017	107,7	1212	113,5	1143	124	1046	104,9	1242	114,3	1146	122,4	1063
	87	143,5	835,6	166,5	714,5	182,1	650,2	157	759,1	168,9	693,2	184,5	641,2	156,7	762,3	166,2	715,1	180,6	662,9
		157,6	741,4	166,7	698,9	179,8	651,3	151,4	769	161,6	724,1	175,5	672,4	147,1	794,3	156,8	746,4	170,7	693,8
	ort	120,8	1122	132,5	1013	145,5	905,7	122,9	1082	133,9	990,6	146,9	899,9	122,1	1086	132,2	1002	142,8	924,8

Ek Tablo 15. SBS+Sönmüş kireç katkılı tasarım için dolaylı çekme deneyi sonuçları

SICAKLIK	SIRA NO.	3000 (3)						2000 (2)						1000 (1)					
		40 (4)		60 (6)		80 (8)		40 (4)		60 (6)		80 (8)		40 (4)		60 (6)		80 (8)	
		µε	E	µε	E	µε	E	µε	E	µε	E	µε	E	µε	E	µε	E	µε	E
5 °C	103	6,901	16086	6,845	16167	7,176	15,5	6,9	16175	7,176	15611	7,121	15844	6,624	17140	7,176	15745	7,176	15868
		6,403	17515	6,624	16842	7,507	14942	6,734	16590	6,679	16651	7,176	15637	6,569	16,83	6,624	16948	7,121	15947
	104	7,507	15996	7,838	15599	8,666	14184	7,507	16200	8,004	15417	7,894	15563	7,673	15998	7,949	15513	8,17	15187
		7,452	16047	7,949	15253	8,28	14,66	7,286	16494	7,778	15642	8,17	14925	7,452	16301	7,618	15953	7,838	15512
	105	6,072	18624	6,624	17718	6,458	18392	6,127	19273	6,238	19240	6,845	17456	6,514	18421	6,79	17857	6,955	17477
25 °C		6,679	17485	6,955	17158	7,121	16786	6,734	17495	7,121	16832	7,231	16690	6,679	17930	6,845	17661	7,286	16691
	ort	6,836	16959	7,139	16456	7,535	10722	6,882	17038	7,166	16566	7,406	16019	6,918	14301	7,167	16613	7,424	16114
	103	23,24	5604	25,5	5118	27,77	4649	24,78	5204	26,83	4829	28,43	4511	25,5	5085	27,27	4803	28,7	4497
		25,17	5079	27,16	4720	28,43	4472	25,67	4980	27,49	4690	28,76	4423	25,89	4949	27,93	4638	28,76	4454
	104	23,13	5949	24,62	5501	24,67	5258	21,91	5937	23,74	5550	25,34	5137	22,13	5927	23,96	5538	25,56	5120
40 °C		21,8	5873	23,79	5437	25,28	5082	21,69	5929	24,01	5425	25,89	5011	21,97	5935	23,52	5579	25557	5099
	105	21,03	6756	22,8	6138	24,45	5737	21,47	6621	23,35	6021	25,56	5695	21,53	6648	22,63	6218	24,4	5754
		21,2	6628	22,96	6033	24,67	5642	21,36	6600	22,91	6069	24,73	5646	21,53	6607	22,96	6124	24,62	5702
	ort	22,59	5981	24,47	5491	25,88	5140	22,82	5878	24,72	5431	26,45	5070	23,09	5858	24,71	5483	4282	5104
	103	6,845	16047	6,901	16167	7,176	15496	6,127	19273	6,238	19240	6,845	17456	6,514	18421	6,79	17857	6,955	17477
40 °C		6,624	18624	6,403	16482	7,507	14942	6,734	17495	7,121	16832	7,231	16690	6,346	17930	6,845	17661	7,286	16691
	104	7,838	17485	7,507	15599	8,666	14657	7,507	16200	8,004	15417	7,894	15563	7,673	15998	7,949	15513	8,17	15187
		7,949	16086	7,452	15253	8,28	15496	7,286	16949	7,783	15642	8,17	14925	7,452	16301	7,618	15953	7,838	15512
	105	6,624	14515	6,072	17718	6,458	18392	6,9	16175	7,176	15611	7,121	15844	6,624	17140	7,176	15745	7,176	15868
		6,955	15996	6,679	17158	7,121	16786	6,734	16590	6,679	16651	7,176	15637	6,569	16828	6,624	16948	7,121	15947
	ort	6,836	16459	7,139	16396	7,535	15962	6,882	17114	7,167	16566	7,406	16019	6,863	17103	7,167	16613	7,424	16114

ÖZGEÇMİŞ

Celaleddin Ensar Şengül, 1981 yılında Trabzon’da doğdu. 1991 yılında Mehmet Akif Ersoy İlköğretim Okulu’ndan, 1994 yılında Kanuni Ortaokulu’ndan mezun olarak İlk ve Orta öğrenimini Trabzon’da tamamladı. 1998 yılında Affan Kitapçioğlu Lisesi Y.D.A (Yabancı Dil Ağırlıklı) sınıfından mezun oldu. Aynı yıl girdiği Üniversite sınavında Karadeniz Teknik Üniversitesi Müh/Mim. Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölümünü kazandı. 2002 Bahar yılı sonunda “İnşaat Mühendisi” ünvanıyla mezun oldu. Ardından 2003 yılında askerlik görevini Bitlis/Tatvan’da kısa dönem erbaş olarak tamamladı. Aynı yıl başvurduğu Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans yapmaya hak kazandı. 2004 yılında Ankara’da özel bir Yapı Denetim Şirketinde Kontrol mühendisi olarak görev yaptı. 2005 Mayıs ayında Polat Yol Yapı A.Ş.’nin Doğu-Polat Ortak Girişimi Karadeniz Sahil Yolu Araklı-İyidere arası yol çalışmalarında Üstyapı Mühendisi olarak göreve başladı. 15 Ağustos 2007 tarihi itibarıyla KPSS vasıtasıyla kamu personeli olarak DSİ XXII. Bölge Müdürlüğüne (Trabzon) atandı. Burada Etüd ve Plan Şube Müdürlüğünde görev aldı. 2009 yılında DSİ XIV. Bölge Müdürlüğü (İstanbul) Melen Başmühendisliğinde geçici görevli olarak görevlendirildi.

Evli olan Celaleddin Ensar Şengül iyi derecede ingilizce bilmekte ve halen DSİ XIV. Bölge Müdürlüğü (İstanbul) Büyük İstanbul İçmesuyu II. Merhale Projesi, Melen Sistemi kapsamında bulunan ve Palet İnş.+Yertaş İnş. yüklenimindeki “Şile Kontrol Merkezi - Hamidiye Tüneli Çıkışı Arası İletim Hattı (Sözleşme No:4)” inşaatında Kontrol Mühendisi olarak görevini sürdürmektedir.