

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**NANOKİL, SBS VE SÖNMÜŞ KİREÇ KATKILI ASFALT KAPLAMALARIN
KARIŞIM PERFORMANSLARININ ARAŞTIRILMASI**

DOKTORA TEZİ

İnş. Yük. Müh. Dünder AYYILDIZ

**KASIM 2018
TRABZON**



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce

Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : / /

Tezin Savunma Tarihi : / /

Tez Danışmanı :

Trabzon

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında
Dündar AYYILDIZ Tarafından Hazırlanan

NANOKİL, SBS VE SÖNMÜŞ KİREÇ KATKILI ASFALT KAPLAMALARIN
KARIŞIM PERFORMANSLARININ ARAŞTIRILMASI

başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 30 /10/2018 gün ve 1776 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda
DOKTORA TEZİ
olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Fazıl ÇELİK

Üye : Prof. Dr. Servet KARASU

Üye : Prof. Dr. Ahmet TORTUM

Üye : Prof. Dr. Atakan AKSOY

Üye : Doç. Dr. Erol ŞADOĞLU


The image shows four handwritten signatures in blue ink, each written on a horizontal dotted line. The signatures are: 1. Fazıl Çelik (Chairman), 2. Servet Karasu, 3. Ahmet Tortum, and 4. Erol Şadoğlu.

Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ

Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Doktora Tezi olarak hazırlamış olduğum “Nanokil, SBS ve sönmüş kireç katkılı asfalt kaplamaların karışım performanslarının araştırılması” adlı bu tezin araştırmacı ve uygulayıcılara faydalı olacağını ümit ediyorum. Asfalt yol kaplamalarından beklenen performans düzeyinin yüksek olması ancak kullanılan malzemelerin pahalı oluşu, araştırmacıları kullanılan malzemelerin niteliklerinin arttırılabilmesinin araştırılmasına yöneltmiştir. Bu kapsamda, nanomalzeme kullanılarak, katkı maddesi olarak kullanılan SBS polimerinin etkisinin arttırılabilirliği ve bitüm içerisindeki oranının azaltılabilirliği değerlendirilmiştir.

Çalışma konusunu öneren ve tezin gerçekleştirilmesi konusunda yardımlarını esirgemeyen danışman hocam sayın Prof. Dr. Atakan AKSOY'a sonsuz teşekkür ederim. Ayrıca tezin deneysel çalışmalarının gerçekleştirilmesinde büyük desteği olan Doç. Dr. Erol İSKENDER Hocama, İnşaat Yüksek Mühendisi Cansu İSKENDER'e, İnşaat Mühendisi İbrahim Liman'a çok teşekkür ederim.

Dündar AYYILDIZ
Trabzon 2018

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “Nanokil, SBS ve sönmüş kireç katkılı asfalt kaplamaların karışım performanslarının araştırılması” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Atakan AKSOY’un sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 19/11/2018

Dündar AYYILDIZ

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET.....	VII
SUMMARY.....	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XI
SEMBOLLER DİZİNİ.....	XIV
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Su Hasarı Problemi	6
1.3. Su Hasarı Testleri.....	11
1.4. Su Hasarını Etkileyen Faktörler.....	13
1.5. Soyulma Önleyici Katkılarının Etkisi.....	14
1.6. SBS Elastomerik PolimerModifikasyonu.....	19
1.7. Nanokil Katkılar.....	20
1.8. Sönmüş Kireç.....	26
1.9. Tekerlek İzi Problemi.....	28
1.10. Marshall Testi ve Marshall Oranı Değerlendirmesi.....	30
1.11. AASHTO T283 Modifiye Lottman Testi	31
1.12. Dolaylı Çekme Mukavemeti.....	32
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	33
2.1. Giriş.....	33
2.2. Çalışmada Kullanılan Malzemeler.....	34
2.2.1. Bitümlü Bağlayıcı ve Özellikleri.....	34
2.2.2. Agrega Özellikleri.....	34
2.2.3. SBS ve Özellikleri.....	35

2.2.4.	Sönmüş Kireç ve Özellikleri.....	36
2.2.5.	Nanokil ve Özellikleri.....	37
2.2.6.	Selüloz Elyaf ve Özellikleri.....	39
2.3.	Karışım Tasarımları.....	39
2.4.	Yöntem.....	56
2.4.1.	AASHTO T 283(Modifiye Lottman) Koşullama Prosedürü.....	56
2.4.2.	Modifiye Lottman (AASHTO T 283) Testi.....	58
2.4.3.	Dolaylı Çekme Mukavemeti Testi	66
2.4.4.	Marshall Oranı (MQ).....	71
3.	BULGULAR VE İRDELEME.....	76
3.1.	Su Hasarı Değerlendirmesi.....	76
3.2.	Düşük Sıcaklık Çatlaması Değerlendirmesi.....	82
3.3.	Tekerlek İzi Değerlendirmesi.....	85
3.4.	Marshall ve Dolaylı Çekme Mukavemeti Oranlarının Karşılaştırılması...	90
4.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	97
5.	KAYNAKLAR.....	104
ÖZGEÇMİŞ		

Doktora Tezi

ÖZET

NANOKİL, SBS VE SÖNMÜŞ KİREÇ KATKILI ASFALT KAPLAMALARIN
KARIŞIM PERFORMANSLARININ ARAŞTIRILMASI

Dündar AYYILDIZ

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Atakan AKSOY
2018, 116 Sayfa

Stiren butadiyen stiren (SBS) polimeri ve asfalt bağlayıcısı arasındaki zayıf uyumluluk nedeniyle faz ayrımı söz konusudur. Bu nedenle son zamanlarda nanokiller kullanılmaktadır. Bu çalışmada, nanokiller ile SBS oranının azaltılabilmesi araştırılmış ve ayrıca sönmüş kireç katkısı kullanılmıştır. %2 ve %3 oranlarında nanokil %5-4-3-2-1 oranlarındaki SBS ile kullanılmıştır. Ayrıca bütün karışımlar %1 oranında sönmüş kireç ile de oluşturularak su hasarı, düşük sıcaklık çatlama problemi ve deformasyon direnci yönüyle sorgulanmıştır. Nanokillerle düşük sıcaklık çatlama direnci bakımından, SBS oranlarının azaltılabilmesi mümkün olabilmektedir. Karışımlarda %2 ve %3 nanokil kullanım oranları için, düşük sıcaklık çatlama problemi bakımından, %1SBS, %2SBS, %3SBS kullanım oranları, sadece %5SBS modifikasyonuna benzer sonuçlar vermektedir. Su hasarı probleminin Modifiye Lottman testleri ile değerlendirilmesi noktasında, gerek %2 gerekse %3 nanokil katkılı seçeneklerde, SBS oranının azaltılması ile su hasarı direncinin arttığı açıkça görülmektedir. Modifiye Lottman testi, su hasarı direnci için Nanokil ve SBS etkileşiminde sinerji oluştuğunu, SBS oranının azaltılabildiğini göstermektedir. Marshall deney yönteminin temsil yeteneği, su hasarı bakımından düşük bulunmuştur. %2 nanokil içeriği, %3 nanokil içeriğine göre daha doğru bir oran olarak değerlendirilmektedir. Modifiye Lottmantesti, katkılı seçenekler bağlamında SBS/nanokil modifiye karışımlarının performansını ayırt edici biçimde değerlendirebilmektedir.

Anahtar Kelimeler:Asfalt kaplamalar, SBS polimeri, Nanokil, Sönmüş kireç, Su hasarı, Düşük sıcaklık çatlama, Marshall oranı, Modifiye Lottman testi

SUMMARY

INVESTIGATION OF MIXTURE PERFORMANCES OF NANOCCLAY, SBS AND HYDRATED LIME MODIFIED ASPHALT PAVEMENTS

Dünder AYYILDIZ

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Atakan AKSOY
2018, 116 Pages

Phase separation due to poor compatibility between SBS polymer and asphalt binder in question. For this reason, nanoclays have been used recently. Reduction of SBS ratio with nanoclays was investigated and also hydrated lime additive was used. The ratios of SBS selected for two different nanoclay ratios have been gradually decreased, and the cost of SBS can be reduced and a cost-saving process has been highlighted. Nanoclays with hydrated lime additive were also evaluated. The rate of SBS was selected as 5%, and for the two different nanoclay rates selected, the use of SBS in both options was subjected to individual performance evaluations for %5-4-3-2-1% ratios with 1% reduction rates. 1% hydrated lime content was applied to nanoclay + SBS polymer options as a separate option for all mixtures. In terms of low temperature cracking resistance with nanoclays, it is possible to reduce SBS ratios. For the use of 2% and 3% nanoclay in the mixes, the use of 1% SBS, 2% SBS, 3% SBS in terms of low temperature cracking problem yields similar results to only 5% SBS modification. In terms of the evaluation of the water damage problem with modified Lottman tests, it is clear that water damage resistance is increased by decreasing the rate of SBS in both 2% and 3% nanoclay added options. The modified Lottman test shows that synergy occurs in the interaction of nanoclay and SBS for water damage resistance, and that the SBS ratio can be reduced. Marshall test method's representation ability was found to be low in terms of water damage. The 2% nanoclay content is considered to be a more accurate ratio than the 3% nanoclay content.

Key Words: Asphalt coatings, SBS polymer, Nanoclay, Hydrated lime, Water damage, Low temperature cracking, Marshall ratio, Modified Lottman test

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.	OMMT/SBS modifiye asfaltik bağlayıcının şematik gösterimi.....	2
Şekil 2.	Soyulmanın gerçekleşme biçimi ve çeşitli soyulma örnekleri	7
Şekil 3.	Kayaçlarda silika içeriği (SiO ₂)	8
Şekil 4.	Asfalt plentlerinde asfalt bağlayıcıya katkıları katmak için şematik yerler	16
Şekil 5.	Farklı asfalt boyutlarının değerlendirilmesinin gösterimi	21
Şekil 6.	Bentonit (BT), orjinal modifiye bentonit (OBT), BT modifiye asfalt ve OBT modifiye asfaltların geniş açılı X-Ray difraksiyon şekilleri	25
Şekil 7.	Tekerlek izi oluşmuş yol kesimi	29
Şekil 8.	Deneysel akış diyagramı	33
Şekil 9.	TMA gradasyon eğrisi	35
Şekil 10.	Süzülme önleyici selüloz fiber katkısı.....	39
Şekil 11.	Değişik SBS ve nanokil oranlarında hazırlanan karışım örneklerinden bir görüntü	42
Şekil 12.	AASHTO T283 deneyinde koşullama sistemi.....	57
Şekil 13.	AASHTO T283 koşullama aşamalarından görüntüler.....	57
Şekil 14.	Dolaylı çekme mukavemeti deneyinin yapılışı.....	67
Şekil 15.	Marshall stabilite testi deney düzeneği.....	71
Şekil 16.	%3 NC modifiye seçenekli koşulsuz karışımların 25°C sıcaklıktaki çekme mukavemeti değerleri.....	76
Şekil 17.	%3 NC modifiye seçenekli koşullu karışımların 25°C sıcaklıktaki çekme mukavemeti değerleri.....	77
Şekil 18.	%2 NC modifiye seçenekli koşulsuz karışımların 25°C sıcaklıktaki çekme mukavemeti değerleri.....	77
Şekil 19.	%2 NC modifiye seçenekli koşullu karışımların 25°C sıcaklıktaki çekme mukavemeti değerleri.....	77
Şekil 20.	%3 NC ve %1HL modifiye seçenekli koşulsuz karışımların 25°C sıcaklıktaki çekme mukavemeti değerleri.....	78
Şekil 21.	%3 NC ve %1HL modifiye seçenekli koşullu karışımların 25°C sıcaklıktaki çekme mukavemeti değerleri.....	78
Şekil 22.	%2 NC ve %1HL modifiye seçenekli koşulsuz karışımların 25°C	

	sıcaklıktaki çekme mukavemeti değerleri.....	78
Şekil 23.	%2 NC ve %1HL modifiye seçenekli koşullu karışımların 25°C sıcaklıktaki çekme mukavemeti değerleri.....	79
Şekil 24.	%3 NC modifiye seçenekli karışımların ITSR değerleri.....	79
Şekil 25.	%2 NC modifiye seçenekli karışımların ITSR değerleri.....	80
Şekil 26.	%3 NC ve %1HL modifiye seçenekli karışımların ITSR değerleri.....	80
Şekil 27.	%2NC ve %1HL modifiye seçenekli karışımların ITSR değerleri.....	80
Şekil 28.	%3 NC katkıli karışımların düşük sıcaklık çatlaması değerlendirmesi.....	83
Şekil 29.	%2 NC katkıli karışımların düşük sıcaklık çatlaması değerlendirmesi.....	83
Şekil 30.	%3 NC -%1 HL katkıli karışımların düşük sıcaklık çatlaması değerlendirmesi.....	83
Şekil 31.	%2 NC -%1 HL katkıli karışımların düşük sıcaklık çatlaması değerlendirmesi.....	84
Şekil 32.	%3NC katkıli karışımların ortalama stabilite değerleri.....	85
Şekil 33.	%2NC katkıli karışımların ortalama stabilite değerleri.....	85
Şekil 34.	%3NC -%1HL katkıli karışımların ortalama stabilite değerleri.....	86
Şekil 35.	%2NC -%1HL katkıli karışımların ortalama stabilite değerleri.....	86
Şekil 36.	%3NC katkıli karışımların MQ değerleri.....	87
Şekil 37.	Şekil 38. %2NC katkıli karışımların MQ değerleri.....	87
Şekil 38.	%3NC -%1HL katkıli karışımların MQ değerleri.....	88
Şekil 39.	%2NC -%1HL katkıli karışımların MQ değerleri.....	88
Şekil 40.	%3 NC katkıli karışımlarda MQ-ITSR ilişkisi.....	91
Şekil 41.	%3 NC katkıli karışımlarda regresyon analizi.....	91
Şekil 42.	%2 NC katkıli karışımlarda MQ-ITSR ilişkisi.....	92
Şekil 43.	%2 NC katkıli karışımlarda regresyon analizi.....	92
Şekil 44.	%3 NC-%1 HL katkıli karışımlarda MQ-ITSR ilişkisi.....	92
Şekil 45.	%3 NC-%1 HL katkıli karışımlarda regresyon analizi.....	93
Şekil 46.	%2 NC-%1 HL katkıli karışımlarda MQ-ITSR ilişkisi.....	93
Şekil 47.	%2 NC-%1 HL katkıli karışımlarda regresyon analizi.....	93

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Kayaç türüne bağlı olarak ortalama SiO ₂ içeriğinin değişimi.....	7
Tablo 2. Nanokil özellikleri	23
Tablo 3. Asfalt çimentosu özellikleri (AC 50-70).....	34
Tablo 4. Bazalt agregasının temel özellikleri	34
Tablo 5. TMA gradasyonu ve fraksiyonları	35
Tablo 6. SBS katkısının bazı fiziksel ve mekanik özellikleri	36
Tablo 7. Sönmüş kirecin kimyasal analiz sonuçları	36
Tablo 8. Kullanılan nano kilin kimyasal analiz sonuçları	38
Tablo 9. Selüloz elyaf özellikleri	39
Tablo 10. Marshall tasarım formu	40
Tablo 11. Optimum bitüm içeriğindeki TMA karışım özellikleri.....	41
Tablo 12. Üretilen katkısız karışım örneklerinin özellikleri.....	42
Tablo 13. Üretilen %5 SBS katkılı karışım örneklerinin özellikleri.....	42
Tablo 14. Üretilen %5 SBS-%3NC katkılı karışım örneklerinin özellikleri	43
Tablo 15. Üretilen %4 SBS-%3NC katkılı karışım örneklerinin özellikleri	43
Tablo 16. Üretilen %3 SBS-%3NC katkılı karışım örneklerinin özellikleri	44
Tablo 17. Üretilen %2 SBS-%3NC katkılı karışım örneklerinin özellikleri	44
Tablo 18. Üretilen %1 SBS-%3NC katkılı karışım örneklerinin özellikleri	45
Tablo 19. Üretilen %5 SBS-%2NC katkılı karışım örneklerinin özellikleri	45
Tablo 20. Üretilen %4 SBS-%2NC katkılı karışım örneklerinin özellikleri	46
Tablo 21. Üretilen %3 SBS-%2NC katkılı karışım örneklerinin özellikleri.....	46
Tablo 22. Üretilen %2 SBS-%2NC katkılı karışım örneklerinin özellikleri	47
Tablo 23. Üretilen %1 SBS-%2NC katkılı karışım örneklerinin özellikleri	47
Tablo 24. Üretilen %2 HL katkılı karışım örneklerinin özellikleri	48
Tablo 25. Üretilen %5 SBS %3 NC %1 HL katkılı karışım örneklerinin özellikleri	48
Tablo 26. Üretilen %4 SBS %3 NC %1 HL katkılı karışım örneklerinin özellikleri	49
Tablo 27. Üretilen %3 SBS %3 NC %1 HL katkılı karışım örneklerinin özellikleri	49

Tablo 28. Üretilen %2 SBS %3 NC %1 HL katkılı karışım örneklerinin özellikleri	50
Tablo 29. Üretilen %1 SBS %3 NC %1 HL katkılı karışım örneklerinin özellikleri	50
Tablo 30. Üretilen %5 SBS %2 NC %1 HL katkılı karışım örneklerinin özellikleri	51
Tablo 31. Üretilen %4 SBS %2 NC %1 HL katkılı karışım örneklerinin özellikleri	51
Tablo 32. Üretilen %3 SBS %2 NC %1 HL katkılı karışım örneklerinin özellikleri	52
Tablo 33. Üretilen %2 SBS %2 NC %1 HL katkılı karışım örneklerinin özellikleri	52
Tablo 34. Üretilen %1SBS %2 NC %1 HL katkılı karışım örneklerinin özellikleri	53
Tablo 35. SBS modifiye ve HL modifiye bitümlü karışımların yoğunluk değerlendirmesi..	53
Tablo 36. %3NC-değişik SBS içeriklerinde hazırlanan örneklerin yoğunluk değerlendirmesi.....	54
Tablo 37. %2NC-değişik SBS içeriklerinde hazırlanan örneklerin yoğunluk değerlendirmesi.....	54
Tablo 38. %3NC- değişik oranlarda SBS ve %1HL kullanılan karışımlarda yoğunluk değerlendirmesi.....	55
Tablo 39. %2NC- değişik oranlarda SBS ve %1HL kullanılan karışımlarda yoğunluk değerlendirmesi.....	55
Tablo 40. Kontrol, %5SBS modifiye ve %2HL modifiye karışımların dolaylı çekme mukavemeti test sonuçları.....	59
Tablo 41. SBS(değişken oranlar)-NC(%3) modifiye bitümlü karışımların dolaylı çekme mukavemeti test sonuçları.....	60
Tablo 42. SBS(değişken oranlar)-NC(%2) modifiye bitümlü karışımların dolaylı çekme mukavemeti test sonuçları	61
Tablo 43. SBS(değişken oranlar)-NC(%3)-HL (%1) modifiye karışımların dolaylı çekme mukavemeti test sonuçları	62
Tablo 44. SBS(değişken oranlar)-NC(%2)-HL (%1) modifiye karışımların dolaylı çekme mukavemeti test sonuçları	63
Tablo 45. SBS(değişken oranlar)-NC(%3) modifiye bitümlü karışımların ITS değerleri .	64
Tablo 46. SBS(değişken oranlar)-NC(%2) modifiye bitümlü karışımların ITS değerleri...	64
Tablo 47. SBS(değişken oranlar)-NC(%3)-HL (%1) modifiye karışımların ITS değerleri.	65
Tablo 48. SBS(değişken oranlar)-NC(%2)-HL (%1) modifiye karışımların ITS değerleri.	65
Tablo 49. SBS(değişken oranlar)-NC(%3) modifiye bitümlü karışımların ITS değerleri.....	67
Tablo 50. SBS(değişken oranlar)-NC(%2) modifiye bitümlü karışımların ITS değerleri.....	68
Tablo 51. SBS(değişken oranlar)-NC(%3)-HL (%1) modifiye karışımların ITS değerleri..	69
Tablo 52. SBS(değişken oranlar)-NC(%2)-HL (%1) modifiye karışımların ITS değerleri..	70
Tablo 53. Değişik oranlarda SBS ve %3NC modifiye bitümlü karışımların stabilite ve MQ değerleri.....	72

Tablo 54. Değişik oranlarda SBS ve %2NC modifiye bitümlü karışımların stabilite ve MQ değerleri.....	73
Tablo 55. Değişik oranlarda SBS- %3NC-%1HL modifiye karışımların stabilite ve MQ değerleri.....	74
Tablo 56. Değişik oranlarda SBS- %2NC-%1HL modifiye karışımların stabilite ve MQ değerleri.....	75



SEMBOLLER DİZİNİ

AASHTO	Amerika Devlet Karayolu ve Ulaştırma İdareleri Birliği
AB	Asfalt bağlayıcı
ECS	Çevresel koşullama sistemi
EVA	Etil vinil asetat
E*	Dinamik modül
G*	Kompleks modül
HL	Sönmüş kireç
HMA	Sıcak karışım asfalt
HWTT	Hamburg tekerlek izi testi
IDOT	İndiana ulaşım departmanı
ITS	Dolatlı çekme mukavemeti
KS	Kore standardı
MB	Modifiye bağlayıcı
MQ	Marshall oranı
NAT	Nottingham asfalt test cihazı
NC	Nanokil
OBT	Orgaik modifiye bentonit
OMMT	Organik montmorillonit
OVMT	Organik olarak değiştirilmiş vermikülit
PG	Performans derecesi
PS	Polistiren
PVC	Polivinil klorür
RA	Kaya asfaltı
SBR	Stirenbütdien kauçuk
RHA	Pirinç kabuğu külü
SBS	Stirenbütdiyenstiren
TMA	Taş mastik asfalt
TSR	Çekme mukavemeti oranı

VMA	Agregalar arası boşluk
WMA	Ilık karışım asfalt
XR	X ışını difraksiyonu
δ	Faz açısı



1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Asfalt kaplamalar, trafik yüklerinin artması ve endüstriyel gelişmelere bağlı olarak daha büyük gerilmelere maruz kalmaktadır. Trafik tekerrür sayısının ve lastik basınçlarının artması, kaplamaların maruz kaldığı bozucu gerilmeleri artırmaktadır. Ayrıca rafinerilerin daha ileri teknolojilerle donatılması ve buna bağlı olarak ta ham petrol içerisinde daha çok ürünün elde edilmesi ile asfalt çimentolarının da bağlayıcılık özelliği olumsuz etkilenmektedir. Dolayısıyla, bu faktörler altında kaplamalar daha büyük bozucu gerilmelerle ve mekanizmalarla karşı karşıya kalmaktadır.

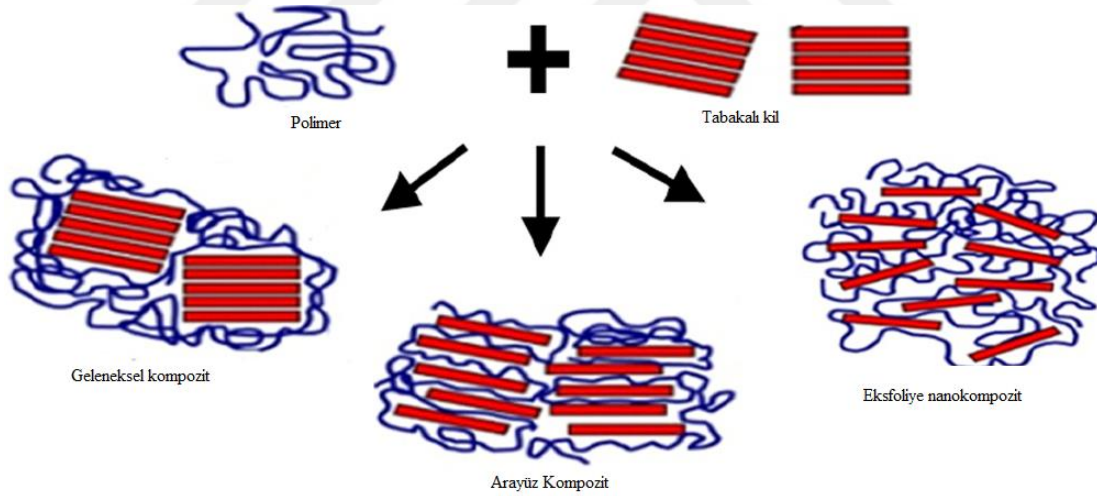
Kaplamaların maruz kaldığı başlıca bozulma mekanizmaları; düşük sıcaklık çatlaması, su hasarı (soyulma) problemi ve tekerlek izi problemidir. Kaplamaların belirtilen daha ekstrem koşullar altındaki bozucu gerilmeleri, bozulma mekanizmalarını daha hızlı ve birbirini tetikler şekilde etkilemektedir.

Problemlerin azaltılması ve ifade edilen sakıncaların giderilmesi, bazen de performans seviyelerinin çok daha yukarılara çekilmesi sırasında başvurulan ana yöntemlerin içerisinde katkı uygulamaları ve tip değişiklikleri gelmektedir. Katkı uygulamaları arasında; polimerik katkılar, fiber uygulamaları, inert çimento fillerleri, soyulma önleyiciler ve özellikle bu bağlamda sönmüş kireç, çeşitli filler ve atık malzemelerin kullanımı, yenileyici katkılar sayılabilir. Katkılarla ilgili olarak tasarım çalışmaları yürütülmektedir. Katkıların ne şekilde ve hangi oranlarda katılması gerektiği, diğer katkılarla olan etkileşimi, hangi testlerle ve hangi test koşulları altında katılmaları gerektiği, uzun dönemli performans konuları araştırılan konular bağlamındadır.

En çok kullanılan polimer modifiyerlerden biri termoplastik elastomer olan SBS'dir. Asfalt karışımlarının mekanik özelliklerini önemli ölçüde artırabilen polistiren (PS) ve polibütadien (PB) blok kopolimerleri de söz konusudur. PS sertleştirici bloğunun cam geçiş sıcaklığı ve PB yumuşak bloğu sırasıyla +100 C ve 80 C civarındadır. Bu sıcaklık aralığında SBS'in düz modülü nedeniyle, geniş sıcaklık aralığında bağlayıcının sıcaklığa duyarlılığını azaltabilir [1]; bununla birlikte, potansiyel problemlerden biri, SBS ve asfalt bağlayıcısı arasındaki zayıf uyumluluk (asfalt bileşimi ve polimer mikro yapısı arasındaki

fark) nedeniyle bir faz ayrımı olabilir. SBS ve asfalt bağlayıcı harmanlandığında, polimerik zincirlerin moleküler ağırlıkları asfaltinkinden daha yüksek veya eşittir, bu nedenle bir faz ayrımı oluşabilir [2,3]. Yüksek sıcaklıktaki faz ayırma probleminin üstesinden gelmek için (veya yüksek sıcaklıkta depolamada kararlılık problemi olarak bilinir) nano mühendislik teknikleri, nanokil kullanımı gibi, bundan sonra nanokompozit denilen PM geliştirilmiştir [4].

Asfalt bağlayıcı esas olarak yol yapımında büyük ölçüde ve çok miktarda kullanılırken, makroskopik mekanik davranışı, mikro ve nano ölçeklerde mikro yapıya ve fiziksel özelliklere bağlıdır. Polimer nanokompozitler, yaklaşık 1 nm kalınlığa ve yüksek en-boy oranına sahip katmanlı silikatlar ile bir veya daha fazla polimerin kombinasyonudur. Silikat tabakaları, silikatları polimer ağına dağıtarak ve yüzey alanını artırarak harmanlanabilir. Yüzey alanının artırılması, mikro ve makro kompozitlerin oluşumuna neden olur. Aslında nanokiller bu bağlamlarda, ayrılma itici gücü oluşturarak SBS ve bağlayıcının yoğunluk farkını azaltabilir [5,6,7].



Şekil 1. OMMT/SBS modifiye asfaltik bağlayıcının şematik gösterimi [2]

Esnek kaplamaların tasarım ömrünü artırmak için asfalt bağlayıcıların kalitesinin artırılması konusunda çalışmalar yoğunlaşmıştır. Polimer modifiye bağlayıcılar çok popüler olmasına rağmen, bu bağlayıcıların yüksek maliyet ve termal kararsızlığı, araştırmacıları bağlayıcıların performansını artırmak için yeni malzemeler keşfetmeye yöneltmiştir. Farklı nano malzemelerin, yani nanokil, nanosilika, nano çinko oksit ve

nanokirecin asfalt bağlayıcılarının modifikasyonu için kullanımı noktasında yakın zamanda hız kazanması, yeni araştırmalara yöneltmiştir [8-11].

Nanokil modifiye asfalt bağlayıcının maliyetinin, polimer modifiye asfalt bağlayıcınınkinden yaklaşık % 22-33 daha düşük olabileceği belirtilmiştir [12].

Organo modifiye montmorillonit nanokilin tekerlek izi problemini en aza indirmek için potansiyel bir çözüm olabileceği gösterilmiştir [13-15]. Superpave rutting parametresi, bir bağlayıcının tekerlek izi dirençli olmasına ilişkin önemli bilgiler sağlar; ancak nanokil modifiye asfalt bağlayıcılarda sınırlı çalışma söz konusudur.

Çatlama ve yorulma problemleri esas olarak kaplamanın servis ömrünü kısaltmaktadır. Sorunların en aza indirilmesi, sürdürülebilirlik bakımından daha ekonomik olacaktır çünkü bozulmaların yeniden onarımı daha fazla maliyet gerektirecektir. Yöntemlerden bir tanesi asfalt çimentosunun özelliklerini değiştirmektir yani modifikasyondur. Farklı polimer türlerinin kullanımı gibi çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Asfalt çimento ve karışım performansını iyileştirmek için nano malzemeler gibi katkı maddeleri kullanımı son zamanlarda daha popüler hale gelmiştir. Nano kompozitler, asfalt karışım özelliklerini iyileştirmek ve performans artırmak için kullanılan malzemeler arasındadır [16].

Polimerik modifiye asfalt bağlayıcılar; TMA karışımlarda fiber yerine kullanılabilir ve TMA karışımlarında daha yüksek performansa katkıda bulunurlar esnek kaplamaların durabilitesini korurlar. Esnek kaplamaların özellikleri ve dayanıklılığı farklı türde Polivinil klorür (PVC), Etil Vinil Asetat (EVA), Stiren Butadien Kauçuk (SBR) ve Stiren Butadien Stiren (SBS) kullanılarak geliştirilebilir. Bu katkılar TMA karışımlarında kullanılmaktadır. SBS polimerleri, asfalt bağlayıcının tüm performans özelliklerini olumlu etkiler. SBS katkısı optimum oranı için, asfalt bağlayıcı ağırlığının % 5 değeri önerilmektedir. Bu dozajda, tüm performans problemleri, asfalt bağlayıcısının özellikleri ve asfalt karışımın özellikleri bağlamalarında geliştirilmektedir [17,18].

Taş mastik asfalt (TMA) karışımlarında, bağlayıcı fazın, karışım bütünlüğünün sürdürülmesinde önemli rolü vardır. Karışım uygulanan kayma kuvvetlerine yönelik mukavim olmalıdır. Nanokil parçacıklarının plak yapısı ve uzun boy/genişlik oranı nedenleriyle, bitümlerin özelliklerinin geliştirilmesinde önemli etkilere sahip olmaktadır. Nanokil modifikasyonun uygulandığı araştırmada; iki farklı kategorideki yüksek sıcaklık özellikleri etkisi altındaki TMA karışımları değerlendirildi. Elyaf ve polimerler içeren karışımlar araştırıldı. 60/70 penetrasyon dereceli saf bitüm, kireçtaşı agregaları, selüloz

elyafları ve Styrene Butadiene Styrene (SBS) polimer ve farklı içeriklerde montmorillonit nanokil parçacıkları, bitümün ağırlığına göre %1-%4 aralığında kullanılmıştır. Farklı asfalt malzemelerinin performans özellikleri; modifiye asfalt bağlayıcıların depolama stabilitesi ve Marshall stabilitesi ve akması, sürtünme özellikleri ve farklı miktarlarda nanokil partiküllerine sahip TMA karışımlarının tekerlek izi direnci incelendi. Nanokil-polimer asfalt bağlayıcı maddeleri, daha iyi depolama özelliklerine ve daha iyi performans özelliklerine sahiptirler. Polimer modifiye asfalt bağlayıcılı TMA karışımları daha iyi kalıcı deformasyon direncine sahiptir (daha yüksek rutting direnci). Üstelik % 3 nanokil içeren TMA karışımı, en yüksek rutting direnci vermektedir [19].

SBS (styrene-butadiene-stiren) ile modifiye edilmiş asfalt bağlayıcılarda (AB) organik olarak değiştirilmiş vermikülit ve montmorillonitin (sırasıyla OVMT ve OMMT) etkileri araştırılmıştır. Fiziksel ve reolojik özellikler AB, %4.0 SBS modifiye bağlayıcı (MB) ve %2.5 organokil içeren %2.5SBS ile modifiye edilmiş nanokompozit AB için gerçekleştirildi. MB'ler kalıcı deformasyona karşı daha fazla direnç anlamına gelen kompleks modülün (G^*) artmasına ve faz açısının (δ) azaltılmasına neden oldu. Bu durum tekerlek izi direncinin daha yüksek olduğu anlamındadır. Viskozite, penetrasyon ve termal yatkınlık uygun idi. Siyah diyagramlar, nanokillerin OVMT ve OMMT'nin etkisinin Cloisite®'in etkisine benzediğini göstermektedir. Nanokompozitin reolojik özellikleri, polimerin kil ile değiştirilmesi olasılığına bağlı olarak bir maliyet düşüşü belirleyerek % 4.0 SBS MB'ye kıyaslanabilir. Faz ayrımı SBS'nin katıştırma işleminde sorun oluşturduğu için, OVMT'nin varlığı önemli bir sonuç olan SBS MB'nin depolama stabilitesini artırdı. Ön sonuçlar, OVMT'nin asfalt bağlayıcılarda SBS homojenliğini ve stabilizasyonunu iyileştirebildiğini ve daha iyi depolama kararlılığına katkıda bulunduğunu göstermektedir. Bu nedenle, SBS modifiye asfalt için OVMT'nin katkı maddesi olarak kullanılması, asfalt endüstrisi için ekonomik açıdan uygun bir alternatiftir [20].

Uzun yıllar boyunca, geleneksel asfalt tatmin edici bir biçimde performans gösterdi [21]. Trafik yüklerinin artması ve çevre faktörlerine bağlı olarak, saf asfalt her zaman beklendiği gibi performans oluşturmayabilir. Polimer modifiye asfaltlar, kaplama problemlerinin çözümlenmesi, en aza indirilmesi için geliştirildi. 1-3 Polimerlerin katkı maddesi olarak kullanılması, geleneksel asfalt bağlayıcıların performansını büyük ölçüde iyileştirdiği gösterildi, yani, tekerlek izine ve yorulmaya karşı daha dirençli olduğu gibi termal duyarlılığın azalmasına da neden oldu. Buna ek olarak, düşük sıcaklıkta çatlamaya karşı artan direnç söz konusu olmaktadır. En önemli ve kısıtlayıcı gereklilik, polimer ve

asfalt arasındaki uyumluluktur ve depolama stabilitesi için faz ayrımı riskini en aza indirmek için garanti altına almak önemli bir hedef olmaktadır. Nano mineral killer ya polimerin fiziksel ve mekanik özelliklerini geliştirmek için bir ajan olarak ya da kullanılan polimer miktarını azaltmak için dolgu maddesi olarak polimer modifikasyonu için kullanılmaktadır [21].

Stiren-bütadien-stiren (SBS) kopolimerlerinin bitüm özelliklerini iyileştirdiği kanıtlanmıştır. SBS termoplastik yapısı, kaplama dayanıklılığını artırmaya yardımcı olan elastik, mukavemet ve yapışma özelliklerini birleştirme yeteneğine sahiptir. Esnek zincirler vasıtasıyla birbirine bağlanan katı alanlar (polistiren bloklar) fiziksel elastomerik bir ağ oluşturmaktadır. Ne yazık ki, SBS yüksek sıcaklıklarda depolandığında asfaltı ayırma eğilimindedir. Polimerik faz depolama tankında segregasyon olur ve pompalama artık malzemeyi hareket ettirmek için mümkün değildir. Bu, SBS'nin serim endüstrisinde uygulanmasına engel teşkil eder. Bağlayıcıya polimerin küçük oranlarda eklenmesine rağmen, yüksek maliyeti yol yapımında genel olarak kullanımını biraz da kısıtlamaktadır [22,23].

Polimer modifiye asfaltta nanokilin üçüncü bir bileşen olarak etkisi araştırılmıştır. Bu işlemle kil ayrı olarak ya da polimer ile önceden karıştırılarak elde edilir. Her iki durumda da, araya sokulan nanokompozitler elde edildi. Asfalt bağlayıcının ve nanokilin fiziksel bir karışımı, nanokil katmanlarındaki asfalt moleküllerinin araya girmesine bağlı olarak reolojik özelliklerde değişikliklere neden olur. Reolojik açıdan, ön karışımı harman (SBS / kil bir nanokompozit olarak) fiziksel harmanın (asfaltta ayrı olarak polimer ve kil ilave edilmesi) ile eşdeğer değildir. Her durumda, üçlü nanokompozit terimi, bir asfalt / polimer / nanokil karışımı karakterize etmek için kullanılır [24,25].

Son yıllarda, birçok araştırmacı polimerik nano kompozitlerin katkısız asfalt bağlayıcıların modifikasyonunda özellikle nanomalzemelerin belli oranlarında etkin olduğunu belirtmektedir. Birçok araştırma, nanokil gibi , nano sönmüş kireç gibi, nano karbon gibi nano malzemelerin asfalt bağlayıcıların ve asfaltik karışımların performansını iyileştirdiğini belirtmektedir. Örneğin esnek kaplama uygulamalarında, temel asfalt bağlayıcının nanokille modifiye edilmesi durumunda birçok fayda keşfedilmiştir. Bu malzemeler aynı zamanda ikincil türde bir katkı olarak SBS malzemelerin performansını artırabilmekte ve performans artışları sağlayabilmektedir [26,27].

Bu çalışmada, katkısız ve katkılı modifiye asfalt karışımların performans karşılaştırmaları üzerinde kapsamlı araştırmalar gerçekleştirilmiştir. İncelenen temel

mühendislik bozucu mekanizmaları olarak temelde su hasarı (soyulma) konusu ele alınmıştır. Ayrıca düşük sıcaklık çatlama problemi ve Marshall oranı yaklaşımına bağlı olarak tekerlek izi oluşum potansiyeli sorgulanmıştır. Modifiye edici katkıları olarak sönmüş kireç katkısı, SBS polimer ve katkısı ve nanokil katkısı seçilmiştir. Belirtildiği üzere faz ayrışımı potansiyel hasarı bağlamında, nanokil kullanarak SBS oranının azaltılabilmesi noktasında araştırmalar sürdürülmüştür. Seçilen iki farklı nanokil oranı için seçilen SBS oranları kademeli olarak azaltılarak yapılan çok sayıdaki deneysel çalışmalarla birlikte, SBS oranının azaltılabilmesi ve bu yolla bir maliyet kazanımı konusuna ışık tutulmaya çalışılmıştır. Ayrıca sönmüş kireç katkısı ilave olarak ayrı bir strateji noktasında seçilmiştir. Bilindiği üzere, asfalt karışımlarda çeşitli katkı seçenekleri için birden çok farklı katkının aynı anda bir arada kullanılması durumunda sinerjik fayda-çarpan etkisi oluşturan fayda kavramı gelişebilmektedir. Literatürde SBS ve sönmüş kireç birlikteliğinde bu çarpan etkisi oluşumunun performans anlamında söz konusu olabileceği belirtilmektedir. Bu yaklaşımdan yola çıkılarak nanokil kullanılan seçeneklerde sönmüş kireç katkısı da ilave olarak değerlendirilmiştir. Nanokilin bir silikat kombinasyonu oluşu ve bu nedenle su hasarı üzerine belki bir ölçüde oluşturabileceği soyulma hasarı konusunun giderilmesi noktasında yahut ilave bir sinerjik durumun oluşturulabilmesi anlamında nanokil-sönmüş kireç birlikteliği ayrıca ele alınarak seçilen deney yöntemleriyle sorgulanmıştır. Özdeş çok sayıda hazırlanan kontrol ve koşullu sistemlere bağlı briketler üzerinde yapılan deneylerle seçilen araştırma problemleri irdelenmiştir.

1.2. Su Hasarı Problemi

Sudan kaynaklanan hasar; tekerlek izinde oturma, sökölme, çatlama gibi problemlerin oluşmasına zemin hazırlamaktadır. Bu kusurların temel nedeni, suyun varlığında, agrega ve bitüm arasındaki adezif bağın kaybı olarak yani soyulma olarak bilinmektedir. Hasarın tam olarak tanımlanması çok zordur, çünkü çok çeşitli biçimlerde oluşabilmekte ve farklı değişkenlerden etkilenmektedir. Bu değişkenlerin bazıları; sıcak karışımı oluşturan malzemelerle ilişkilidir. Bunlar; agrega, bitüm, soyulma önleyici katkı olarak söylenebilir. Diğerleri ise hava koşulları, sıkıştırma, hava boşluğu, seçilen test yöntemi, depolama koşulları, temin edilme orijini, katkıların depolanması, bağlayıcının viskozite/sıcaklık davranışdır. Soyulma; emülsiyonlaşma; ayrılma, ayırma, boşluk basıncı, hidrolik dolanım, osmoz gibi yollarla olabilmektedir.

Rafineri teknolojisindeki ilerlemeler, bağlayıcı orijinin talepleri karşılayamaması, reolojik anlamda yetersiz nitelikte bitümlerin var olabildiği, artan trafik yükleri, agrega özelliklerinin türlerinin çok çeşitli oluşu, petrografik-mineralojik yapının karmaşıklığı, önemi, performans üzerindeki asıl etkili faktörlerden oluşu, dolayısıyla azalan performansın karşılanmasına ya da mevcut performansın daha ileriye taşınmasına yönelik çabalar- yeni kaplama türleri-katkı uygulamaları gündemdedir.

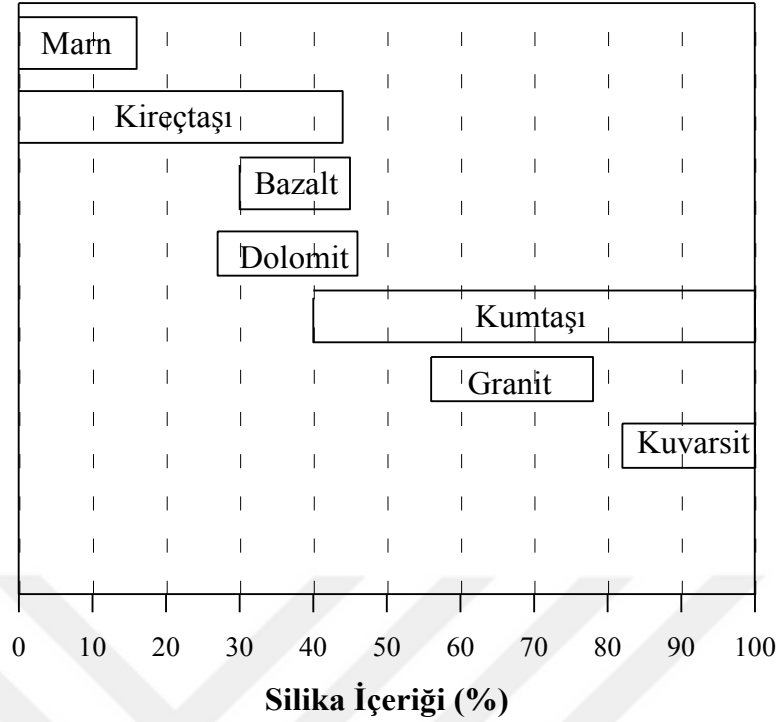
Soyulma mekanizmaları; ayrılma, ayırma (detachment), yerdeğiştirme (displacement), emulsiyonlaşma, film kopması, hidrolik dolanım, pH kararsızlığı-düzensizliği ve boşluk basıncı mekanizmaları ile tanımlanmaktadır. Şekil 2’de soyulmanın gerçekleşme biçimi ve çeşitli soyulma örnekleri verilmiştir. Silika içeriğine bağlı yaygın kanaat değerlendirmesi söz konusudur. Silika oranının artması soyulma direncini düşürmektedir (Tablo 1 ve Şekil 3).



Şekil 2.Soyulmanın gerçekleşme biçimi ve çeşitli soyulma örnekleri [28]

Tablo 1. Kayaç türüne bağlı olarak ortalama SiO₂ içeriğinin değişimi

Kayaç Türü	SiO ₂ İçeriği (%)
Mermer	0-14
Kireçtaşı	0-49
Bazalt	40-53
Diyorit	49-63
Kumtaşı	60-100
Granit	65-78
Kuvarsit	86-100



Şekil 3. Kayaçlarda silika içeriği (SiO₂) [29]

Soyulma noktasında; kaplamaların sudan olabildiğince uzak tutulması, temiz, sağlam, ölçütleri sağlayan agrega kombinasyonunun kullanılması, malzemelerin seçilen tanımlamalara uygunluğu, tozlu ve ayrılmış agrega kullanılmaması, aşırı oranda soyulma önleyici katkı kullanılmaması, soyulma önleyici katkının etkinliğinin değerlendirilmesinde doğru katkı oranının belirlenmesi, katkıların depolanma ve ısıl stabilitelerine özellikle dikkat edilmesi, depolanma sürelerinin dikkate alınması, bütünlüğünü koruyabilme özelliği bakımından değerlendirilmesi önemlidir. Kalite kontrole son derece önem verilmesi, sönmüş kirecin önemli bir alternatif olarak ileri sürüldüğü, uygulamaya geçilmesi gerektiği, katkıların etkinliğinin özellikle uzun dönemli performans anlamında araştırılması, laboratuvarında, daha güncel olan sıkıştırma ve tasarım tekniklerine yönelme zorunluluğu bulunmaktadır.

Asfalt karışımlarda su duyarlılığını değerlendirmek üzere çeşitli test yöntemleri önerilmiştir. Fakat, araştırmacılar arasında, bu bozucu gerilme mekanizmasını tanımlayan, değerlendiren tek bir test yöntemi süreci bağlamında küresel bir uyum, uzlaşma bulunmadığı anlaşılmaktadır. Yaygın test yöntemleri arasında; kaynama testi, Marshall ve Modifiye Lottman testi yer almaktadır. Bazı Araştırmacılar ve Enstitüler, Modifiye Lottman Testinin soyulma konusunu tanımlamada daha uygun olduğuna inanmaktadırlar.

AASHTO T283 testi, malzemenin soyulmaya yatkınlığının belirlenmesinde ve soyulma önleyicilerin etkinliğinin belirlenmesinde kullanılmaktadırlar [30].

Asfalt karışımların suya duyarlılığını değerlendiren test yöntemleri, niteliksel ve niceliksel yöntemler olarak sınıflandırılmaktadır. Kaynayan su testleri, statik daldırma testleri (AASHTO T182) niteliksel test olarak bilinmektedir. Dolaylı çekme dayanımı ve rijitlik modülü saptama testleri karışımların mekanik dayanımını belirlemekte ve niceliksel testler olarak bilinmektedir. Niteliksel testlerin en önemli dezavantajı, testlerin insanların gözle incelemesine dayalı olmasıdır. Bu problemin üstesinden gelmek için, görüntü analiz yöntemleri konuya ilişkin olarak geliştirilmiştir. Gözle incelemeye göre daha iyi sonuçlar bu şekilde alınmaktadır. Lottman Modifiye testi (AASHTO T283) niceliksel yöntem olarak düşünülür, sudan kaynaklanan hasarın saptanmasında yaygın biçimde kullanılmaktadır [31-35].

Nem, asfalt karışımlara ya süzülme ile ya da difüzyon ile penetre olmaktadır. Su hasarı modellerinde bu süzülme ve difüzyon etkilerinin modelleme ile araştırılması da gereklidir [36].

Birçok yol, esneklik, rahatlık ve uygulama kolaylığı sağlayan sıcak karışım asfalt (HMA) ile üretilmektedir. Bununla birlikte, zayıf inşaat uygulamaları ve bakım - onarım çalışmalarının kusurları, çoğu zaman HMA kaplamaların performanslarında düşmelere neden olmaktadır [37].

Nemli ve ıslak iklimlerde bulunan kaplamaların çoğu, trafik yükleme, termal değişim ve su hasarları sonucu meydana gelen çatlama, çatlama ve sıyırma gibi hatalarla karşılaşmaktadır [38-42].

Su, kaplama yüzeylerinden nüfuz eder ve agrega parçacıkları ile bitümün arasına penetre olur ve bu da nihai olarak kaplamalarda soyulma ve sökülme ile sonuçlanacaktır [43,44].

Yüksek kaliteli agrega kaynaklarının azlığı nedeniyle, kaplamaların erken soyulmasıyla sonuçlanabilecek düşük kaliteli agregalar kullanılabilir. Suyun zararlı etkilerini kontrol etmek ve azaltmak için, birçok araştırmacı bitüm ve agregalar arasındaki bağı arttırmak için anti-soyulma katkı maddelerini uygulamayı önermiştir. Bu ise ıslatma direncinin artmasına ve bitüm yüzey gerilimlerinin azalmasına neden olmuştur [32,45,46].

Düşük maliyet ve kolay uygulama nedeniyle, amin ve di-aminler gibi sıvı anti-soyulma maddeleri yaygın olarak kullanılmaktadır [47].

Çalışmalar, amino katkı maddelerinin Marshall Stabilesini artırdığını ve asfalt karışımlarının direncini artırdığını ve ayrıca yol kaplamalarının hizmet ömrünü de %25'e kadar arttırdığını göstermiştir [48].

Su hasarı adezyon kaybına neden olur ve asfalt karışımının mukavemetini dramatik olarak etkiler. Ayrıca kaplama yüzeyinde tekerlek izi ve sökölme gibi erken dönemli kaplama hatalarına neden olabilir [49,50].

Su duyarlılığı testi, asfalt karışım tasarım aşamasında birçok kurum tarafından uygulanmıştır ve bu testin sonucu, bazı asfalt ve agreg a kombinasyonlarını ortadan kaldırmak veya soyulma önleyici katkı maddelerinin ihtiyaçlarını araştırmak için kullanılabilir. Nem tahribatına maruz kalma potansiyeli, malzeme seçimi, karışım tasarımları, yüksek bir asfalt film kalınlığı, katkı maddeleri, uygun kaplama tasarımı, sıkıştırma ve drenaj artışı ile kontrol edilebilir veya azaltılabilir [51].

Nem hasarını hafifletmek için en yaygın teknik, asfalt bağlayıcı veya agreg a ile katkı maddeleri veya modifiye edicilerin kullanılmasıdır ve AASHTO T-283, nem duyarlılığının değerlendirilmesinde yaygın olarak kullanılan bir laboratuvar test yöntemidir [52].

El Kaadi [53], laboratuvar su hasarı değerlendirme testlerinin geliştirilmesinin zor olduğunu ve nem hasarını etkileyen faktörlerin yüksek değişkenliğinden dolayı saha performansını simüle etmenin zor olduğunu ve yeni test prosedürleri geliştirme sürecinin devam ettiğini özetlemiştir.

Amelian ve Abtahi [33], görüntü analiz tekniğini, kaynama su testinde görsel değerlendirme uygulamış ve görüntü analiz tekniklerini kullanarak kaynama su testinin sübjektif derecelendirmeden daha objektif bir değerlendirmeye dönüştürüldüğünü ve gerilme mukavemeti oranı ile (TSR) değerleri arasında iyi bir ilişki olduğu sonucuna varmışlardır. Hamburg tekerlek izi testi (HWTT), karışım nemi duyarlılığı ve tekerlek izi direncini değerlendirmek için yaygın olarak standart bir laboratuvar testi olarak kullanılmıştır.

Yin [54], HWTT sonuçlarını analiz etmek için yeni bir yöntem ortaya koydu ve soyulma oluşmadan önce ve sonra karışımın nem duyarlılığını ölçmek için üç yeni parametre önerdi. Yeni test parametreleri, HWTT'de soyulma ve tekerlek izine karşı karışım direncini karakterize etmede önemli avantajlar göstermektedir.

Walubita [55], yeni türetilmiş HWTT veri analizi parametrelerinin, yol güzergahı geçmişini dikkate alarak, Sıcak Karışım Asfaltının erken ömrünün tekerlek izi performansını tahmin etmek için ümit verici sonuçlar verdiğini öne sürdü.

Son zamanlarda, biyo-katkı maddeleri, nano-kompozit ve cam elyafları gibi birçok anti-soyulma katkı maddesi geliştirilmiş ve farklı yöntemlerle incelenmiştir. Daha sonra, nem hasarı ve asfalt karışımının tekerlek izi direncinin iyileştirilmesi üzerinde olumlu etkiler göstermiştir [56-58].

Asfalt betonunun su hasarı üzerine olan araştırmalarında, alanda yapılan en büyük çaba sadece oluşan hasarın tespit edilmesine yönelik bir test yönteminin geliştirilmesi değil aynı zamanda karışımların uygunluğunun, tasarım aşamalarının ve servis koşullarındaki hasar tespitinin elde edilebilmesine yönelik bir test yönteminin geliştirilmesi olmuştur. Bazı araştırmalarda, ECS, UTM, NAT, tekerlek izi (wheel tracking), DMA vs. gibi, araziye yönelik benzer çevresel ve yükleme koşulları kullanılmıştır. Lottman, Nesichi ve Ishai gibi araştırmacılar, bir tahmin modelini, ITS gibi, su hasarının olası etkisini belirlemede ayırmaya çalışmışlardır. Bununla birlikte, asfalt karışımların kompleksliğini içeren ve değerlendiren tek bir mekanik parametreye bağlı bir tahmin modeli bulunmamaktadır [59,60].

İki ana türde su hasarı modeli bulunmaktadır. Bu modeller, adhezyon ve kohezyon kırılmalarıdır. Amerika'da en yaygın yöntem, su hasarının değerlendirilmesinde AASHTO T-283 ve Hamburg tekerlek izi testidir. Bu yöntemler yaygınca kullanılmalarına karşın, araştırmalar çekme mukavemeti oranı (TSR) değerinin arazi gözlemlerini yansıtmada başarısız olduklarını göstermektedirler. Hamburg tekerlek izi testi, ampirik bir testtir ve soyulma kırılma mekanizmasının doğrudan doğruya ölçümünde başarılı olamaz [61-63].

1.3. Su Hasarı Testleri

Genel olarak, su duyarlılık testleri, bireysel faktörleri değil, bir sıcak karışım asfalt kaplama karışımının, hangi orijinden olursa olsun, nem hasarına direnme yeteneğini ölçmeye çalışmaktadır. Bunlar genellikle brüt sonuçlar veya karşılaştırmalı sonuçlar verebilmektedir ve nem hasarının derecesini tam olarak tahmin edememektedir. Nem duyarlılık testleri için ana testler şu şekilde belirtilebilir.

Kaynama testi (ASTM D 3625): Kaynayan suya gevşek sıcak karışım asfalt eklenir ve asfalt bağlayıcı kaplamasını tutan agrega yüzeyinin toplam görünen yüzdesi ölçülür. Test basittir, fakat subjektiftir, herhangi bir dayanım belirlemesini içermez ve ince agrega performansını değerlendirmek zordur.

Statik daldırma testi (AASHTO T 182): Sıcak karışım asfalt numunesi 16 ila 18 saat suya batırılır ve daha sonra asfalt bağlayıcıyı tutan toplam yüzeyin toplam görünür yüzdesini ölçmek için gözlem yapılır. Bu test aynı zamanda basit ama öznedir ve herhangi bir dayanım belirleme içermez.

Lottman testi: 3 set sıkıştırılmış örneği test eder. Grup 1, kontrol grubu olup, koşullu değildir. Grup 2, saha performansını 4 yıl temsil etmektedir, örnekler su ile vakum doygunluğuna maruz kalmaktadır. 4 ile 12 yıl arasında saha performansını temsil eden Grup 3, vakum doygunluğuna ve donma-çözülme döngüsüne tabi tutulur. Her numune üzerinde bir dolaylı çekme testi gerçekleştirilir ve koşullandırılmış numunelerin dolaylı gerilme mukavemeti oranı, kontrol grubuyla bir oran olarak karşılaştırılır. Standart olarak genellikle 0,70 ila 0,80 arasında bir minimum çekme mukavemeti oranı (TSR) kullanılır.

Tunncliff ve Root Koşullaması: Lottman testine benzer şekilde, bu test sadece 2 grup kullanır ve donma-çözülme grubunu elemine eder.

Modifiye Lottman (AASHTO T 283): Lottman ve Tunncliff ve Root testleri bir arada uygulanır. Koşulsuz numunelerin dolaylı çekme mukavemetini, su ile kısmen doymuş numunelerle karşılaştırır. Test, şartlandırılmış grubu kısmi vakum doygunluğuna ve isteğe bağlı bir donma-çözülme döngüsüne maruz bırakır. Su ile koşullandırılan numunelerin daha düşük bir gerilme mukavemetine sahip olması beklense de, aşırı düşük değerler nem hasarı potansiyelini göstermektedir.

Daldırma-sıkıştırma (AASHTO T 165): Modifiye Lottman testine benzer şekildedir. Ancak şartlandırılmış numuneler sadece suya (vakumla doyurulmamış) konur ve dolaylı çekme testi yerine bir sınırsız basınç dayanımı testi kullanılır. Hassasiyet iyi değildir ve soyulma belirtileri gösteren örnekler yaklaşık 1.0 TSR değeri verebilir.

Hamburg tekerlek izi cihazı: Sıkıştırılmış HMA örnekleri su altında test edilir. Sonuçlar, nem duyarlılığının göreceli bir göstergesidir.

Bu testlerin hepsinde zayıflıklar mevcuttur ve daha iyi bir nem duyarlılık testi için devam eden araştırmalar söz konudur. Bu zayıflıklar, yukarıda tartışılanlara ek olarak, test sonuçlarının tekrarlanabilirliği ve sorgulanabilir yorumlayıcı yeteneği ile ilgili sorunlar olma eğilimindedir. Ayrıca, hava boşlukları (Va) gibi anahtar HMA parametrelerindeki küçük değişiklikler, test sonuçlarını büyük ölçüde etkileyebilir.

1.4. Su Hasarını Etkileyen Faktörler

Nem duyarlılığı, mekanizmalara bağlı karmaşık bir konudur. Bu mekanizmaların doğası ve etkileşimleri, belirli bir karakteristiğın nem duyarlılığını belirlemede en önemli faktör olup olmayacağını kesin olarak tahmin etmeyi zorlaştırmaktadır. Genel olarak, su, sıcak asfalt karışımlardaki nem oranını arttıran, asfalt bağlayıcınının agrega yüzeyine yapışmasını azaltan veya asfalt bağlayıcıyı fiziksel olarak ayıran etki yapar. Faktörlerin her biri, bir dereceye kadar nem hassasiyetini etkilemekle birlikte, bireysel olarak hiçbirini, nem duyarlılığını tahmin etmek için tek başına kusursuz bir ölçüt değildir.

Asfalt bağlayıcı özellikleri: Viskozite önemlidir çünkü daha yüksek konsantrasyonlarda asfaltene (büyük polar moleküller) işaret edebilir. Polar moleküller daha yüksek yapışma gerilimi ve moleküler yönelim adezyonu yaratabilir. Bu nedenle, düşük konsantrasyonlarda asfaltleri temsil edebilen daha düşük viskoziteler, genellikle soyulma problemine daha duyarlıdır. Sülfoksitler, karboksilik asitler, fenoller ve azot bazları gibi asfalt bağlayıcıdaki bireysel bileşenler de soyulma potansiyelini etkileyebilir.

Agregalar: Genel olarak, hidrofilik olan (suyu çeken) agregaların, hidrofobik agregatlardan daha fazla olması soyulmaya neden olur. Bunu ele almak için, soyulma-duyarlı agregalardan kaçınılabilir veya bir soyulma önleyici asfalt bağlayıcı modifiye edici kullanılabilir. Bu hidrofilik / hidrofobik özelliği belirleyen temel agrega özellikleri şunlardır:

Yüzey kimyası: Asfalt bağlayıcı ile daha kolay bir şekilde bağ oluşturabilen yüzeylerin soyulmaya neden olma olasılığı daha azdır. Genel olarak, daha asidik bir agrega yüzeyi soyulma işlemine daha duyarlıdır. Demir, magnezyum, kalsiyum ve belki de alüminyumun yararlı olduğu düşünülürken, sodyum ve potasyumun zararlı olduğu düşünülmektedir [64].

Gözeneklilik ve gözenek büyüklüğü: Gözenek büyüklüğü kritik faktördür. Gözenekler asfalt bağlayıcı girişine izin verecek kadar büyükse, nem duyarlılığına katkıda bulunabilirler. Yüksek gözeneklilik, yüksek emme ile sonuçlanır, bu da istenen etkili asfalt bağlayıcı içeriğinin elde edilmesi için daha fazla asfalt bağlayıcınının kullanılması gerektiği anlamına gelir. Tersine, yüksek gözeneklilik göz önüne alınmazsa, belirli bir miktarda asfalt bağlayıcısı için, daha fazla emilecek ve daha hızlı yaşlanmaya ve muhtemelen soyulmasına neden olan agrega parçacıkları etrafında asfalt bağlayıcı film oluşturmak için daha az mevcut olacaktır.

Hava boşlukları: Agregadaki gözeneklerin asfalt bağlayıcısını emdiği boyut, HMA karışımındaki hava boşluklarının hacmini etkiler. HMA hava boşlukları hacimce yaklaşık yüzde 8'i aştığında, birbirine bağlanabilir ve suyun HMA'ya kolayca girmesine ve gözenek basıncı veya buz genişmesi yoluyla nemle zarar vermesine neden olabilir. Bunu ele almak için, HMA karışım tasarımı, yaklaşık yüzde 4'lük tasarım hava boşluklarını üretmek için asfalt bağlayıcı içeriğini ve toplam gradasyonunu düzenleyecek şekilde dizayn edilir. Aşırı hava boşlukları, bir karışım tasarımı veya bir imalat problemi olur.

İnşaat havası: Serin hava yapısı, yüksek hava boşlukları ve nispeten geçirgen bir HMA kaplaması ile sonuçlanan yetersiz sıkıştırmalara yol açabilir. Bu, kaplama yapısındaki suyun olasılığını ve dolayısıyla nem hasarını artırır. Islak havalar, inşa edilmiş HMA'daki nem içeriğini de artırır.

İklim: Islak iklimler, donma-çözülme döngüleri ve sıcaklık dalgalanmaları, HMA yapısına daha fazla nemin girmesine ve böylece nem hasarının olasılığını artırabilir.

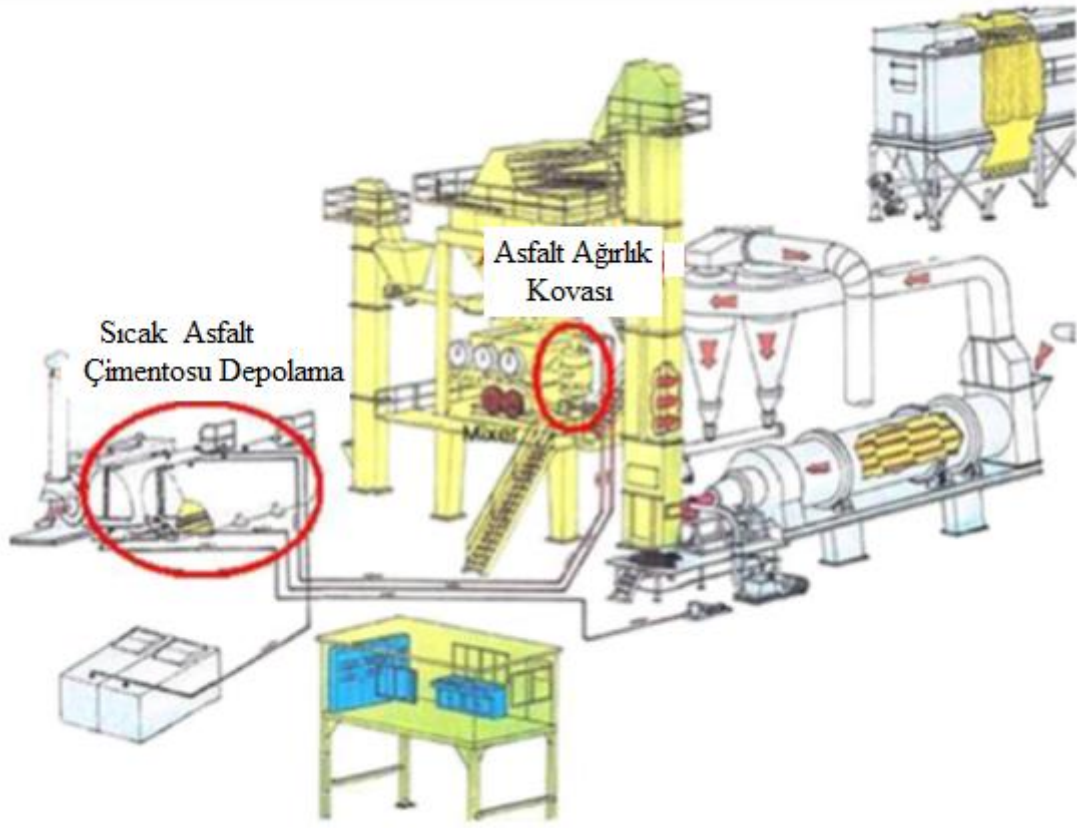
Trafik: HMA yapısında su mevcutsa, artan trafik yüklemesi 2 nedenden dolayı nem hasarını hızlandırabilir. Gözenek basıncı birikmesi söz konusu olur. Agregada gözenekleri içinde su varsa ve kaçamazsa, trafik yüklemesi bu gözenekleri sıkıştıracak ve asfalt bağlayıcısını agregaya yüzeyinden uzağa itebilecek bir basınç birikimine neden olacaktır. Hidrolik dolanım diğer bir konudur. Tekerlek, bir HMA kaplamanın üzerinden geçerken, kaldırımdaki suyu hareket ettirme eğilimindedir. Bu hareket, asfalt bağlayıcıyı agregaya yüzeyinden çıkarabilen bir temizleme etkisine neden olur.

1.5. Soyulma Önleyici Katkılarının Etkisi

Asfalt kaplamalar, mükemmel kaplama performansları nedeniyle günümüzde karayolu inşaatı için yaygın bir şekilde uygulanmaktadır. Asfalt kaplamada iki ana bileşen olarak, asfalt bağlayıcı ve agreganın uyum durumu üstün performansların gerçekleştirilmesinden birinci derecede sorumludur. Bununla birlikte, suyun penetrasyonu, trafik yüklenmesi ve asfalt bağlayıcının ve agreganın zayıf özellikleri gibi çeşitli faktörler asfalt bağlayıcı ve agregada parçacıkları arasındaki adeziv bağın kırılmasına neden olabilir [65-67].

Bu mekanizma, ayrıca soyulma olarak adlandırılır. Soyulma; ayrıca, çatlama, tekerlek izleri gibi farklı bozucu gerilmelere ve nihai olarak da asfalt kaplamanın tamamen bozulmasına neden olur [68,69].

Esnek kaplamalarda, su hasarı, genellikle asfalt bağlayıcının suyun varlığında agreganın yüzeyinden ayrılmasından dolayı meydana gelir. Bu olgu, tek tek veya eşzamanlı olarak soyulma ve diğer erken bozucu gerilmelerin oluşmasından sorumludur. Asfalt karışımındaki nem hasarları, mukavemet ve dayanıklılık kaybı, onarım masraflarının artması ve esnek kaplamaların bakımı gibi ciddi sorunlara neden olmaktadır. Asfalt bağlayıcı-agrega bağının bozulması, sökülme, çukur oluşumu ve çatlama oluşması, nemin neden olduğu hasarlardan bazılarıdır. Hidrofilik agregalarla yapılan kaplamalar, asfalttan ziyade suya daha fazla meyilli olduğundan, soyulmaya karşı oldukça hassastır. Nemlendirilmiş kireç, filler maddesi olarak çimento veya kireçtaşı tozları, sıvı soyulma önleyici katkı maddeleri, nanomalzemeler ve farklı polimerler gibi nem hasarını önlemek için çeşitli yöntemler vardır. Bu yöntemler, agrega veya asfalt bağlayıcıya da eklenebilen asfalt karışımları üzerindeki etkilerine göre seçilmektedir. Asfalt plentlerine sıvı soyulma önleyicileri katmak için birkaç yöntem vardır. Sıcak karışım asfaltlara katkıların eklenmesi, karıştırma sırasında veya sıcak karışım tesisine teslim edilmeden önce bir asfalt tartma kabında asfalt bağlayıcısına çok hassas bir akış oranını doğrudan pompalayan dozaj pompaları kullanılarak gerçekleştirilebilir. Şekil 4'te, plent sürecinde asfalt bağlayıcısına katkıları katmada, sıcak asfalt çimentosu depolama ve asfalt tartma kepçesi eklenmesi için iki olası yeri göstermektedir [70].



Şekil 4. Asfalt plantlerinde asfalt bağlayıcıya katkıları katmak için şematik yerler

Asfalt kaplamada soyulma problemini önlemek üstün performans için önemlidir. Soyulma önleyici katkıların, asfalt kaplamada soyulma direncini etkili bir şekilde artırabildiği değerlendirilmektedir [71,72].

Zycosoil'in, nem hassasiyetine karşı soyulma önleyici katkı maddesi olarak etkisi değerlendirilmiş, yüzeyde, serbest enerji ile ılık karışım asfaltın (WMA) Zycosoil eklenerek asfalt bağlayıcı ve agrega arasındaki yapışmanın yüzey enerjisini kuru/ıslak olarak arttırdığı belirtilmiştir [71].

İki sıvı soyulma önleyici madde ve hidrate kirecin WMA'nın nem duyarlılığı üzerindeki etkisi karşılaştırılmış ve sıvı katkı maddelerinin karışımların dolaylı çekme mukavemetini arttırabildiği, ancak hidrate kirece göre nem direncine karşı zayıf bir direnç gösterebildiği vurgulanmıştır [72].

Hidrate kireç ve sıvı bir soyulma önleyici maddenin (Iterlen In / 400- S) asfalt karışımlarının nem duyarlılıklarına olan etkisi incelenmiş, hidrate kireç içeren asfalt karışımına kıyasla, sıvı önleyici katkı maddesi içeren asfalt karışımının su hasarına karşı daha iyi bir dirence sahip olduğu görülmüştür [31].

Alifatik amin tipi, geliştirilmiş sıvı soyulma önleyici maddelerin, asfalt karışımın soyulma ve tekerlek izi direncini arttırabildiği değerlendirilmiştir [73].

Kısa süreli ve uzun süreli yaşlanmadan sonra, adezif dayanım gelişim etkisi, soyulmayı önleyici maddelerin zayıf termal stabilitesi altında gözle görülebilecek şekilde azalmıştır. Ayrıca, soyulma önleyici maddeler ile asfalt bağlayıcı arasındaki uyumun, bir soyulma önleyici madde seçilmesinde dikkate alınması gerektiği belirtilmiştir [74].

Sıvı soyulma önleyici katkı maddeleri içeren ılık karışım asfaltlarda suyun reolojisi ve nem duyarlılığı araştırılmış ve soyulma önleyici katkıların asfalt bağlayıcının yüksek sıcaklıkta tekerlek izine karşı direncinde küçük bir artışa yol açmış olmasına rağmen, asfalt bağlayıcının performans derecesinde belirgin bir etkisi olmadığı vurgulanmıştır [75].

Çeşitli dozajlara sahip soyulma önleyici katkı maddelerinin (amin bazlı sıvı soyulma önleyici katkı maddelerinin) PG 70-28 ve PG 76-28 polimer modifiye bağlayıcılar için PG 64-22'den daha belirgin bir performans derecesi değişikliğine neden olduğunu bulmuştur [76].

Advera modifiye bağlayıcı üzerinde amin bazlı bir sıvı soyulma önleyici maddesinin (AD-burada HP Plus) etkisi incelenmiş ve % 0.5 dozaj soyulma önleyici maddenin, yorulmayı ve düşük sıcaklık çatlama direncini etkili bir şekilde arttırabileceği sonucu elde edilmiştir. Bununla birlikte, soyulma önleyici madde miktarı arttığında bağlayıcının tekerlek izi faktörü azalmıştır [77,78,79].

Laboratuvar ve arazi çalışmaları, hidrate kireç kullanımının, diğer mevcut yaklaşımlarla karşılaştırıldığında, sıcak karışım asfaltlarda nem hasarlarına karşı direnci sürekli olarak iyileştirdiğini göstermiştir [80,81].

Bununla birlikte, çoğu üreticiler ve müteahhitler, hidrate kireç filleri yerine daha kolay ve daha güvenli bir uygulamadan dolayı, katyonik yüzey aktif maddeleri, genellikle aminler biçiminde sıvı soyulma önleyici katkı maddelerini kullanmakla daha fazla tercih etmektedirler. Aminler, fonksiyonel grubun bir çift elektron ile bir nitrojen atomu içerdiği organik bileşiktir. Çeşitli araştırmacılar, asfalt karışımlarındaki nem kaybının azaltılmasında sıvı soyulma önleyici katkı maddelerinin performansını araştırmış, bu malzemelerin nemi azaltmada olumlu rolünü ve bazı durumlarda diğer seçeneklere göre daha ekonomik olduğunu göstermişlerdir [82].

Sıvı soyulma önleyicilerle işleme tabi tutulmuş bir karışım uzun süreli ısıtmaya maruz kaldığında, asfalt karışımında katkı maddelerinin miktarının azaldığı sonucuna varılmıştır. Sıvı anti-soyulma katkı maddesinin daha hafif amin bileşiklerinin

buharlaştığını ve daha ağır parçacıkların ısıtıldıktan sonra kalmasını sağlayarak, soyulmayı önleyici hiçbir etki göstermediğini belirlenmiştir. Sıvı amin anti-soyulma katkı maddeleri ile, karışımların dolaylı çekme mukavemeti (ITS) değerlerinin, altı saatlik ısıtmadan sonra izin verilen değerde başarısız olduğu görülmüştür. Dahası, sonuçlar uzun süreli ısıtmadan sonra karışımlarda kalan sıvı anti-sıyırma katkı maddelerinin daha ağır bileşiklerinin, karışımın nem hassasiyetinin azaltılmasında etkili olmadığını gösterdi. Sıvı amin soyulma önleyici katkı maddelerinin ısıtma işlemi sırasında ortaya çıkan kimyasal değişiklikler, asfalt ve agregaya arasındaki bağlanmada ters yönde etkilidir [83].

Başka bir araştırmada, sıvı soyulma önleyici katkı maddeleri, asfalt bağlayıcı ile karıştırılmış ve 3 gün boyunca 163 ° C'de fırına yerleştirilmiştir. Bu bağlayıcılar, asfalt karışım numunelerini hazırlamak için kullanıldı. Bu örnekler 1, 28 ve 90 gün boyunca suda tutuldu. Sıvı katkı maddeleri içeren bağlayıcıların fırında tutulmasının, sıvı katkı maddesinin soyulmayı önleyici etkilerini azalttığı görüldü. Karışımlarda soyulma problemi, 3 gün boyunca 163 ° C'de fırında tutulan asfalt bağlayıcıların yaşlanmasına bağlı olabilir [84].

Genellikle, sıvı amin kimyasal esaslı katkı maddeleri, 140-190 ° C'de asfalt bağlayıcıya eklendiğinde, bu katkı maddelerinin nitrojen grupları, soyulma önleyici özelliği olmayan bileşikler oluşturmak için polar gruplar halinde asfalt bağlayıcı ile reaksiyona girmektedir [47].

Su hasarı adezyon kaybına neden olur ve asfalt karışımının mukavemetini olumsuz olarak etkiler. Ayrıca kaplama yüzeyinde tekerlek izi ve sökülme gibi erken kaplama bozukluklarına neden olur. Su duyarlılığı testi, asfalt karışım tasarım aşamasında birçok kurum tarafından uygulanmıştır. Bu testin sonucu, bazı asfalt ve agregaya kombinasyonlarını elemek veya soyulma önleyici katkı maddelerinin ihtiyaçlarını araştırmak için kullanılabilir. Nem tahribatına maruz kalma potansiyeli, malzeme seçimi, karışım tasarımları, yüksek bir asfalt film kalınlığı, katkı maddeleri, uygun kaplama tasarımı, sıkıştırma ve drenaj artışı ile kontrol edilebilir veya azaltılabilir [51].

Su hasarını hafifletmek için en yaygın teknik, asfalt bağlayıcı veya agregaya ile modifiye edicilerin kullanılmasıdır. AASHTO T-283, nem duyarlılığının değerlendirilmesinde yaygın olarak kullanılan bir laboratuvar test yöntemidir [52].

Laboratuvar su hasarı değerlendirme testlerinin geliştirilmesinin ve su hasarını etkileyen faktörlerin yüksek değişkenliğinden dolayı saha performansını simüle etmenin zor olduğu ve yeni test teknikleri geliştirme sürecinin devam ettiği belirtilmektedir [53].

Görüntü analiz tekniği, kaynama su testinde görsel değerlendirmeye uygulanmış ve görüntü analiz tekniklerini kullanarak kaynama su testinin sübjektif derecelendirmeden daha objektif bir değerlendirmeye dönüştürüldüğü ve çekme mukavemeti oranı ile iyi bir ilişki olduğu sonucuna varılmıştır. Hamburg tekerlek izi testi (HWTT), karışım nemi duyarlılığı ve tekerlek izi direncini değerlendirmek için yaygın olarak standart bir laboratuvar testi olarak kullanılmıştır [33].

1.6. SBS Elastomerik Polimer Modifikasyonu

Aşırı yükleme ve iz oluşumu, ulaşımın gelişmesiyle gittikçe daha ciddi hale gelmiştir. Tekerlek izi, çukur, kabarma ve çatlama dahil olmak üzere artan yol kaplama hasarları söz konusudur. Kaplamanın performansını iyileştirmede malzemeleri seçmek önemlidir. SBS modifiye asfalt, hem yüksek hem de düşük sıcaklıklarda avantajlara sahiptir ve bu da mühendislikte ana seçenek haline gelmesine neden olmuştur. Aynı zamanda, yüksek başlangıç maliyeti, zor işleme ve zayıf depolama stabilitesi kusurları da değerlendirilmektedir [85].

SBS modifiye asfaltın yukarıdaki kusurları göz önüne alındığında, birçok akademisyen, kaya asfalt (RA) ve nano materyaller gibi daha uygun maliyetli modifikasyonu bulmak için modifiye asfalt üzerinde araştırmalar yürütmektedir [86,87].

SBS modifiye asfalttan daha iyi bir yorulma ömrü elde etmek için, kauçuk tozu / SBS / RA kullanılarak modifiye edilmiş asfalt bileşiği önerilmiştir [88].

Yüksek sıcaklık özellikleri sürekli olarak iyileştirilen SBS modifiye asfalta Gilsonite ve Trinidad Göl asfaltı eklenerek yüksek sıcaklık özelliklerinin sürekli iyileştirildiği görüldü [89,90].

Nano-malzeme modifikasyonu açısından, nano-montmorillonit / stiren bütadien kauçuk (SBR) modifiye asfalt karışımı ve nano-montmorillonit / etilen-vinil asetat kopolimeri, hazırlanmış ve göreceli olarak asfalt bağlayıcıların reolojik performansı iyileşmiştir [26,91].

SBR modifiye asfalt karışımında nano-kalsiyum karbonatın kullanılmasının mümkün olduğu belirtilmiştir [92].

%5 SBS modifiye asfaltın özellikleri % 0,5 nano-silika (NS) +% 5 SBR +% 1 polietilen ile modifiye edilen asfaltla karşılaştırılmıştır. Önerilen modifiye asfalt, yüksek / düşük sıcaklık performansında ve yaşlanma direncinde önemli bir iyileşmeye sahiptir [93].

Asfalt kaplama mühendisliğine nano malzemelerin uygulaması yeni bir konudur. Araştırmalar, asfalt bağlayıcıların ve karışımların tekerlek izi ve yorulma çatlama direncinin, nano materyal ilavesi ile iyileştiğini göstermektedir. Asfalt bağlayıcısını değiştirmek için katkı maddeleri olarak nanokil ve karbon nanofiber kullanıldı. Nano modifiye asfalt bağlayıcıların kompleks kesme modülü, kontrol asfalt bağlayıcısına göre, kırılma sıcaklığı ve yüksek sıcaklık performans derecesine göre arttı. Nanokil ve karbon fiber modifiye asfalt karışımlarının tekerlek izi direnci performansı artmaktadır [94,95,96]. Son zamanlarda, nano boyutlu hidrate kireç, sıcak karışım-asfalt (WMA) karışımı ile harmanlanacak katkı maddesi olarak seçildi. Çalışmada WMA karışımının nem duyarlılığı araştırıldı [97].

Buna ek olarak, taş mastik asfaltı (TMA) ile karıştırmak için Nano-SiO₂ ve SBS kombinasyonu kullanılmış ve asfalt bağlayıcılarının ve karışımlarının fiziksel ve mekanik özellikleri geliştirilmiştir [98].

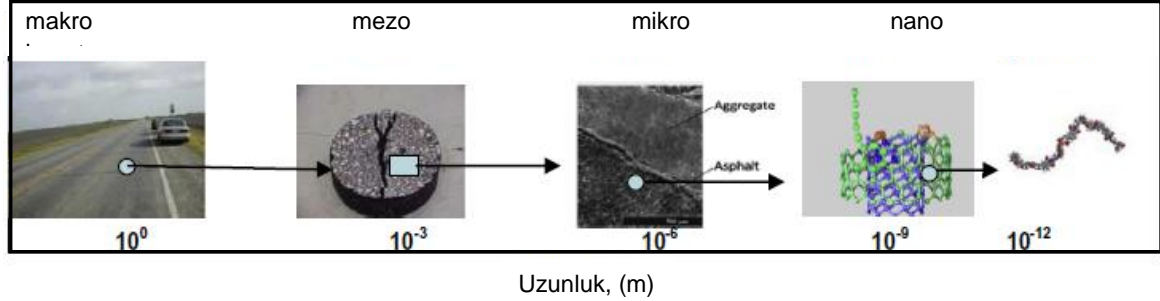
1.7. Nanokil Katkılar

Son zamanlarda nano-killer de asfalt bağlayıcıların modifikasyonunda kullanılmaya başlanan güncel malzemelerdir. Asfalt modifikasyonunda kullanılan veya kullanılmaya potansiyeli olan nano-silika, nano-sönmüş kireç, nano-boyutlu plastik veya polimerize tozlar, nano-fiberler ve nano tüpler gibi çeşitli nano-malzemeler bulunmaktadır [99].

Nanobilim 0.1Nm'den 100Nm'ye (10-10-10-5m) kadar uzunluklarda malzemelerin mikro yapısını ifade etmektedir. Bu mikro yapı arzulanan makroskopik özellikleri oluşturmaktadır. Hem portland çimentolu hem de asfalt bağlayıcılı nano-yapıda malzemeler olabilmektedir. Her iki durumda da 1-100nm ölçüsündeki kalsiyum silikat-hidrate koloidal parçacıklar jel içermektedir [100].

Nano-partiküller nanometre (nm) ile ölçülen ve genellikle en az bir boyutta 100nm'den daha küçük olarak küçültülmüş parçacıklardır. Kil nano-partikülleri asfalt karışım inşasında nano-malzeme ve nano-partikül anlamında kullanılan birincil malzemelerdir. Nano-kil, organik monomer ve polimerlerle uyumlu killer yapmak için modifiye edilen kildir. Bu nano-kompozitler bir nm kalınlığa ve çok büyük yüzey alanı oranına sahip tabakalı silikatlarla bir veya daha fazla polimerin öğütülmesinden oluşmaktadırlar. Kil tabakalarının birbirlerinden ayrışması ile aktif yüzey alanları çok büyük (700-800 m²/g) malzemeler oluşmaktadır. Nano-killerin aktif yüzeylerinin bu kadar

büyük olması birleşeceği malzeme ile (örneğin bitüm) daha sıkı bir bağ kurabilmesini sağlamaktadır [101]. Asfalt kaplamalarda farklı boyutlar şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 5. Farklı boyut gösterimi [96]

Polimer/organokil nanokompozit üretiminde yaygınca kullanılan killer Montmorillonit ve Hektorit tipleridir. Tabakaları arasında serbest olarak Na^+ , K^+ ve Ca^{+2} gibi iyonlar bulunmaktadır. Hidrofil yapıdaki ham kilin polimerle karıştırılmadan önce polimerin seveceği duruma getirilmesi gereklidir. Ham kil primer, sekonder, tersiyer ve kuaterner alkilamonyum veya alkilfosfonyum kationlarını içeren kationik yüzey maddelerle iyon-değişim reaksiyonuyla organofil hale getirilmektedir ve bu kile organokil denilir. Organokil bünyesindeki alkilamonyum veya alkilfosfonyum kationları yüzey enerjisini azaltarak ve polimer matrisin ıslanma özelliğini düzenleyerek kilin tabakalar arası uzaklığını artırmaktadır. Bu kationlar ayrıca polimer matris ile reaksiyon verebilen fonksiyonel gruplar içerebilmektedir. Bazı durumlarda monomerlerin polimerizasyonunu başlatarak organokil ile polimer matris arayüzeyi kuvvetlendirebilmektedir. Tabakalı killer genellikle 1 nm incelikte olup uzunluk/genişlik oranı çok yüksektir (10-1000). Polimer matrisine %1-5 organokil eklenerek iyi bir şekilde dispersiyon sağlandığında klasik kompozitlere nazaran polimer/organokil etkileşimi için çok daha büyük bir yüzey alanı oluşur. Polimer matrisi-organokil arasındaki arayüzey etkileşimleri ile interkalasyonlu, topaklı ve eksfoliye nanokompozit yapılar elde edilmektedir. Polimer/kil nanokompozitlerde özelliklerin optimum seviyede iyileşmesi için kil tabakalarının polimerde tamamen eksfoliye olması gerekir [102].

Özellikleri belirli bir asfalt çimentsunun viskozitesi ve rijitliği seçilen bir montmorillonit nanokil türünün eklenmesi ile etkilenmezken, başka bir montmorillonit nanokil türü rijitliği ve viskoziteyi etkileyebilir. Az miktarda nanokil AC içerisinde

nanoskopik düzeyde dağıtılarak modifiye edildiğinde, asfalt çimentsounun çeşitli fiziksel özellikleri (rijitlik, çekme mukavemeti, çekme modülü, eğilme mukavemeti, termal stabilite modülü gibi) iyileştirilebilmektedir. Geleneksel bitümlerle karşılaştırıldığında, genellikle nanomodifiye bitümlerin elastisite modülleri çok daha büyük ve mekanik enerji kaybı daha düşük elde edilmektedir [95].

Asfalt karışımlarda sık kullanılan modifiyerlerden biri de SBS kopolimeridir. SBS asfalt kaplamaların mekanik özelliklerini önemli derecede iyileştirmektedir. Asfalt kaplama teknolojisinde, polimerik nano-kompozitler son zamanlarda en ilginç konulardan olarak karşımıza çıkmaktadır. Polimerler düşük miktarlarda nano-kil ile modifiye edildiğinde ve bu modifikasyon nanoskopik seviyede gerçekleştirildiğinde polimerik nano-kompozitlerin fiziksel özellikleri başarılı bir şekilde iyileştirilebilmektedir [7].

Aynı zamanda killer asfalt çimentosu ve polimer arasında uyumlaştırıcı etkiye de sahiptir. Asfalt ve polimer arasındaki yüksek uyum, polimerin asfalt içerisinde daha iyi dağılmasına neden olur ve çalışılan sistemin nihai reolojik özellikleri olumlu yönde etkilenir [103,104].

Nano-killer ucuz, ham maddesi doğal olarak bulunan, asfalt kaplamalar için sürdürülebilir özellikli malzemelerdir. Asfalt kaplamaların mekanik ve fonksiyonel özelliklerini stabilize etmek için polimer modifiye asfaltların mevcut kullanım miktarının bir kısmı nano-kil modifiye bitüm ile sağlanabilir [12].

Genelde, nano-teknoloji iki yönden fayda oluşturur. Birincisi, mevcut ürün ve süreçleri daha maliyet etkin, durabil ve etkili yaparak, ikincisi ise tamamen yeni ürünler üreterek olmaktadır. Polimer modifiye asfaltların depolama stabilitesini iyileştirme; UV yaşlanma direncini artırma; su, kar ve buz çözücüler altında su hasarı direncini artırma; asfalt karışımları düşük sıcaklık özelliklerini iyileştirme; enerji ve maliyet kazancı; bakım gereksinimlerinde azalma özellikleri asfalt ve asfalt karışım için nano-teknolojinin sağladığı faydalardandır [7].

Nanokilin uygulanmasıyla modifikasyon, sadece asfalt çimentosunun özelliklerini geliştirmemekte, aynı zamanda maliyette de önemli düşüş sağlamaktadır. Yorulma, tekrarlı trafik yüklerine veya gerilmelere maruz kalan asfalt kaplamalarda en önemli bozucu gerilmelerden birisidir. Bu nedenle tasarımcının, bağlayıcının yorulma karakteristiklerini bilmesi gerekmektedir. Organik nano-montmorillonitin (OMMT) yüksek hızlı karıştırıcı kullanarak, nanokil modifiye asfalt üretimi konusuna yönelik yapılan çalışmada XRD testi, modifiye bitümde dispersiyon yapısının belirlenmesi için kullanılmıştır. Yorulma testi,

dinamik kayma reometrisi ile modifiye bitümün yorulma direncinin belirlenmesinde kullanılmıştır. Araştırma sonuçları, nanokil içeren modifiye bitümün üstün yorulma direnci gösterdiğini göstermiştir [105].

Tablo 2. Nanokil özellikleri [106]

Özellik	Cloisite 15-A	Nanofil-15
Organik modifiyer	MT2ETOH (metil, bis-2 hidroksietil, dördüncü amonyum)	Nanodispers tabakalı silikat, uzun hidrokarbon zinciri
Köken	Montmorillonit	Montmorillonit
Modifiyer konsantrasyonu	90 meq/100g kil	75 meq/100g kil
Nem	<2%	<3%
Kızdırma kütle kaybı	43%	35%
Anyon	Klorit	Amonyum klorit
Partikül boyutu	10%'den küçük 2 μ m 50%'den küçük 6 μ m 90%'den küçük 13 μ m	5 μ m 15 μ m 25 μ m
Renk	Beyaz	Krem
Gevşek kütle, kg/m ³	230	190
Paket kütle, kg/m ³	364	480
Yoğunluk, gr/cc	1.66	1.88
X ışını sonuçları	d=31.5A	d=28 A
Plastisite indeksi	88%	85%

Karşılaştırmalı reolojik ve mekanik testlerle, geleneksel ve nanokil modifiye bitümler üzerinde gerçekleştirilen araştırmada, Nanofill-15 ve Cloisite-15A adlarında iki farklı nanokil ürünü (özellikler Tablo 2'de verilmiştir) kullanılmış, penetrasyon, yumuşama noktası, duktilite ve yaşlanma özellikleri incelenmiştir. Asfalt karışımlar üzerinde mekanik testler olarak, Marshall stabilitesi, dolaylı çekme dayanımı, esneklik

modülü, yorulma ve dinamik sünme testleri gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, modifiye olmayan bitümlü karşılaştırıldığında, nanokilin stabilite, esneklik modülü, dolaylı çekme dayanımı, bakımlarından üstün performans gösterdiğini vurgulamaktadır. Nanokiller, düşük sıcaklıklarda yorulma davranışı bakımından faydalı etkide görülmemiştir. Optimum bağlayıcı içeriği ve toplam karışımdaki boşluk (VTM) bitüme nanokilin katılmasıyla birlikte artmıştır [106].

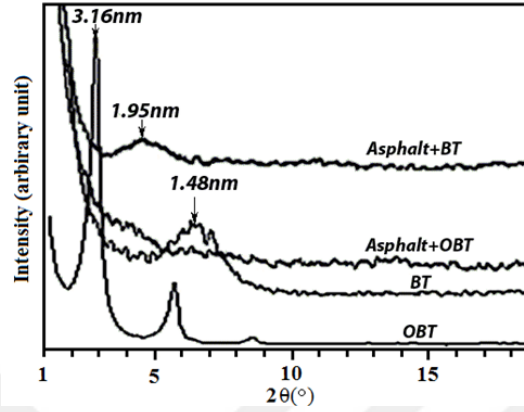
SBS, SBR, EVA polimerlerinin araştırılmasından SBS polimerin bağlayıcıda polimer matriksi oluşturarak reolojik özellikleri geliştirdiği görülmüştür. Ağ, iki aşamada oluşmaktadır. Düşük polimer konsantrasyonlarında SBS dağılmış polimer olarak davranır ve özellikleri önemli ölçüde etkilemez. Daha yüksek konsantrasyonlarda yersel SBS ağ şekillenmeye başlar ve kompleks modülde keskin bir artış oluşturur. Benzer olarak yumuşama noktası ve sağlamlıkta da artış gösterir [107].

Elastomer, plastomer, ince kauçuk, modifiye asfaltların kullanıldığı asfalt karışımların mekanik özellikleri incelenmiştir. Kısa ve uzun süreli yaşlanma söz konusu olduğunda, asfalt karışımlarda tekerlek izi ve sünme bakımlarından farklılıklar oluşmuştur. Kauçuk bitümlü asfalt betonu, %7 polimer modifiye bağlayıcı içeren asfalt betonu, TMA ve Superpave karışımlar uzun dönemli yaşlanmadan sonra kalıcı deformasyona karşı en dirençli karışımlar olarak bulunmuştur [108].

Nanokiller, mikro ölçülü filler olup, polimeri filler güçlendirmesi olarak daha etkin yaparlar. Mekanik testler, Cloisite maddesinin (nanokil) dolaylı çekme mukavemetini, sünme ve yorulma özelliklerini iyileştirdiğini göstermiştir. Yüzey modifiye monmorillonit nanokil ve uyumlu bir madde (compatibilizer) araştırılmış, poliamid polipropilen nanokompozitlerin dayanım ve rijitliklerinin geliştiği, bu durumun modifiye monmorilonit nanokilin ve uyumlu maddenin yapısından kaynaklandığı görülmüştür. Diğer bir araştırmada, Nanomer I.28E ve Cloisite 30B katkılarının saf epoksi polimerlerine ilavesinin, saf epoksi polimerine göre daha yüksek elastik modüllü malzeme oluşturduğu anlaşılmıştır [109].

Bentonit kili (BT) ve organik modifiye bentonit (OBT) bitümlü kaplama asfalt bağlayıcısının modifikasyonu amacıyla kullanılmıştır. Modifiye asfaltların yumuşama noktası, vizkozite, düktilite özellikleri, kil içeriği ve türünün bir fonksiyonu olarak test edilmiş, dinamik kayma reolojik testleri modifiye asfaltların daha yüksek tekerlek izi direnci gösterdiklerini işaret etmiştir. BBR testleri, RTFO ve PAV testleri, yaşlandırılmış

örnekler için çatlama ve yaşlanma yönlerinden önemli ölçüde performans artışını ortaya koymuştur [13]



Şekil 6. Bentonit (BT), orjinal modifiye bentonit (OBT), BT modifiye asfalt ve OBT modifiye asfaltların geniş açılı X-Ray difraksiyon şekilleri [13]

Nano-malzemelerin asfalt karışım performansını artırma özelliklerinin araştırıldığı çalışmada, asfalt bağlayıcı ağırlığına göre %2 ve %4 oranlarında montmorillonit, kullanılmıştır. Asfalt bağlayıcıya katılan nano-kilin asfaltın içerisinde exfoliye (pul-pul) olması için yüksek sıcaklık kullanılmıştır. Nanokil A ve Nanokil B ürünleri ortalama olarak viskoziteyi %41 ve %112 oranlarında artırmıştır. Dinamik kayma kompleks modülü (G^*), 13°C değerinden 70°C değerine giderken yükleme frekansı 0.01-25Hz düzeyine doğru önemli ölçüde artış göstermiştir. Asfalt bağlayıcıyı %2 Nanokil A güçlendirmesi ile kompleks kayma modülünde genellikle %66 oranında artış sağlanmıştır. Buna karşın %4 Nanokil A değerinde, %125 değeri oluşmuştur. %2 ve %4 Nanokil B türü sırasıyla %184 ve %196 artış oluşturmuştur. Direk çekme dayanımı anlamında, A ve B nanokillerinin kullanımı orijinal bağlayıcının şekil değiştirme kırılma oranını azaltmış, sekant veya direkt kayma modülü nanokillerin artışıyla doğru orantılı değişim göstermiştir [96].

Yol kaplamalarında kullanılan mikro veya nano boyutlu malzemelerin potansiyel yararları, karışımların suya ya da buz çözücü malzemelere olan etkisi bakımından araştırılmıştır. Asfalt karışımlar, çeşitli miktarlardaki nanokil/veya karbon mikrofiber içeriklerinde, Superpave yoğurmalı kompaktörü ile hazırlanmıştır. Su hasarı ve buz çözücü etkilerini belirlemek için örnekler suya ya da buz çözücü kimyasallara daldırılarak (NaCl, MgCl₂ and CaCl₂) değerlendirilmiştir. Yedi donma çözülme döngüsü ve AASHTO T283 testi modifiye edilerek uygulanmıştır. Değerlendirme, performans artışı sağlayan

mikrofiberlerin veya nanokillerin karışım özelliklerini geliştirmelerine bağlı olarak yapılmış, birçok durumda nanokil ve mikrofiberlerin su hasarını azalttığı görülmüştür. Nanokil dozajı arttığında kuru asfalt karışımların dayanımı azalmış fakat koşullandırma ile artmıştır. Karbon mikrofiberin ilavesi kuru örneklerin çekme dayanımını azaltmış fakat orta karbon mikrofiber içeriğinde (%0.75) örnekler koşullandırıldığında daha yüksek çekme dayanımları bulunmuştur. %1.5 nanokil içeriği su hasarı ve çekme dayanımları bakımından yüksek değerler sunmuştur. Genel olarak, daha zayıf NaCl çözeltileri ve daha güçlü MgCl₂ ve CaCl₂ çözeltileri daha yüksek çekme dayanımlı asfalt karışımlar olarak görülmüştür [94].

1.8. Sönmüş Kireç

Sıcak karışım asfaltlara sönmüş kireç, çoklu faydalar sağlamaktadır. Mevcut literatürde sönmüş kirecin su duyarlılığını kontrol etme yeteneği ve su hasarını önlemek için iyi bir soyulma önleyici olduğu noktalarında önemli ölçüde bilgiler yer almaktadır. Bununla birlikte, son çalışmalar sönmüş kirecin sıcak karışım asfaltlar üzerinde başka etkilerinin de olduğunu göstermiştir. Belirgin olarak, kireç aktif filler görevi görmek, antioksidan özellik sağlamak, sıcak karışım içerisinde ince malzeme ile reaksiyona girmektedir. Bu mekanizmalar, kaplamalar için başlıca yararlar oluşturmaktadır. Sönmüş kireç soyulmayı azaltmakta, asfalt bağlayıcıyı ve sıcak karışım asfaltı daha rijitleştirmekte, çatlama gelişimine karşı direnci geliştirmektedir. Düşük sıcaklıklarda çatlama direncini artırmaktadır. Oksidasyon kinetiğini olumlu olarak değiştirmekte, oksidasyon ürünlerinin zararlı etkilerini azaltmak için ürünlerle reaksiyona geçmektedir. Kil minerallerinin plastik özelliklerini değiştirmekte, nem stabilitesini ve durabilitesini olumlu yönde korumaktadır. Bu yönlerle olan iyileşmeler arazide de benzer gelişmelerin sağlanmasıyla gözlenmektedir. Servis döngüsü maliyet analizleri; kireç kullanma ile yaklaşık olarak, 20\$/ton düzeyinde kazanıma yol açıldığı ve arazi performans değerlerinin beklenen kaplama ömründe %38 artışa yol açtığını göstermektedir. Çeşitli karayolu birimleri, kirecin etkinliğinin soğuk yerinde yeniden kullanım (cold-in-place recycled mixtures –CIR) karışımlarında kanıtlandığını bildirmektedir. CIR karışımlarda kireç iyileştirmesi nihai stabilizeyi artırmakta bu da trafiğe erken açılma kolaylığını sağlamaktadır. Su hasarına karşı direnci iyileştirmekte, bu da önemli ölçüde kaplama ömrünü artırmaktadır. Çeşitli yöntemler

sönmüş kirecin katılması için kullanılmaktadır. Asfalt bağlayıcı giriş noktasında drum mikserine kuru olarak katılabilirken, çeşitli günler marinyasyona maruz kalmış agregaya da sönmüş kireç katılabilmektedir. 2003 yılında, kirecin katılma biçimiyle ilgili olarak düzenlenen bir raporda sönmüş kirecin kaplama ömrünü arttırdığı ve çoklu mekanizmalarla performans geliştiren bir katkı olduğu vurgulanmıştır [51].

Sönmüş kirecin sıcak karışım asfaltlara katılmasıyla sonuçlanan önemli faydalardan birisi, yüksek performanslı bir ürün elde edilebilmesidir. Faydalar, katkıların bireysel olarak kullanılmasına bağlı tanımlanabilmesine rağmen, sinerjik çalışma durumlarına bağlı olarak, nihai ürünün çoklu anlamda iyileşmesi söz konusu olabilmektedir. Sinerjik yararlar, kirecin, polimer katkılarla birlikte kullanılmasında, kanıtlanabilmektedir. Araştırmalar, kirecin ve polimerlerin, bazı durumlarda, bir arada kullanılmaları ile, tek başlarına kullanılmasına göre, daha yüksek performans artışı sağladığını, göstermektedir [110].

Asfalt kaplamalarda sönmüş kireç, soyulmayı, tekerlek izinde oturmaya, çatlamaya ve yaşlanmaya azaltmaktadır. Sönmüş kireç, tek başına kullanıldığında, bu başlıca kaplama problemlerini iyileştirmektedir. Ayrıca, polimer katkılarla da bir arada iyi çalışmakta, kaplama sistemlerinin, uzun yıllar boyunca beklentilere en yüksek derecede karşılık verebilmesini, sağlamaktadır. Tipik olarak, kullanım oranı, katılan sönmüş kirecin karışımın ağırlığına bağlı olarak %1-%2 oranında olması ya da sıvı asfalt bağlayıcının ağırlığının %10-20 arasında değişen düzeyde kalması olarak, önerilir. Çok farklı iklim ve yol koşullarında, sönmüş kirecin kaplamanın ömrünü arttırdığı bildirilmektedir. Arazi çalışmaları; kireçle iyileştirilmiş karışımların daha uzun kaplama ömrüne neden olduğunu, kirecin kaplamanın ömrünü %38 oranında artırdığını, yaşam-maliyet analizi döngüsü kirecin maliyet etkin olduğunu göstermektedir [111].

Mekanistik amprik modelleme, Amerika'nın değişik kısımlarında, 6 farklı projede, 17 farklı asfalt karışımının test edilmesiyle, sönmüş kirecin asfalt sıcak karışımların dinamik modülünü %17 ile %50 arasında artırdığını, ayrıca, göstermektedir [112].

Sönmüş kirecin, bulunan oldukça iyi-en etkin soyulma önleyici katkı olduğu, nemin etkisiyle asfalt ile agregaya arasındaki bağı kırıldığı ve soyulmanın oluştuğu, bağlayıcının agregadan ayrıldığı, belli tür agregaların özellikle soyulma eğiliminde olduğu, bunun yanı sıra kimyasal faktörler ve çevresel etkilerle ısının, ağır yağmurların, donma çözülme döngülerinin ve trafiğin soyulmada ana rol oynadığı, kirecin sıcak karışımda agregayla reaksiyona girdiği, bağlayıcı-agrega arasındaki bağı kuvvetlendirdiği, ayrıca bitümlerle de

tepkime yaptığı, soyulmaya neden olan suda çözünen sabun oluşumunu önleyerek yüksek polar moleküllerle tepkime oluşturduğu, oluşan yeni moleküllerin artık suya ilgi duymadığı, uzun dönemli performans anlamında çoklu donma çözülme döngüleri ile kirecin yüksek başarımının ortaya konulduğu belirtilmektedir [113].

Sönmüş kirecin asfalt karışımları daha sağlam, rijit ve tekerlek izinde oturmaya karşı daha dirençli yapma yeteneği, aktif mineral filler olarak bir yansımasıdır. Tekerlek izinde oturma, malzemenin elastikliğinin aşılmasıyla, kalıcı deformasyonun oluşmasıdır. Sönmüş kireç, kaplamayı bu yönüyle de (tekerlek izi) iyileştirmektedir. Birçok mineral filler inert olmasına karşın, kireç kimyasal olarak aktiftir. Bitümlerle reaksiyona girer, karışım içerisinde dağılarak tekerlek izi ve yorulma çatlama direncini artırır, dayanım artışı asfalt bağlayıcının PG oranının artmasıyla görülür. Kullanılma oranına bağlı olarak (genellikle sıvı-likit asfaltın %10-20 düzeyi) asfaltın PG sınıfı, tam olarak, bir derece artabilir. Diğer deyişle, PG64-22 bitümü, PG70-22 düzeyine ulaşmaktadır. Bununla birlikte, düşük sıcaklıklarda çatlama direncinin azalması ortaya çıkmamaktadır. Düşük sıcaklıklarda, sönmüş kireç daha az kimyasal aktif olmakta ve diğer inert fillerler gibi davranmaktadır.

1.9. Tekerlek İzi Problemi

Tekerlek izi problemi, kalıcı deformasyon veya konsolidasyonun zaman içinde bir asfalt kaplama yüzeyinde biriktiği anlamında bir terimdir. Bu tipik olarak yolda oluşmuş olan tekerlek yolu ile anılır. Asfalt yollar esnek kabul edilir ve bu, yaz aylarında eski asfalt yolların üzerindeki bağlayıcının ayakkabıların tabanına yapışmaya başladığı zaman gösterilebilir. Tekerlek izi, asfalt yollardaki agrega ve bağlayıcı hareket edebileceği için oluşur. Şekil 7’de tekerlek izi oluşmuş bir yol kesimi gösterilmiştir.



Şekil 7.Tekerlek izi oluşmuş yol kesimi [114]

İndiana ulaşım departmanı (IDOT), asfalt kaplama tasarımında, bir mühendisin çoğu durumda karşılaşılabileceği tekerlek izinin önlenmesine yönelik standartlara sahiptir. Tekerlek izi; sıkıştırma, sıkıştırma eksikliği, yetersiz kaplama kalınlığı ve zayıf asfalt karışımlarından (Walker) kaynaklanabilir. Spesifikasyonlar, asfalt yolların, tekerlek izi ve diğer problemlerin oluşmaması için dizayna bağlı olarak inşa edilmesini gerektirir. Bu özellikler, asfaltın nasıl sıkıştırıldığı, temel tabakasının kalınlığı veya sıcak karışım asfaltındaki (HMA) agrega içeriği gibi elemanlarla düzenlenebilir. Kaplama kalınlığına gelince, genellikle alt tabaka yetersiz kalınca ya da yumuşak bir şekilde malzemenin bastırılmasına izin verdiği zaman tekerlek izi meydana gelir. Daha sert, daha güçlü bir alt tabana sahip olmak, meydana gelen kırılma olasılığını azaltmanın anahtarıdır. Altyapı, yolun inşa edildiği desteği sağladığı için yol sistemleri için çok önemlidir. Bu nedenle IDOT tarafından belirlenen tasarım prosedürlerine uyulmalı ve inşaat süreci mühendis tarafından verilen planları da takip etmelidir [115].

Tekerlek izinin meydana gelmeyeceği kaliteli bir yol inşa etmek için, kaplamanın kalite kontrol için izlenmesi gerekir. Asfalt yüzeyinin kalitesinin sağlanmasında, ağırlığın uygulanması ve asfaltın bir bölümü üzerindeki silindirin geçiş sayısı önemli bir rol oynamaktadır. Yine de yaygın olmayan bir uygulama, GPS sisteminin bir kombinasyonunu kullanmaktır ve silindirde, silindirin izlediği yolu izleyen sensörler kullanılabilir. Geleneksel yöntemle, çoğu zaman bu alandaki tekerlek izi riskini neredeyse kaçınılmaz kılan, elde edilmesi amaçlanan sıkıştırma işlemlerini hiç almayan yolların kesilmesiyle sonuçlanan geçişler kaçırılır. Bir silindirin bir HMA bölümü üzerinden geçmesi gereken

tipik mesafe, yolun etkili bir şekilde sıkıştırıldığından emin olmak için 3-4 kattır. Asfaltın soğuması için gereken sürenin kısa sürede tamamlanması zor olabilir. HMA'nın sıcaklığı azaldıkça agreganın kompaktlaşma potansiyeli kaybolur [116].

1.10. Marshall Testi ve Marshall Oranı Değerlendirmesi

Marshall testi ASTM-D1559 standardı ile geleneksel ve pirinç kabuğu külü (Rice Husk Ash, RHA) modifiye asfalt karışımlarının Marshall'ın kararlılığını değerlendirmek için yapıldı. Karışımların optimum bitüm içeriği bu test ile belirlendi. Asfalt karışımları su banyosu içinde 30 dakika boyunca 60 C'de daldırıldı ve daha sonra bir sabit ile yükleme 50.8 mm / dak sıkıştırma oranı uygulandı. Marshall stabilite değeri, yükmeden kaynaklanan yatay ve kayma gerilmesi ile asfalt karışımlarının basınca karşı direncini gösterir [117].

Marshall testinden elde edilen önemli verilerden birisi stabilitenin (kN) akmaya (mm) oranıdır. Marshall oranı olarak belirtilen bu MQ oranı değerlendirilerek, asfalt karışım dayanımı, deformasyon ve tekerlek izi tahmin edilmeye çalışıldı. Yüksek MQ değeri, asfalt karışımının daha rijit olduğunu ve kalıcı deformasyona karşı daha dirençli olduğunu gösterir [118,119].

Bir tekerlek izi göstergesi olarak MQ oransal değeri, asfalt karışımının tekerlek izi mukavemeti anlamında RHA ilavesiyle pozitif ilişkide bulundu [120].

Stabilitenin akmaya oranı Marshall oranı (MQ) olarak bilinir. MQ bir çeşit kısa pseudo rijitlikdir, bu da karışımın kalıcı deformasyona karşı direncinin bir ölçüsüdür [121]. MQ, stabilitenin akmaya oranı olarak hesaplanır. Bu oran, karışım rijitliğinin, kayma gerilmesinin direncinin, kalıcı deformasyonun ve asfalt betonun tekerlek izinin bir göstergesidir [122-124].

Daha yüksek bir MQ değeri, uygulanan yükü daha iyi yayma yeteneği yüksek olan yüksek rijitlikli karışımını gösterir. Bu nedenle kalıcı deformasyona daha dayanıklı olan kaplamalar elde edilir. Ancak, literatürde MQ artışının asfalt karışımlarının tekerlek izi direncine etkisi konusunda net bir fikir birliği yoktur. Son zamanlarda, polimer modifiye edici içeren asfalt karışımlarının tekerlek izi performansı araştırılmıştır. MQ'nun kalıcı deformasyonun ölçülmesi için iyi bir gösterge olamayacağı bulunmuştur [125].

Ayrıca, Marshall oranı (MQ), stabilitenin (KN) akmaya (mm) oranıdır ve Karışım sertliğinin bir göstergesi de sunulmaktadır [127]. Marshall oranı değerinin tekerlek izi direncinin bir göstergesi olarak kullanılabilceği değerlendirilmektedir [127].

Marshall ve Marshall parametreleri (Marshall stabilitesi, Marshall akması, Marshall oranı gibi) arasında pozitif bir korelasyon bulunmuştur. Araştırmada değerlendirilen tüm karışımlar için geçerli olup, bu sıkıştırma ve mekanik yükleme sırasında parçacıklar arası dirence bağlanabilir. Gelişmiş amprik denklemler ve istatistiksel analiz, ilişkilerin doğasının toplam gradasyona, nominal maksimum agrega boyutuna ve asfalt bağlayıcı tipine duyarlı olduğunu göstermiştir [128].

HDPE ve CRP ile modifiye edilen HMA karışımları, yüksek MQ değerleri ve yüksek Marshall mukavemeti (stabilite) nedeniyle daha iyi deformasyon dirençleri sergilemiştir [129].

1.11. AASHTO T283 Modifiye Lottman Testi

AASHTO Standart Test Yöntemi T283, “Sıkıştırılmış Bitümlü Karışımın Suya Bağlı Hasara Karşı Direnci”, HMA nem duyarlılığının belirlenmesinde en sık kullanılan prosedürlere biridir. Test, birkaç istisna dışında orijinal Lottman'a benzer. Modifikasyonlardan biri, vakum doygunluğunun, %70 ile %80 arasında bir doyma seviyesi elde edilene kadar sürdürüldüğü ve 30 dakikalık bir süre gerektiren orijinal Lottman prosedürüne kıyasla devam ettirilmesidir. Başka bir değişiklik test sıcaklığında ve mukavemet testi için yükleme hızındadır. Modifiye edilmiş prosedür, 55°F'da 0.065 in./dk yerine 2°/dak'da 2in/dakika hızında bir hız gerektirir. Marshall deneyi test cihazı ile numunelerin test edilmesine izin vermek için daha yüksek bir yükleme oranı ve daha yüksek bir sıcaklık seçilmiştir. Çoğu asfalt laboratuvarında mevcuttur. Yüksek sıcaklık da bir soğutma sistemi ihtiyacını ortadan kaldırır.

Kısaca test, gevşek karışımların 16 saat süreyle 60°C'de kür edilmesini, ardından 135°C'de 2 saatlik bir yaşlanma sürecini içerir. En az altı numune hazırlanır ve sıkıştırılır. Sıkıştırılan numunelerde hava boşluğu içeriği %6.5 ile %7.5 arasında olmalıdır. Sıkıştırılan numunelerin yarısı, bir su banyosunun ardından bir donma (isteğe bağlı) çevrimi ile koşullandırılır. İlk önce, kısmen doyurucu örnekler %55 ila %80 arasında bir seviyeye kadar vakum uygulanır. Vakumla doyurulmuş numuneler, -18°C'lik bir dondurucuda 16

saat tutulur ve daha sonra 24 saat boyunca 60°C'lik bir su banyosuna yerleştirilir. Bu süreden sonra örnekler kılmalı olarak kabul edilir. Diğer üç örnek koşulsuz kalır. Tüm numuneler sabit bir sıcaklığa getirilir ve dolaylı gerilme mukavemeti hem kuru (koşulsuz) hem de şartlandırılmış örnekler üzerinde ölçülür.

1.12. Dolaylı Çekme Mukavemeti

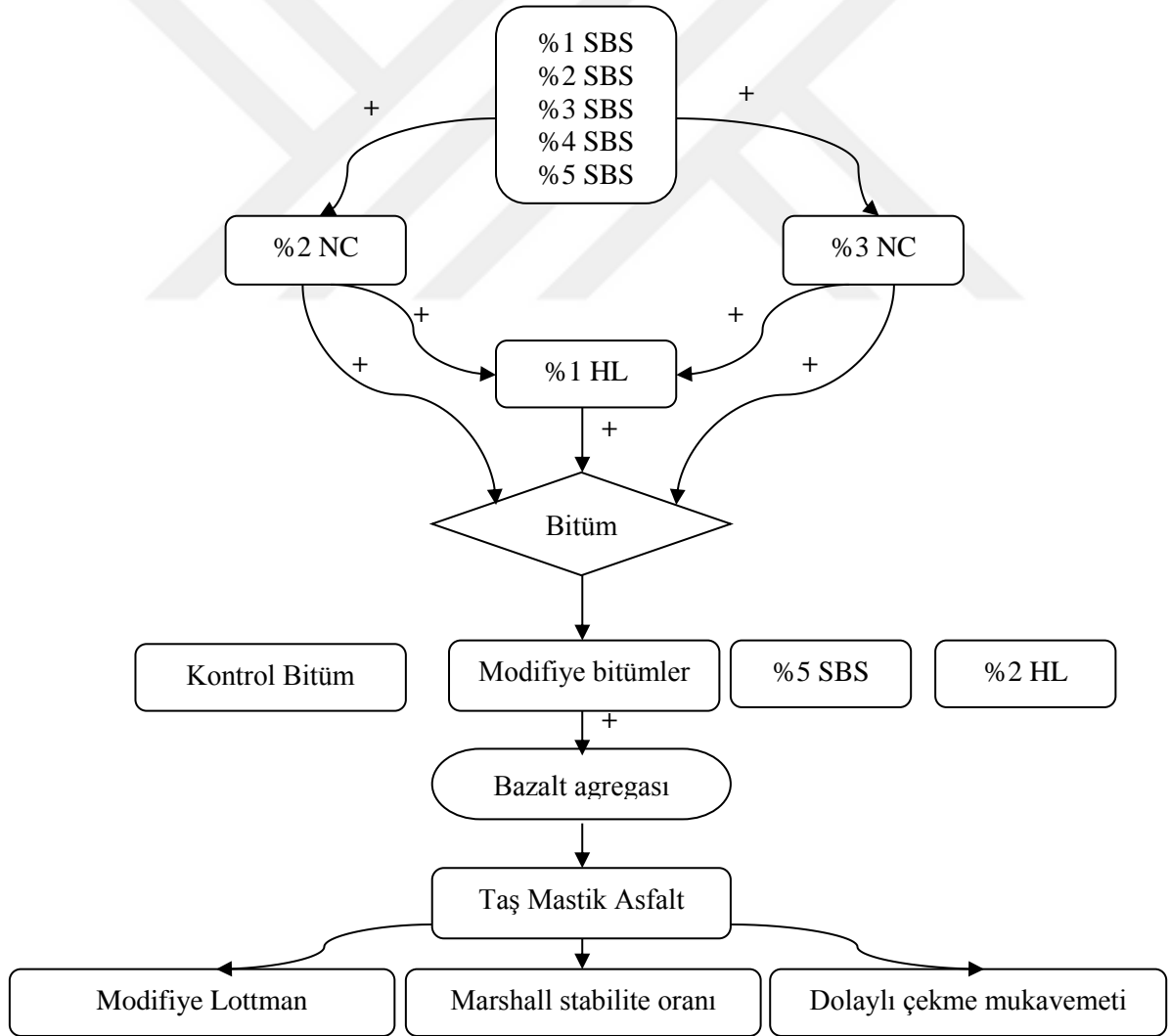
Soyulma önleyici katkı maddelerinin nem duyarlılık özelliği üzerine etkisini araştırmak için dolaylı çekme mukavemeti (ITS) testi yapıldı. Neme bağlı hasar, çekme mukavemeti oranlarının (TSR) spesifik sınırları tarafından kontrol edilir. ITS testi asfalt karışımların suya karşı direncini değerlendiren kore standardına göre (KS F 2398) 100 mm çapında ve 63.5 mm yüksekliğinde hava boşluklarında 7 ± 0.5 oranında sıkıştırılmış örnekler ile gerçekleştirilmiştir. Örnekler iki alt kümeye, kuru ITS testi için koşulsuz alt kümeye ve ıslak ITS testi için koşullandırılmış alt kümeye ayrılmıştır. Koşullu numuneler için, su ile doyurulmuş bir vakum kabına yerleştirildikten sonra, yüzde 55 ila 80 arasında su ile doyuruldu. 5-11 kPa mutlak basınçta bir vakum 5-10 dakika süreyle uygulandı. Her numune 10 mL su içeren bir plastik torbaya sarıldı ve en az 16 saat süreyle 18°C'de bir dondurucuya yerleştirildi. Koşullandırılan örnekler, 24 saat 60°C'de damıtılmış su banyosunda eritildi. Koşullandırılan numuneler koşullandırılırken, koşulsuz numuneler oda sıcaklığında saklandı. Tüm örnekler testten en az 2 saat önce 25°C su banyosunda kürlendi. TSR değeri, nem duyarlılığının bir ölçüsüdür, ıslak-şartlandırılmış numunelerin (ıslak ITS) gerilme mukavemetinin, koşulsuz numunelerin (kuru ITS) gerilme mukavemetine oranı hesaplanmış ve asfalt karışımlarının nem duyarlılık indeksi olarak kullanılmıştır. Daha yüksek bir TSR değeri tipik olarak karışımın neme karşı iyi bir dirençle iyi performans göstereceğini işaret eder. Soyulma önleyici katkılı tüm karışımlar, %80'lik minimum TSR değeri olan kriterleri karşılamaktadır. Testlerin makul olarak kabul edilebilir olduğu görülmektedir [130].

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Giriş

Bu bölümde; çalışmanın deneysel programıyla birlikte kullanılan bitüm, agrega, SBS polimeri, sönmüş kireç ve nanokil malzemelerine yapılan deneyler ve sonuçları verilmiş ve karışım tasarımına ait bilgiler sunulmuştur.

SBS polimeri bitüm ağırlığına göre %1, %2, %3, %4 ve %5 oranlarında seçilerek nanokil ve nanokil-sönmüş kireç ile birlikte kullanılmıştır. Nanokil %2 ve %3 oranlarında, sönmüş kireç ise %1 oranında SBS polimeri ile kullanılmıştır (Şekil 8).



2.2. Çalışmada Kullanılan Malzemeler

2.2.1. Bitümlü Bağlayıcı ve Özellikleri

Araştırmada, 50/70 penetrasyon dereceli bitüm kullanıldı. Bitümün geleneksel test sonuçları Tablo 3'te gösterilmiştir.

Tablo 3. Asfalt çimentosu özellikleri (AC 50-70)

Test	Yöntem	Değer	Şartname limitleri
Özgül ağırlık (25°C)	ASTM D-70	1.011	
Yumuşama noktası (°C)	TS EN 1427	52	46-54
Parlama noktası (°C)	TS EN ISO 2592	240	En az 230
Penetrasyon (25°C), 0.1mm	TS EN 1426	63	50-70
Düktilite (25°C)	ASTM D-113	100+	

2.2.2. Agregta Özellikleri

Agregalar Trabzon İli, Zigana yöresi bazalt taşocağından elde edilmiştir. Bazalt agregasının temel fiziksel özellikleri Tablo 4'te verilmiştir.

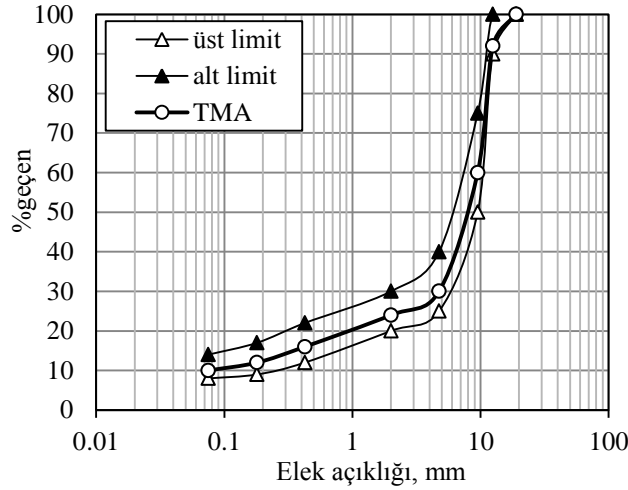
Tablo 4. Bazalt agregasının temel özellikleri

Özellik	Deney metodu	Değer	Şartname limitleri
Özgül ağırlık (Kaba agregta)	ASTM C 127		
Hacim		2.657	
Zahiri		2.753	
Özgül ağırlık (İnce agregta)	ASTM C 128		
Hacim		2.627	
Zahiri		2.784	
Özgül ağırlık (filler)		2.821	
Parçalanma direnci (Los Angeles) (%) kayıp	TS EN 1097-2	12	En fazla 25
Yassılık indeksi, (%)	BS 812	14	En fazla 25
Soyulma direnci (katkısız) (%)	ASTM D-1664	35-40	
Cilalanma değeri, (%)	TS EN 1097-8		En az 50
Absorbsiyon (kaba agregta), (%)	TS EN 1097-6	1.31	En fazla 2
Absorbsiyon (kaba agregta), (%)	TS EN 1097-6	2.14	En fazla 2
Donma kaybı (NaSO ₄) (%)	ASTM C-88	0.92	En fazla 8
Kil toprakları ve ufalanabilir daneler, (%)	ASTM C 142		Bulunmayacak
İnce agregta için plastisite indeksi	TS-1900-1	Plastik değil	Plastik değil
İnce agregta için organik madde, (%)	TS EN 1744-1		Negatif

Karayolları Teknik Şartnamesi (2013) taş mastik asfalt (TMA TİP-1 A) uygun agrega gradasyonu seçilmiştir. Maksimum agrega boyutu 19mm alınmış, agrega gradasyonu ve fraksiyon oranları Tablo 5’te sunulmuştur. Gradasyon eğrisi ise Şekil 9’da gösterilmiştir.

Tablo 5. TMA gradasyonu ve fraksiyonları

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



Şekil 9. TMA gradasyon eğrisi

2.2.3. SBS ve Özellikleri

Çalışmada, Kraton D 1101ASM (SBS) elastomerik polimeri kullanılmıştır. Toz formundaki SBS, bitüme, bitüm ağırlığının %1-%5'i oranında yüksek kesme özellikli

mikserle karıştırılmıştır. SBS katkısının üretici firma tarafından sağlanan fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 6’da gösterilmiştir.

Tablo 6. SBS katkısının bazı fiziksel ve mekanik özellikleri [131]

Fiziksel Özellikler	Değer	Birim	Deney standardı
Erime akma indeksi, MFI	1	g/10dak.	ISO 1133
Sıcaklık	200	°C	-
Yük	5	kg	-
Mekanik özellikler			
Çekme mukavemeti	33	MPa	ISO 527
300% uzamadaki gerilme	8.7	MPa	ISO 527
Kopmada deformasyon	>300	%	ISO 527

Bitümün ve bitümlü sıcak karışımların fiziksel ve reolojik özelliklerini iyileştirmek için polimerler de dahil olmak üzere çeşitli katkı maddeleri ilave edilmektedir. Bu katkı maddeleri arasında Stiren-ButadienStiren (SBS) blok kopolimerleri en sık kullanılan katkılardan biridir. SBS polimeri genellikle %5 oranında bitüme katılmaktadır. Bu oranda SBS bitüm içerisinde uzaysal bir ağ oluşturmaktadır. SBS modifiyeli bitümlerde modifikasyonun etkili şekilde oluşabilmesi; SBS konsantrasyonu ve yapısına, bitümün yapısına, karıştırma sıcaklığı ve süresi gibi faktörlere bağlıdır. Yapılan araştırmalarda SBS’in karışımın düşük sıcaklıklarda çatlama, yüksek sıcaklıklarda tekerlek izi oluşumu ve yorulmaya karşı dayanımı arttırdığı görülmüştür [132-135].

2.2.4. Sönmüş Kireç (HL) ve Özellikleri

SBS katkı maddesi ile birlikte ikinci katkı olarak, SKK 80-T tipi sönmüş kireç (HL) kullanılmıştır. Sönmüş kireç bitüm ağırlığının %1-%3’ü oranında kullanılabilir. Bu çalışmada, SBS ile birlikte kullanıldığında %1 oranında sabit olarak agrega karışımına filler yerine sönmüş kireç ilave edilmiştir. Performans karşılaştırması yapmak için ise yalnızca %2 sönmüş kireç ilaveli karışım örnekleri hazırlanmıştır. Sönmüş kirecin kimyasal analiz sonuçları Tablo 7’de sunulmuştur.

Tablo 7. Sönmüş kirecin kimyasal analiz sonuçları [136]

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

Sönmüş kireç asfalt karışımların su hasarı ve donma direncini artırmak için etkili bir katkı maddesidir. Mevcut test yöntemleri sönmüş kirecin yararlı etkilerini ortaya koymaktadır. Sönmüş kireç özellikle ABD’de son 40 yıldır yaygın olarak kullanılmaktadır. Bazı eyaletlerde ise kullanılması zorunlu tutulmaktadır. HL soyulma önleyici katkı maddesi olmakla birlikte bitümün kimyasal yaşlanmasını ve viskozlaştırıcı bileşeni olan asfaltenlerin oluşumunu önemli derecede azaltmaktadır. Karışımın sönmüş kireç ile modifiye edilmesi durumunda, 45-60°C aralığında oluşan tekerlek izi direncinin, yaklaşık %75 oranda iyileştiği, karışım durabilitesinin arttığı görülmüştür. ABD’deki uygulama tecrübeleri, karışıma, kuru agrega ağırlığı olarak %1-1.5 oranında sönmüş kireç katmanın asfalt karışımların dayanımını 2 ila 10 yıl (%20-%50) arasında artırdığını göstermektedir [137].

2.2.5. Nanokil (NC) ve Özellikleri

Nanoteknoloji son yıllarda hızla gelişmekte ve bir çok ürün pazara sunulmaktadır. Bu ürünler arasında yer alan nano tüpler, nano lifler, polimerleşmiş tozlar, nano boyutlu plastik tozlar, nano sönmüş kireç, nano silika ve nano kil gibi ürünler asfalt kaplama mühendisliğinde de kullanım alanı bulmaktadırlar. Bitümün veya asfalt karışımın nanomalzemelerle modifiye edilmesiyle hem bitümün reolojik ve fiziksel özellikleri

geliştirilebilmekte hem de asfalt karışımın mekanik özellikleri iyileştirilebilmektedir. Nanokiller aynı zamanda polimerlerle birlikte kullanıldığında polimer ile bitüm arasında uyumlaştırıcı görevi görmekte ve polimer modifiye bitümün depolama stabilitesini arttırmaktadır [138].

Çalışmada kullanılan nanokil (NC) Eczacıbaşı ESAN tarafından üretilmiştir. Eskişehir bölgesi bentonitlerinden üretilen nanokil için organik modifiyer olarak “dimethyl, dehydrogenated tallow, quaternary ammonium” kullanılmıştır. Üretilen nanokilin kimyasal özellikleri Tablo 8’de sunulmuştur. Nanokil bitüm ağırlığına göre %2 ve %3 olmak üzere iki oranda, yüksek kesme etkili mikserle bitüme ilave edilmiştir. Modifikasyon, 170°C sıcaklıkta 30 dakika süre ile 4500rpm karıştırma hızında yapılmıştır.

Tablo 8. Kullanılan nano kilin kimyasal analiz sonuçları [138]

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

2.2.6. Selüloz Elyaf ve Özellikleri

Asfalt karışım tasarımı KGM (2013) [139] şartnamesi TMA Tip 1 A'ya göre yapıldı. Şartamede, aşınma tabakası için %0.3-%1.0 oranında süzülme önleyici elyaf kullanılması öngörülmektedir. Süzülme önleyici katkı olarak VIATOP Premium® marka selülozik elyaf kullanılmıştır. Pellet şeklinde olan selülozik elyaf agrega karışımına %3 oranında eklenmiştir. Selüloz elyafın bir görüntüsü Şekil 10'da, üretici firmanın sağlamış olduğu genel özellikleri de Tablo 9'da verilmiştir.

Tablo 9. Selüloz elyaf özellikleri [140]

Özellik	Değer
Şekil	Silindirik granül
Selüloz içeriği, (%)	87-93
Granül ortalama çapı	5±1mm
Granül ortalama uzunluğu	2-8mm
Yoğunluk	440-520g/l



Şekil 10. Süzülme önleyici selüloz fiber katkısı

2.3. Karışım Tasarımları

Yukarıda özellikleri verilen materyallerle, ASTM D 1559 standardına göre Marshall tasarımı ile taş mastik asfalt dizaynı yapıldı. Karayolları Genel Müdürlüğü, Karayolları Teknik Şartnamesi (KTŞ 2013) esas alındı. Optimum bitüm içeriği, geleneksel bitümlerle, %3 hava boşluğunu veren bitüm oranı olarak alındı ve %6.8 olarak belirlendi. Marshall

tasarım formu Tablo 10’da ve optimum bitüm içeriğindeki (geleneksel bitüm ile) karışım özellikleri ve ilgili karışımın şartname limitleri de Tablo 11’de verilmiştir.

Tablo 10. Marshall tasarım formu

Briket No	Bitüm	Ort. Briket yük. (mm)	Havad. Ağırlık (gr)	Sudaki Ağırlık (gr)	Doy. Yüz. Kuru Ağ. (gr)	Hacim (cm ³)	Pratik Özgül Ağırlık	Max Teorik Özgül Ağırlık	Boşluk %	VMA %	Asfaltla Dolu Boşluk %	Akma mm	Düzeltilmiş Stabilitate kg
	Wa, %		A	C	B	B-C	Dp	Dt	Vh	VMA	Vf		
1	4.5	67.2	1181.3	684.9	1200.9	516.0	2.289	2.532	9.43	19.19	50.89	1.02	47
2	4.5	67.2	1186.1	688.7	1203.7	515.0	2.303					1.10	45
3	4.5	67.0	1189.8	687.5	1207.8	520.3	2.287					1.25	45
							2.293						
4	5.0	65.7	1176.0	681.7	1189.2	507.5	2.317	2.514	8.03	18.92	57.55	1.17	47
5	5.0	67.1	1191.9	690.3	1207.6	517.3	2.304					1.13	46
6	5.0	66.5	1190.8	689.1	1203.7	514.6	2.314					1.19	48
							2.312						
7	5.5	65.7	1196.2	693.0	1205.8	512.8	2.333	2.496	6.29	18.35	65.74	1.26	47
8	5.5	65.4	1193.2	689.4	1199.5	510.1	2.339					1.16	46
9	5.5	65.6	1196.1	692.0	1201.9	509.9	2.346					1.23	47
							2.339						
10	6.0	65.9	1210.4	702.7	1212.9	510.2	2.372	2.479	4.58	17.83	74.28	1.45	48
11	6.0	65.1	1197.4	693.1	1200.8	507.7	2.358					1.34	47
12	6.0	64.8	1196.2	692.9	1198.7	505.8	2.365					1.19	47
							2.365						
13	6.5	65.0	1204.5	698.4	1207.4	509.0	2.366	2.462	3.50	17.84	80.40	1.58	47
14	6.5	64.8	1203.5	699.4	1205.2	505.8	2.379					1.52	47
15	6.5	64.7	1203.3	700.1	1205.2	505.1	2.382					1.36	47
							2.376						
16	7.0	64.3	1212.4	704.0	1213.2	509.2	2.381	2.446	2.69	18.09	85.13	1.45	45
17	7.0	64.6	1201.6	696.7	1202.8	506.1	2.374					1.93	46
18	7.0	63.8	1207.8	702.0	1208.5	506.5	2.385					1.42	46
							2.380						

Tasarım parametrelerine uygun olarak, belirlenen bitüm içeriğinde, geleneksel bitüm (kontrol), SBS modifiye bitüm, sönmüş kireç (HL) modifiye karışım (agregaya %2 oranında), SBS-nanokil (NC) modifiye bitüm (SBS: %5; %4; %3; %2; %1 ve NC: %3 ve

%2 oranlarında), SBS-NC-HL modifiye bitüm ile (SBS: %5; %4; %3; %2; %1, NC: %3; %2 ve HL: %1 agrega karışımına, filler yerine) 101.6mm çaplı Marshall briketleri üretilmiştir. Optimum bitüm içeriğindeki karışım özellikleri Tablo 11’de gösterilmiştir. Üretilen briketlerden bir görüntü Şekil 11’de gösterilmiştir. Marshall briketlerinin özellikleri de Tablo 12 – Tablo 33’te verilmiştir.

Tablo 11. Optimum bitüm içeriğindeki TMA karışım özellikleri

Tasarım parametreleri	Şartname limitleri	Değer
Darbe sayısı, her bir yüze	50	50
Yoğunluk, gr/cm ³		2.379
Marshall stabilitesi, kN		46.1
Hava boşluğu, V _h , %	2-4	3
Asfaltla dolu boşluk, V _f , %		84
Akma, mm		1.58
Bitüm içeriği, W _a , %	En az 5.8	6.8
VMA, %	En az 16	17.98
Elyaf miktarı, %	0.3-1.0	0.3
Schellenberg bitüm süzülme değeri, %	En fazla 0.3	0.18



Şekil 11. Değişik SBS ve nanokil oranlarında hazırlanan karışım örneklerinden bir görüntü

Tablo 12. Üretilen katkısız karışım örneklerinin özellikleri

Briket No.	Havadaki ağırlık (gr)	Sudaki ağırlık (gr)	Doygun yüzeyi kuru ağırlık (gr)	Pratik yoğunluk (gr/cm ³)	Yükseklik (mm)			Ortalama Yükseklik (mm)
					H ₁	H ₂	H ₃	
1	1209.9	701.1	1210.9	2.373	65.09	65.31	64.96	65.12
2	1204	699	1205.1	2.379	63.95	64.13	63.93	64.00
3	1191.1	693.5	1193.9	2.380	64.11	64.23	64.08	64.14
4	1203.2	698.3	1205.1	2.374	64.37	64.13	64.43	64.31
5	1204.3	699.9	1205.5	2.382	64.29	64.34	64.25	64.29
6	1195.5	694.8	1196.9	2.381	63.91	64.16	63.89	63.99
7	1202.6	698.3	1204.3	2.377	64.23	64.31	64.29	64.28
8	1214.6	706.4	1215.6	2.385	64.57	64.65	64.83	64.68
9	1203.6	698.1	1204.6	2.376	64.15	64.23	64.19	64.19
10	1200.5	696	1201.8	2.373	64.46	64.31	64.44	64.40
11	1199.3	696.2	1200.3	2.379	64.45	64.23	64.29	64.32
12	1207.1	702.8	1207.6	2.391	64.17	64.08	64.01	64.09
13	1205.8	699.5	1206.6	2.378	64.83	64.79	64.74	64.79

Tablo 13. Üretilen %5 SBS katkılı karışım örneklerinin özellikleri

Briket No.	Havadaki ağırlık (gr)	Sudaki ağırlık (gr)	Doygun yüzeyi kuru ağırlık (gr)	Pratik yoğunluk (gr/cm ³)	Yükseklik (mm)			Ortalama Yükseklik (mm)
					H ₁	H ₂	H ₃	
1	1205.7	684.3	1209.5	2.296	67.22	67.13	68.8	67.72
2	1212.2	691.5	1214	2.320	65.85	65.67	65.79	65.77
3	1218.6	698.4	1219.2	2.340	65.3	65.31	65.08	65.23
4	1208.8	692.7	1209.6	2.339	65.07	64.82	64.95	64.95
5	1212.2	688.6	1214.5	2.305	66.71	66.52	66.44	66.56
6	1202.4	684.9	1206.5	2.305	66.64	66.93	66.59	66.72
7	1203.5	690.2	1205.8	2.334	65.65	65.79	65.83	65.76
8	1203.6	694.5	1204.9	2.358	64.81	64.8	65	64.87
9	1217.4	700.3	1218.6	2.349	65.64	65.79	65.52	65.65
10	1224.7	706.8	1225.8	2.360	65.81	66.03	65.91	65.92
11	1209.6	695.7	1212	2.343	66.17	66.48	66.65	66.43
12	1201.8	690.9	1203.8	2.343	65.64	65.81	65.8	65.75
13	1203.1	697.3	1204.4	2.373	65.11	65.01	64.66	64.93

Tablo 14. Üretilen %5 SBS-%3NC katkıli karışım örneklerinin özellikleri

Briket No.	Havadaki ağırlık (gr)	Sudaki ağırlık (gr)	Doygun yüzeyi kuru ağırlık (gr)	Pratik yoğunluk (gr/cm ³)	Yükseklik (mm)			Ortalama Yükseklik (mm)
					H ₁	H ₂	H ₃	
1	1217.4	693.3	1218.4	2.318	66.03	66.18	66.14	66.12
2	1201.3	680.5	1203.1	2.299	65.49	65.73	65.78	65.67
3	1197.3	680.6	1198.5	2.312	65.27	65.22	65.24	65.24
4	1219	691.5	1220.9	2.303	66.59	66.44	66.54	66.52
5	1206.9	686.4	1208.7	2.311	65.68	65.48	65.72	65.63
6	1195.7	681.4	1196.8	2.320	65.65	65.99	65.45	65.70
7	1203.6	687.5	1205.5	2.324	65.84	65.86	65.86	65.85
8	1193.6	682.3	1196.5	2.321	65.66	65.63	65.69	65.66
9	1194.7	687.2	1196.8	2.344	64.82	64.73	64.61	64.72
10	1207.2	693.3	1208.3	2.344	65.54	65.54	65.38	65.49
11	1203.7	695.4	1205	2.362	64.96	65.1	65.09	65.05
12	1210.9	700.4	1212.6	2.364	66.22	65.94	66.08	66.08
13	1219.6	707.5	1219.6	2.382	66.13	66.15	66.18	66.15

Tablo 15. Üretilen %4 SBS-%3NC katkıli karışım örneklerinin özellikleri

Briket No.	Havadaki ağırlık (gr)	Sudaki ağırlık (gr)	Doygun yüzeyi kuru ağırlık (gr)	Pratik yoğunluk (gr/cm ³)	Yükseklik (mm)			Ortalama Yükseklik (mm)
					H ₁	H ₂	H ₃	
1	1207	699.2	1207.2	2.376	65.17	65.39	65.18	65.25
2	1198.9	695.3	1199.3	2.379	64.86	64.85	65.01	64.91
3	1188.6	680	1192.3	2.320	66.28	66.25	66.31	66.28
4	1224.1	697.1	1227.1	2.310	66.65	66.59	66.65	66.63
5	1201.2	667	1205.6	2.230	66.06	66.23	66.13	66.14
6	1215.6	681.3	1217.7	2.266	65.7	65.57	65.74	65.67
7	1202.9	669.1	1205.3	2.243	65.35	65.42	65.38	65.38
8	1203.1	670.6	1205.3	2.250	65.69	65.76	65.74	65.73
9	1181.8	661	1183.7	2.261	64.78	64.84	65.07	64.90
10	1189.3	666.6	1192.7	2.261	65.2	65.25	65.21	65.22
11	1198	674.5	1201.4	2.274	65.31	65.39	65.05	65.25
12	1238	697.7	1238.7	2.288	66.76	66.78	66.65	66.73
13	1196.3	675.1	1197.7	2.289	64.96	65.14	64.93	65.01

Tablo 16. Üretilen %3 SBS-%3NC katkıli karışım örneklerinin özellikleri

Briket No.	Havadaki ağırlık (gr)	Sudaki ağırlık (gr)	Doygun yüzeyi kuru ağırlık (gr)	Pratik yoğunluk (gr/cm ³)	Yükseklik (mm)			Ortalama Yükseklik (mm)
					H ₁	H ₂	H ₃	
1	1196.3	681	1197.3	2.317	63.96	63.96	63.87	63.93
2	1203.8	683.3	1204.9	2.308	64.94	65.58	65.06	65.19
3	1214	686.4	1215.6	2.294	66.41	65.74	65.64	65.93
4	1202.3	684.1	1204.7	2.309	65.06	65.04	65.24	65.11
5	1210.2	690.9	1213.4	2.316	65.04	65.11	65.04	65.06
6	1204.9	685.7	1207	2.311	65.26	65.01	65.16	65.14
7	1214.2	694.4	1216	2.328	65.23	65.27	65.19	65.23
8	1192.2	680.3	1195.1	2.316	64.81	65.02	65.05	64.96
9	1210.7	692.7	1212.9	2.327	65.39	65.42	65.53	65.45
10	1200	679.5	1204.1	2.287	67.52	67.64	67.85	67.67
11	1196.1	684.6	1197.1	2.334	65.22	65.27	65.37	65.29
12	1204.8	695	1205.9	2.358	65.56	65.6	65.75	65.64
13	1216.4	701	1217.4	2.356	65.56	65.68	65.34	65.53

Tablo 17. Üretilen %2 SBS-%3NC katkıli karışım örneklerinin özellikleri

Briket No.	Havadaki ağırlık (gr)	Sudaki ağırlık (gr)	Doygun yüzeyi kuru ağırlık (gr)	Pratik yoğunluk (gr/cm ³)	Yükseklik (mm)			Ortalama Yükseklik (mm)
					H ₁	H ₂	H ₃	
1	1209.9	701	1210.9	2.373	65.58	65.35	65.46	65.46
2	1195.2	694.1	1196.9	2.377	65.08	65.22	65.31	65.20
3	1202.3	697	1203.1	2.376	65.11	64.95	65.04	65.03
4	1211.8	703.3	1212.9	2.378	65.54	65.45	65.41	65.47
5	1197.8	692.6	1199	2.365	65.9	65.63	65.45	65.66
6	1201.2	700.1	1205.8	2.375	64.76	64.59	64.76	64.70
7	1205.1	700.1	1206.9	2.378	65.67	65.57	65.68	65.64
8	1213	705.2	1214.4	2.382	65.21	65.21	65.38	65.27
9	1211	704.3	1212.5	2.383	65.52	65.6	65.75	65.62
10	1210.7	707.9	1216.2	2.382	64.88	65	64.85	64.91
11	1201.1	694.7	1202.3	2.366	65.62	65.85	65.56	65.68
12	1209	701.3	1209.6	2.379	64.56	64.76	64.22	64.51
13	1212.2	701.6	1212.8	2.371	65.5	65.42	65.49	65.47

Tablo 18. Üretilen %1 SBS-%3NC katkıli karışım örneklerinin özellikleri

Briket No.	Havadaki ağırlık (gr)	Sudaki ağırlık (gr)	Doygun yüzeyi kuru ağırlık (gr)	Pratik yoğunluk (gr/cm ³)	Yükseklik (mm)			Ortalama Yükseklik (mm)
					H ₁	H ₂	H ₃	
1	1212.1	703.3	1213.1	2.378	65.44	65.31	65.05	65.27
2	1208.6	701.2	1209.2	2.379	64.86	64.46	64.67	64.66
3	1208.1	702.5	1208.5	2.388	64.46	64.14	64.44	64.35
4	1211	705.6	1212.2	2.390	65.01	65.18	65.02	65.07
5	1205.6	698.9	1206.6	2.375	65.29	65.25	65.5	65.35
6	1208.5	700.9	1209.2	2.378	65.44	65.53	65.21	65.39
7	1203.5	698.7	1204.5	2.379	65.36	65.32	65.24	65.31
8	1210	704.2	1210.8	2.388	64.76	64.81	64.7	64.76
9	1208.9	701.5	1209.5	2.380	65.02	64.92	64.81	64.92
10	1202.2	698.2	1203.1	2.381	64.83	64.7	64.9	64.81
11	1207.8	700.2	1208.8	2.375	65.26	65.38	65.16	65.27
12	1215.1	705.3	1215.9	2.380	65.75	65.84	65.86	65.82
13	1210.3	703.2	1211.2	2.382	64.98	65.11	65.05	65.05

Tablo 19. Üretilen %5 SBS-%2NC katkıli karışım örneklerinin özellikleri

Briket No.	Havadaki ağırlık (gr)	Sudaki ağırlık (gr)	Doygun yüzeyi kuru ağırlık (gr)	Pratik yoğunluk (gr/cm ³)	Yükseklik (mm)			Ortalama Yükseklik (mm)
					H ₁	H ₂	H ₃	
1	1190.2	682.2	1193.1	2.330	65.27	65.24	65.22	65.24
2	1198	690.4	1200.3	2.349	65.47	65.69	65.42	65.53
3	1205.6	691.3	1208.5	2.331	65.95	65.92	65.77	65.88
4	1203.6	693.9	1205.9	2.351	65.38	65.39	65.4	65.39
5	1210	694.5	1212.3	2.337	65.95	65.91	65.97	65.94
6	1199.7	691.3	1202.8	2.345	65.61	65.62	65.59	65.61
7	1205.8	694.4	1209.8	2.340	65.82	65.86	65.8	65.83
8	1204.8	694.1	1207.1	2.349	65.64	65.52	65.56	65.57
9	1206.7	693.8	1208.8	2.343	65.61	65.64	65.6	65.62
10	1211.3	695.1	1215.2	2.329	66.72	66.79	66.55	66.69
11	1200.1	690.5	1202.5	2.344	64.7	65.01	65.16	64.96
12	1208.3	695	1210.6	2.343	65.8	65.86	65.65	65.77
13	1211.9	695.3	1214.5	2.334	66.35	66.52	66.47	66.45

Tablo 20. Üretilen %4 SBS-%2NC katkıli karışım örneklerinin özellikleri

Briket No.	Havadaki ağırlık (gr)	Sudaki ağırlık (gr)	Doygun yüzeyi kuru ağırlık (gr)	Pratik yoğunluk (gr/cm ³)	Yükseklik (mm)			Ortalama Yükseklik (mm)
					H ₁	H ₂	H ₃	
1	1198.3	689.1	1201.6	2.338	65.43	65.24	65.27	65.31
2	1193.4	686	1195.9	2.340	65.42	65.23	65.56	65.40
3	1197.5	690.8	1199.5	2.354	64.85	64.76	64.97	64.86
4	1193.6	687.3	1195	2.351	64.78	64.79	64.76	64.78
5	1200.6	689.5	1202.8	2.339	66.07	65.82	65.85	65.91
6	1182.6	680.6	1183.3	2.352	64.13	64.19	64.2	64.17
7	1179.4	677.9	1180.9	2.345	64.5	64.76	64.66	64.64
8	1186	681.4	1187.6	2.343	65.05	65.1	65.01	65.05
9	1208.2	690.9	1210.2	2.327	65.87	66.02	65.78	65.89
10	1186.6	684.1	1188.5	2.352	64.67	64.38	64.45	64.50
11	1189.7	683.7	1191.8	2.341	64.97	65.07	65.07	65.04
12	1189.7	685.4	1192.1	2.348	65.54	65.51	65.57	65.54
13	1195.1	689	1197.2	2.352	65.33	65.53	65.2	65.35

Tablo 21. Üretilen %3 SBS-%2NC katkıli karışım örneklerinin özellikleri

Briket No.	Havadaki ağırlık (gr)	Sudaki ağırlık (gr)	Doygun yüzeyi kuru ağırlık (gr)	Pratik yoğunluk (gr/cm ³)	Yükseklik (mm)			Ortalama Yükseklik (mm)
					H ₁	H ₂	H ₃	
1	1192.7	692.1	1196	2.367	64.8	64.98	64.94	64.91
2	1202.5	698.7	1204.8	2.376	65.27	65.44	65.46	65.39
3	1216	705.8	1216.7	2.380	65.29	65.26	65.33	65.29
4	1190.4	685.6	1191.4	2.353	65.58	65.05	64.93	65.19
5	1206.2	705.8	1206.6	2.409	65.29	65.15	65.07	65.17
6	1243.4	726.5	1243.7	2.404	66.4	66.54	66.39	66.44
7	1209.9	705.6	1212.7	2.386	65.91	65.97	65.8	65.89
8	1197.1	697.7	1201.2	2.378	64.68	64.52	64.47	64.56
9	1205.4	699.9	1208.8	2.369	65.37	65.19	65.1	65.22
10	1206.5	701	1209	2.375	64.91	64.86	64.81	64.86
11	1203	698.9	1204.8	2.378	64.92	65.14	64.84	64.97
12	1207.2	696.4	1211.6	2.343	67.59	67.42	67.61	67.54
13	1202.1	698.6	1203.6	2.380	65.36	65.22	65.05	65.21

Tablo 22. Üretilen %2 SBS-%2NC katkıli karışım örneklerinin özellikleri

Briket No.	Havadaki ağırlık (gr)	Sudaki ağırlık (gr)	Doygun yüzeyi kuru ağırlık (gr)	Pratik yoğunluk (gr/cm ³)	Yükseklik (mm)			Ortalama Yükseklik (mm)
					H ₁	H ₂	H ₃	
1	1195.6	695.2	1196.3	2.386	64.44	64.59	64.6	64.54
2	1197.4	697.5	1198.7	2.389	64.65	64.75	64.76	64.72
3	1191	690.1	1192.2	2.372	64.07	64.14	64.22	64.14
4	1207.2	701	1210.2	2.371	65.04	64.9	65.01	64.98
5	1218.1	707.1	1218.4	2.382	64.77	64.89	64.79	64.82
6	1189.6	691	1190.4	2.382	64.2	64.24	64.22	64.22
7	1211.9	703.6	1213	2.379	65.21	65.31	65.34	65.29
8	1180.4	657.8	1182.8	2.248	64.37	64.39	64.56	64.44
9	1197	667.2	1198.3	2.254	64.61	64.4	64.64	64.55
10	1213.4	676.2	1214.3	2.255	65.54	65.7	65.59	65.61
11	1199.4	668.2	1200.4	2.254	64.87	64.86	64.75	64.83
12	1198.7	671.6	1199.8	2.269	64.66	64.56	64.54	64.59
13	1192.8	668.3	1194.3	2.268	64.36	64.14	64.19	64.23

Tablo 23. Üretilen %1 SBS-%2NC katkıli karışım örneklerinin özellikleri

Briket No.	Havadaki ağırlık (gr)	Sudaki ağırlık (gr)	Doygun yüzeyi kuru ağırlık (gr)	Pratik yoğunluk (gr/cm ³)	Yükseklik (mm)			Ortalama Yükseklik (mm)
					H ₁	H ₂	H ₃	
1	1205.6	675.8	1206.6	2.271	65.13	64.98	65.04	65.05
2	1200.2	673.4	1200.9	2.275	65.04	64.85	64.73	64.87
3	1205	677.5	1205.3	2.283	64.94	64.86	64.9	64.90
4	1217.9	683.9	1217.9	2.281	65.35	65.32	65.18	65.28
5	1202.9	677.3	1203.2	2.287	64.56	64.63	64.51	64.57
6	1207.8	682.3	1208.6	2.295	64.24	64.19	64.21	64.21
7	1200.7	679.9	1200.9	2.305	64.11	64.29	64.21	64.20
8	1198.7	680.1	1198.5	2.312	64.22	64.16	64.32	64.23
9	1246	707.5	1245.9	2.314	66.35	66.39	66.39	66.38
10	1190.4	675.3	1191	2.308	64.29	64.5	64.29	64.36
11	1212.5	687.4	1212.5	2.309	64.65	64.68	64.49	64.61
12	1198.3	680.7	1199	2.312	64.99	65.06	64.97	65.01
13	1203.9	685.5	1204.5	2.320	64.92	64.67	65.65	65.08

Tablo 24. Üretilen %2 HL katkıli karışım örneklerinin özellikleri

Briket No.	Havadaki ağırlık (gr)	Sudaki ağırlık (gr)	Doygun yüzeyi kuru ağırlık (gr)	Pratik yoğunluk (gr/cm ³)	Yükseklik (mm)			Ortalama Yükseklik (mm)
					H ₁	H ₂	H ₃	
1	1211.7	686.1	1214.4	2.294	65.37	65.46	65.25	65.36
2	1204.8	679.7	1206.1	2.289	64.5	64.76	64.82	64.69
3	1208.9	682.5	1209.8	2.293	63.96	63.95	63.96	63.96
4	1205.2	676.5	1206.8	2.273	64.9	65.12	64.98	65.00
5	1211.1	681.7	1212.2	2.283	65.07	64.81	64.83	64.90
6	1210.9	685	1211.8	2.299	64.51	64.7	64.72	64.64
7	1205	684.1	1206	2.309	64.54	64.44	64.33	64.44
8	1208.5	684.6	1209.3	2.303	64.84	64.75	64.64	64.74
9	1209.7	685.8	1210.1	2.307	64.45	64.25	64.45	64.38
10	1206.6	686.8	1207.4	2.318	64.55	64.81	64.92	64.76
11	1221.5	694	1222.7	2.310	65.68	65.73	65.53	65.65
12	1207.4	686.2	1209.1	2.309	65.88	65.93	66	65.94
13	1197.1	679.3	1199.3	2.302	66.08	66	66.03	66.04

Tablo 25. Üretilen %5 SBS %3 NC %1 HL katkıli karışım örneklerinin özellikleri

Briket No.	Havadaki ağırlık (gr)	Sudaki ağırlık (gr)	Doygun yüzeyi kuru ağırlık (gr)	Pratik yoğunluk (gr/cm ³)	Yükseklik (mm)			Ortalama Yükseklik (mm)
					H ₁	H ₂	H ₃	
1	1207.5	696	1209	2.354	65.7	65.83	65.5	65.68
2	1209.5	692.2	1211.5	2.329	66.56	66.7	66.89	66.72
3	1219.6	702.2	1221.4	2.349	66.38	66.2	66.34	66.31
4	1217.6	702.4	1219.2	2.356	66.35	66.23	66	66.19
5	1223.4	704.4	1224.3	2.353	65.67	65.59	65.82	65.69
6	1215.6	700.2	1217.1	2.352	66.34	66.16	65.95	66.15
7	1205.6	693	1207.2	2.345	65.81	65.74	65.8	65.78
8	1200.9	689.1	1202.3	2.340	65.35	65.18	65.32	65.28
9	1214.8	699.2	1215.7	2.352	64.41	65.74	65.66	65.27
10	1206.6	693.1	1208.2	2.342	65.06	65.38	64.99	65.14
11	1225.5	703.1	1226.3	2.342	66.33	66.17	66.31	66.27
12	1218	698.7	1219.2	2.340	66.02	65.76	65.96	65.91
13	1202.9	687.8	1205.1	2.325	65.82	66.04	66.15	66.00

Tablo 26. Üretilen %4 SBS %3 NC %1 HL katkıli karışım örneklerinin özellikleri

Briket No.	Havadaki ağırlık (gr)	Sudaki ağırlık (gr)	Doygun yüzeyi kuru ağırlık (gr)	Pratik yoğunluk (gr/cm ³)	Yükseklik (mm)			Ortalama Yükseklik (mm)
					H ₁	H ₂	H ₃	
1	1210.8	695.3	1212.1	2.343	65.8	66.09	66.03	65.97
2	1219.9	704.5	1220.4	2.365	65.19	65.95	65.31	65.48
3	1211.6	699.5	1212.3	2.363	64.69	64.43	64.56	64.56
4	1234.2	712.2	1235.8	2.357	66.54	66.83	66.82	66.73
5	1200.9	688.6	1203.4	2.333	65.67	65.71	65.94	65.77
6	1217.5	699.1	1218.6	2.344	66.03	65.93	65.96	65.97
7	1209.9	694.7	1211.7	2.340	65.87	65.75	65.63	65.75
8	1211.6	695.9	1212.6	2.345	66.1	65.97	65.89	65.99
9	1212	695.7	1213.2	2.342	66.25	66.48	66.52	66.42
10	1221.4	702.8	1222.5	2.350	66.62	66.45	66.59	66.55
11	1219.2	681.5	1221.8	2.257	65.98	66.01	66.07	66.02
12	1220.2	681.9	1222.4	2.258	66	65.81	65.75	65.85
13	1211.3	674.5	1213.6	2.247	65.67	65.32	65.82	65.60

Tablo 27. Üretilen %3 SBS %3 NC %1 HL katkıli karışım örneklerinin özellikleri

Briket No.	Havadaki ağırlık (gr)	Sudaki ağırlık (gr)	Doygun yüzeyi kuru ağırlık (gr)	Pratik yoğunluk (gr/cm ³)	Yükseklik (mm)			Ortalama Yükseklik (mm)
					H ₁	H ₂	H ₃	
1	1213.7	676.3	1214.9	2.253	66.05	65.41	65.53	65.66
2	1213	674.2	1214.4	2.245	65.33	65.36	65.65	65.45
3	1215	679.4	1216.1	2.264	65.13	65.24	65.2	65.19
4	1208.1	674.1	1209.7	2.256	65.15	64.97	64.98	65.03
5	1211	674	1212	2.251	65.53	65.67	65.63	65.61
6	1222	681.3	1223	2.256	65.66	65.51	65.49	65.55
7	1213.3	675	1214.2	2.250	65.34	65.47	66.15	65.65
8	1212.8	676.8	1213.8	2.258	65.03	65.3	65.2	65.18
9	1212	675	1212.9	2.253	65.05	64.81	64.98	64.95
10	1214.7	677.2	1216	2.254	65.54	65.35	65.46	65.45
11	1212	676.8	1212.6	2.262	64.86	65.21	65.23	65.10
12	1216.3	679.7	1217	2.264	64.77	64.98	64.68	64.81
13	1206.8	672.5	1207.6	2.255	65.33	64.99	65.4	65.24

Tablo 28. Üretilen %2 SBS %3 NC %1 HL katkıli karışım örneklerinin özellikleri

Briket No.	Havadaki ağırlık (gr)	Sudaki ağırlık (gr)	Doygun yüzeyi kuru ağırlık (gr)	Pratik yoğunluk (gr/cm ³)	Yükseklik (mm)			Ortalama Yükseklik (mm)
					H ₁	H ₂	H ₃	
1	1215.7	690.1	1216.7	2.309	65.57	65.36	65.96	65.63
2	1215.2	690	1216.3	2.309	66.25	66.13	65.89	66.09
3	1210.7	686	1211.9	2.302	65.54	65.87	65.82	65.74
4	1219.5	698.9	1220.7	2.337	65.45	65.82	65.87	65.71
5	1221.8	685.8	1222.7	2.276	65.85	65.83	65.62	65.77
6	1215.8	679.8	1216.8	2.264	65.84	65.79	65.92	65.85
7	1216.2	682.8	1216.7	2.278	64.42	65.14	64.93	64.83
8	1212.3	675.8	1212.9	2.257	64.7	64.83	65.11	64.88
9	1205.8	669.9	1206.9	2.245	65.42	65.46	65.42	65.43
10	1214.3	672.1	1215.4	2.235	66.32	66.33	66.22	66.29
11	1213.4	677.8	1214.3	2.262	65.13	65.11	65.3	65.18
12	1215.2	676.4	1216.3	2.251	65.33	65.19	65.28	65.27
13	1207.2	670.6	1208.4	2.245	65.6	65.79	65.7	65.70

Tablo 29. Üretilen %1 SBS %3 NC %1 HL katkıli karışım örneklerinin özellikleri

Briket No.	Havadaki ağırlık (gr)	Sudaki ağırlık (gr)	Doygun yüzeyi kuru ağırlık (gr)	Pratik yoğunluk (gr/cm ³)	Yükseklik (mm)			Ortalama Yükseklik (mm)
					H ₁	H ₂	H ₃	
1	1206.7	679.7	1207.3	2.287	64.98	64.9	64.75	64.88
2	1213.6	687.4	1214.6	2.302	64.51	64.73	64.83	64.69
3	1209.4	682.6	1210	2.293	64.49	64.29	64.68	64.49
4	1214.9	687.6	1216	2.299	65.31	65.08	65.11	65.17
5	1211.4	686	1212.2	2.302	64.36	64.43	64.57	64.45
6	1210.9	686.3	1212.2	2.303	64.65	64.79	64.71	64.72
7	1213.7	688.9	1215	2.307	65.24	65.08	65.28	65.20
8	1213.8	689.4	1214.9	2.310	65.05	64.9	65.07	65.01
9	1214.9	693.3	1215.6	2.326	64.81	64.62	64.67	64.70
10	1207.5	687.9	1208.5	2.319	64.47	64.72	64.56	64.58
11	1216.3	693.4	1217.2	2.322	64.99	65.18	65.24	65.14
12	1224.4	695.6	1225	2.313	65.28	65.42	65.17	65.29
13	1218.8	697	1219.7	2.332	65.55	65.25	65.22	65.34

Tablo 30. Üretilen %5 SBS %2 NC %1 HL katkıli karışım örneklerinin özellikleri

Briket No.	Havadaki ağırlık (gr)	Sudaki ağırlık (gr)	Doygun yüzeyi kuru ağırlık (gr)	Pratik yoğunluk (gr/cm ³)	Yükseklik (mm)			Ortalama Yükseklik (mm)
					H ₁	H ₂	H ₃	
1	1217.8	702.7	1218.9	2.359	65.96	66.01	65.76	65.91
2	1202.5	691.7	1204.5	2.345	65.41	65.4	65.25	65.35
3	1214.6	697.8	1215	2.348	65.23	65.09	65.47	65.26
4	1235.2	713.6	1236.2	2.364	66.49	66.48	66.71	66.56
5	1208.7	692.6	1211.6	2.329	66.16	66.1	66.06	66.11
6	1206.3	692	1207.7	2.339	66.02	65.87	65.86	65.92
7	1205.1	685.2	1205.6	2.316	64.56	64.5	64.92	64.66
8	1197.3	682.8	1198.8	2.320	65.49	65.61	65.77	65.62
9	1201.3	688.9	1204	2.332	65.89	65.85	65.72	65.82
10	1218.4	694.3	1218.5	2.324	65.32	65.67	65.49	65.49
11	1213	698.8	1214	2.354	66.09	65.96	65.84	65.96
12	1208.2	693.2	1210.1	2.337	66.44	66.68	66.62	66.58
13	1214.8	698.4	1216	2.347	65.7	65.69	65.64	65.68

Tablo 31. Üretilen %4 SBS %2 NC %1 HL katkıli karışım örneklerinin özellikleri

Briket No.	Havadaki ağırlık (gr)	Sudaki ağırlık (gr)	Doygun yüzeyi kuru ağırlık (gr)	Pratik yoğunluk (gr/cm ³)	Yükseklik (mm)			Ortalama Yükseklik (mm)
					H ₁	H ₂	H ₃	
1	1210.6	696.9	1211	2.355	64.99	64.97	65.21	65.06
2	1209.7	696	1210.4	2.352	64.64	64.56	64.79	64.66
3	1202.8	693	1203.3	2.357	65.07	64.88	64.9	64.95
4	1209.5	696	1210.4	2.351	65.52	65.57	65.51	65.53
5	1213.1	697.2	1214.3	2.346	65.66	65.77	65.65	65.69
6	1212.8	699	1215	2.350	65.44	65.2	65.16	65.27
7	1210.4	695.1	1210.8	2.347	64.82	64.92	64.71	64.82
8	1214	696	1215.3	2.338	65.68	65.55	65.74	65.66
9	1206.1	694.5	1206.8	2.354	64.8	64.92	64.8	64.84
10	1208	696.7	1208.8	2.359	65.27	65.27	65.27	65.27
11	1217	694.1	1218.3	2.322	66.37	66.32	66.38	66.36
12	1215.5	696.9	1216.3	2.340	65.98	65.66	65.69	65.78
13	1218.4	701.7	1219.3	2.354	65.49	65.79	65.88	65.72

Tablo 32. Üretilen %3 SBS %2 NC %1 HL katkıli karışım örneklerinin özellikleri

Briket No.	Havadaki ağırlık (gr)	Sudaki ağırlık (gr)	Doygun yüzeyi kuru ağırlık (gr)	Pratik yoğunluk (gr/cm ³)	Yükseklik (mm)			Ortalama Yükseklik (mm)
					H ₁	H ₂	H ₃	
1	1208.2	692.6	1209.5	2.337	65.25	65.42	65.64	65.44
2	1216.5	702.1	1217.2	2.362	65.04	65.27	64.82	65.04
3	1204.8	690.6	1205.5	2.340	65	65.06	65.35	65.14
4	1216.2	699.7	1216.9	2.352	65.36	65.15	65.06	65.19
5	1206.6	692.6	1207.5	2.343	64.98	65.17	65.15	65.10
6	1199.3	691.1	1200.4	2.355	64.83	65.05	65	64.96
7	1209	692.8	1210	2.338	65.51	65.25	65.58	65.45
8	1206.7	691.3	1207.4	2.338	65.44	65.33	65.42	65.40
9	1207.9	689.4	1208.8	2.326	66.04	66.18	65.96	66.06
10	1219.8	702.2	1220.6	2.353	65.44	65.24	65.46	65.38
11	1215.1	697.8	1216.2	2.344	65.87	65.63	65.72	65.74
12	1212.8	695.1	1213.7	2.339	65.57	65.8	65.65	65.67
13	1207.1	694.4	1207.7	2.352	64.74	64.43	64.57	64.58

Tablo 33. Üretilen %2 SBS %2 NC %1 HL katkıli karışım örneklerinin özellikleri

Briket No.	Havadaki ağırlık (gr)	Sudaki ağırlık (gr)	Doygun yüzeyi kuru ağırlık (gr)	Pratik yoğunluk (gr/cm ³)	Yükseklik (mm)			Ortalama Yükseklik (mm)
					H ₁	H ₂	H ₃	
1	1212.6	696.1	1213.4	2.344	65.88	65.7	65.95	65.84
2	1217.4	699.4	1217.8	2.348	65.27	65.23	65.42	65.31
3	1212.5	697.6	1213.6	2.350	65.85	65.74	65.79	65.79
4	1213.9	699.2	1214.9	2.354	65.82	65.75	66.1	65.89
5	1217	700.2	1217.7	2.352	65.27	65.65	65.56	65.49
6	1214.7	697.1	1215.7	2.342	66.2	66.15	66.05	66.13
7	1213	696	1214.1	2.341	65.57	65.72	65.78	65.69
8	1216	696.9	1217.1	2.338	65.96	65.87	66.05	65.96
9	1212.8	699.8	1213.5	2.361	65.35	65.31	65.47	65.38
10	1215.4	695.4	1216.2	2.334	66.21	66.1	66.27	66.19
11	1219.5	701.6	1219.9	2.353	65.45	65.62	65.41	65.49
12	1209.5	694	1210.4	2.342	65.34	65.54	65.38	65.42
13	1210.1	694.6	1211	2.343	65.7	65.4	65.54	65.55

Tablo 34. Üretilen %1SBS %2 NC %1 HL katkıli karışım örneklerinin özellikleri

Briket No.	Havadaki ağırlık (gr)	Sudaki ağırlık (gr)	Doygun yüzeyi kuru ağırlık (gr)	Pratik yoğunluk (gr/cm ³)	Yükseklik (mm)			Ortalama Yükseklik (mm)
					H ₁	H ₂	H ₃	
1	1204.8	696.4	1205.6	2.366	63.92	63.83	63.89	63.88
2	1203.4	698	1204	2.378	63.97	63.81	64.02	63.93
3	1211.3	700.5	1211.9	2.369	64.79	64.67	64.77	64.74
4	1218.1	703.1	1218.4	2.364	64.61	64.46	64.36	64.48
5	1201.7	694.2	1202.3	2.365	64.1	64.01	63.9	64.00
6	1209.8	706	1210.2	2.399	64.14	64.24	64.44	64.27
7	1207.4	701.9	1208	2.386	64.13	64.63	64.53	64.43
8	1201.8	698.7	1202.6	2.385	64.38	64.31	64.17	64.29
9	1203.6	698.5	1204	2.381	63.86	63.83	63.59	63.76
10	1216.2	706.5	1216.8	2.383	64.52	64.22	64.3	64.35
11	1205.2	702.2	1205.8	2.393	63.65	63.6	63.91	63.72
12	1213.4	705.6	1213.9	2.387	64.91	64.85	64.69	64.82
13	1209.4	703.6	1210.1	2.388	64.33	64.22	64.49	64.35

Üretilen briketlerin yoğunlukları hesaplanarak, karışım kategorilerine göre Tablo 35 – Tablo 39’da sunulmuştur.

Tablo 35. SBS modifiye ve HL modifiye bitümlü karışımların yoğunluk değerlendirmesi

Briket No.	Kontrol		%5SBS		%2HL	
	Yoğunluk (gr/cm ³)	Ort. Yükseklik (mm)	Yoğunluk (gr/cm ³)	Ort. Yükseklik (mm)	Yoğunluk (gr/cm ³)	Ort. Yükseklik (mm)
1	2.373	65.120	2.296	67.717	2.294	65.360
2	2.379	64.003	2.320	65.770	2.289	64.693
3	2.380	64.140	2.340	65.230	2.293	63.957
4	2.374	64.310	2.339	64.947	2.273	65.000
5	2.382	64.293	2.305	66.557	2.283	64.903
6	2.381	63.987	2.305	66.720	2.299	64.643
7	2.377	64.277	2.334	65.757	2.309	64.437
8	2.385	64.683	2.358	64.870	2.303	64.743
9	2.376	64.190	2.349	65.650	2.307	64.383
10	2.373	64.403	2.360	65.917	2.318	64.760
11	2.379	64.323	2.343	66.433	2.310	65.647
12	2.391	64.087	2.343	65.750	2.309	65.937
13	2.378	64.787	2.373	64.927	2.302	66.037

Tablo 36.%3NC-değişik SBS içeriklerinde hazırlanan örneklerin yoğunluk değerlendirmesi

Briket No.	%5SBS %3NC		%4SBS %3NC		%3SBS %3NC		%2SBS %3NC		%1SBS %3NC	
	Yoğunluk (gr/cm ³)	Ort. Yük. (mm)	Yoğunluk (gr/cm ³)	Ort. Yük. (mm)	Yoğunluk (gr/cm ³)	Ort. Yük. (mm)	Yoğunluk (gr/cm ³)	Ort. Yük. (mm)	Yoğunluk (gr/cm ³)	Ort. Yük. (mm)
1	2.318	66.117	2.376	65.247	2.317	63.930	2.373	65.463	2.378	65.267
2	2.299	65.667	2.379	64.907	2.308	65.193	2.377	65.203	2.379	64.663
3	2.312	65.243	2.320	66.280	2.294	65.930	2.376	65.033	2.388	64.347
4	2.303	66.523	2.310	66.630	2.309	65.113	2.378	65.467	2.390	65.070
5	2.311	65.627	2.230	66.140	2.316	65.063	2.365	65.660	2.375	65.347
6	2.320	65.697	2.266	65.670	2.311	65.143	2.375	64.703	2.378	65.393
7	2.324	65.853	2.243	65.383	2.328	65.230	2.378	65.640	2.379	65.307
8	2.321	65.660	2.250	65.730	2.316	64.960	2.382	65.267	2.388	64.757
9	2.344	64.720	2.261	64.897	2.327	65.447	2.383	65.623	2.380	64.917
10	2.344	65.487	2.261	65.220	2.287	67.670	2.382	64.910	2.381	64.810
11	2.362	65.050	2.274	65.250	2.334	65.287	2.366	65.677	2.375	65.267
12	2.364	66.080	2.288	66.730	2.358	65.637	2.379	64.513	2.380	65.817
13	2.382	66.153	2.289	65.010	2.356	65.527	2.371	65.470	2.382	65.047

Tablo 37.%2NC-değişik SBS içeriklerinde hazırlanan örneklerin yoğunluk değerlendirmesi

Briket No.	%5SBS %2NC		%4SBS %2NC		%3SBS %2NC		%2SBS %2NC		%1SBS %2NC	
	Yoğunluk (gr/cm ³)	Ort. Yük. (mm)	Yoğunluk (gr/cm ³)	Ort. Yük. (mm)	Yoğunluk (gr/cm ³)	Ort. Yük. (mm)	Yoğunluk (gr/cm ³)	Ort. Yük. (mm)	Yoğunluk (gr/cm ³)	Ort. Yük. (mm)
1	2.330	65.243	2.338	65.313	2.367	64.907	2.386	64.543	2.271	65.050
2	2.349	65.527	2.340	65.403	2.376	65.390	2.389	64.720	2.275	64.873
3	2.331	65.880	2.354	64.860	2.380	65.293	2.372	64.143	2.283	64.900
4	2.351	65.390	2.351	64.777	2.353	65.187	2.371	64.983	2.281	65.283
5	2.337	65.943	2.339	65.913	2.409	65.170	2.382	64.817	2.287	64.567
6	2.345	65.607	2.352	64.173	2.404	66.443	2.382	64.220	2.295	64.213
7	2.340	65.827	2.345	64.640	2.386	65.893	2.379	65.287	2.305	64.203
8	2.349	65.573	2.343	65.053	2.378	64.557	2.248	64.440	2.312	64.233
9	2.343	65.617	2.327	65.890	2.369	65.220	2.254	64.550	2.314	66.377
10	2.329	66.687	2.352	64.500	2.375	64.860	2.255	65.610	2.308	64.360
11	2.344	64.957	2.341	65.037	2.378	64.967	2.254	64.827	2.309	64.607
12	2.343	65.770	2.348	65.540	2.343	67.540	2.269	64.587	2.312	65.007
13	2.334	66.447	2.352	65.353	2.380	65.210	2.268	64.230	2.320	65.080

Tablo 38. %3NC- değişik oranlarda SBS ve %1HL kullanılan karışımlarda yoğunluk değerlendirmesi

Briket No.	%5SBS %3NC %1HL		%4SBS %3NC %1HL		%3SBS %3NC %1HL		%2SBS %3NC %1HL		%1SBS %3NC %1HL	
	Yoğunluk (gr/cm ³)	Ort. Yük. (mm)	Yoğunluk (gr/cm ³)	Ort. Yük. (mm)	Yoğunluk (gr/cm ³)	Ort. Yük. (mm)	Yoğunluk (gr/cm ³)	Ort. Yük. (mm)	Yoğunluk (gr/cm ³)	Ort. Yük. (mm)
1	2.354	65.677	2.343	65.973	2.253	65.663	2.309	65.630	2.287	64.877
2	2.329	66.717	2.365	65.483	2.245	65.447	2.309	66.090	2.302	64.690
3	2.349	66.307	2.363	64.560	2.264	65.190	2.302	65.743	2.293	64.487
4	2.356	66.193	2.357	66.730	2.256	65.033	2.337	65.713	2.299	65.167
5	2.353	65.693	2.333	65.773	2.251	65.610	2.276	65.767	2.302	64.453
6	2.352	66.150	2.344	65.973	2.256	65.553	2.264	65.850	2.303	64.717
7	2.345	65.783	2.340	65.750	2.250	65.653	2.278	64.830	2.307	65.200
8	2.340	65.283	2.345	65.987	2.258	65.177	2.257	64.880	2.310	65.007
9	2.352	65.270	2.342	66.417	2.253	64.947	2.245	65.433	2.326	64.700
10	2.342	65.143	2.350	66.553	2.254	65.450	2.235	66.290	2.319	64.583
11	2.342	66.270	2.257	66.020	2.262	65.100	2.262	65.180	2.322	65.137
12	2.340	65.913	2.258	65.853	2.264	64.810	2.251	65.267	2.313	65.290
13	2.325	66.003	2.247	65.603	2.255	65.240	2.245	65.697	2.332	65.340

Tablo 39. %2NC- değişik oranlarda SBS ve %1HL kullanılan karışımlarda yoğunluk değerlendirmesi

Briket No.	%5SBS %2NC %1HL		%4SBS %2NC %1HL		%3SBS %2NC %1HL		%2SBS %2NC %1HL		%1SBS %2NC %1HL	
	Yoğunluk (gr/cm ³)	Ort. Yük. (mm)	Yoğunluk (gr/cm ³)	Ort. Yük. (mm)	Yoğunluk (gr/cm ³)	Ort. Yük. (mm)	Yoğunluk (gr/cm ³)	Ort. Yük. (mm)	Yoğunluk (gr/cm ³)	Ort. Yük. (mm)
1	2.354	65.677	2.343	65.973	2.253	65.663	2.309	65.630	2.287	64.877
2	2.329	66.717	2.365	65.483	2.245	65.447	2.309	66.090	2.302	64.690
3	2.349	66.307	2.363	64.560	2.264	65.190	2.302	65.743	2.293	64.487
4	2.356	66.193	2.357	66.730	2.256	65.033	2.337	65.713	2.299	65.167
5	2.353	65.693	2.333	65.773	2.251	65.610	2.276	65.767	2.302	64.453
6	2.352	66.150	2.344	65.973	2.256	65.553	2.264	65.850	2.303	64.717
7	2.345	65.783	2.340	65.750	2.250	65.653	2.278	64.830	2.307	65.200
8	2.340	65.283	2.345	65.987	2.258	65.177	2.257	64.880	2.310	65.007
9	2.352	65.270	2.342	66.417	2.253	64.947	2.245	65.433	2.326	64.700
10	2.342	65.143	2.350	66.553	2.254	65.450	2.235	66.290	2.319	64.583
11	2.342	66.270	2.257	66.020	2.262	65.100	2.262	65.180	2.322	65.137
12	2.340	65.913	2.258	65.853	2.264	64.810	2.251	65.267	2.313	65.290
13	2.325	66.003	2.247	65.603	2.255	65.240	2.245	65.697	2.332	65.340

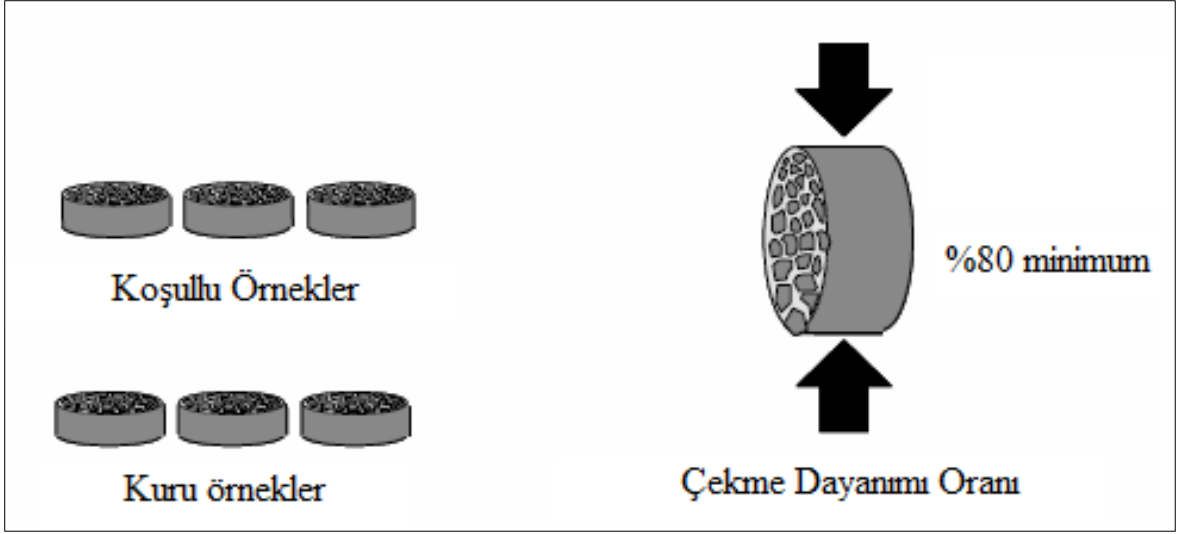
2.4. Yöntem

Tez çalışmasında, nanokil veya nanokil-sönmüş kireç kullanılarak SBS polimerinin genel kullanım oranının azaltılabilirliği araştırılmıştır. Üretilen Marshall briketleri düşük sıcaklık çatlama direnci, su hasarına karşı direnç ve tekerlek izi potansiyelleri yönünden değerlendirilmiştir. Günümüze kadar kullanılmış çeşitli laboratuvar testleri mevcuttur. Su hasarı probleminin değerlendirilmesinde yaygın olarak kullanılan yöntemlerden birisi de AASHTO T283 (Modifiye Lottman) yöntemidir. Bu yöntemde hazırlanan örneklerin yarısına koşullama uygulanmakta ve daha sonra koşullu ve koşulsuz örneklere dolaylı çekme mukavemeti testi uygulanmaktadır. Düşük sıcaklık çatlama da dolaylı çekme mukavemeti testinin düşük sıcaklıklarda gerçekleştirilmesi suretiyle değerlendirilebilmektedir. Tekerlek izi testleri, sünme testleri, Marshall oranı (MQ) yaklaşımları ise karışımın kalıcı deformasyon direncinin belirlenmesinde kullanılabilir. Bu çalışma kapsamında, Modifiye Lottman yöntemi, Dolaylı çekme mukavemeti testi ve Marshall oranı metodu karışımların değerlendirilmesinde kullanılmıştır. Bu bölümde asfalt karışım briketlerine uygulanan koşullama sistemi özetlenmiş, yapılan testlerde kullanılan parametreler açıklanmış ve test sonuçları sunulmuştur.

2.4.1. AASHTO T 283 (Modifiye Lottman) Koşullama Prosedürü

AASHTO Standart Test Yöntemi T283, “Sıkıştırılmış Bitümlü Karışımın Suya Bağlı Hasara Karşı Direnci”, HMA nem duyarlılığının belirlenmesinde en sık kullanılan prosedürlerden biridir [141]. Bu prosedüre ait bilgiler bölüm 1.11’de anlatıldığından burada tekrar açıklanmamıştır. Prosedürün şematik olarak gösterilişi Şekil 12’de verilmiştir.

Bu çalışmada, deneysel süreçlerde AASHTO T283 yöntemine göre koşullanmış örnekler kullanılmıştır. Koşullama sisteminin çeşitli aşamalarından görüntüler Şekil 13’te verilmiştir.



Şekil 12. AASHTO T283 deneyinde kuru ve koşullu örneklerin dolaylı çekme testi



Şekil 13. AASHTO T283 koşullama aşamalarından görüntüler: a) Vakumla suya doyurma b), c) plastik film ile kaplama d) plastik poşet içerisinde su ilavesi e), f) -18°C 'de bekletilmiş örnekler g) 60°C su banyosunda bekletme

2.4.2. Modifiye Lottman (AASHTO T 283) Testi

Bu testte, her karışım türündeki örnekler kendi içerisinde, yoğunlukları yaklaşık aynı olacak şekilde iki gruba ayrıldı. Gruplardan birindeki örneklere bölüm 2.4.1’de anlatılan yönteme uygun olarak koşullama uygulandı. Koşullama sisteminde örnekler vakumlandıktan sonra (Şekil 14a-Şekil 14b) plastik film ile kaplandı (Şekil 14c) ve plastik bir poşet içerisinde (Şekil 14d) -18°C sıcaklıkta 18 saat bekletildi (Şekil 14e-Şekil 14f). 60°C sıcaklıktaki su banyosunda 24 saat tutulduktan sonra (Şekil 14g) oda sıcaklığında soğutulmaya bırakılan örnekler daha sonra koşulsuz gruptaki örneklerle birlikte 25°C sıcaklıktaki su banyosunda 2 saat bekletilerek Marshall test cihazında dolaylı çekme mukavemeti test aparatı ile test edildi. Test sonuçlarından, her bir örneğin çekme mukavemeti değerleri Formül 1 ile hesaplandı.

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

Formülde; ITS: dolaylı çekme mukavemetini (kPa), P: maksimum yükü (N), t: testten önceki yüksekliği (mm) ve D: örnek çapını (mm) ifade etmektedir.

Su hasarı değerlendirmesi ise dolaylı çekme mukavemeti oranı (ITSR) ile yapılmaktadır. ITSR değeri Formül 2 ile hesaplanmaktadır.

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

Testten elde edilen sonuçlar Tablo 40 - Tablo 44’te özetlenmiştir. ITSR değerleri hesaplanarak Tablo 45 - Tablo 48’de verilmiştir.

Tablo 40. Kontrol, %5SBS modifiye ve %2HL modifiye karışımların dolaylı çekme mukavemeti test sonuçları

Karışım türü	Koşullama	Briket no	P(kN)	Yükseklik (mm)	ITS (kPa)
Kontrol	Koşulsuz	11	13.09	64.32	1275.14
		12	14.34	64.09	1402.06
		13	12.76	64.79	1234.10
	Koşullu	1	12.13	65.12	1167.17
		2	12.39	64.00	1212.98
		3	11.37	64.14	1110.75
%5 SBS	Koşulsuz	11	10.55	67.72	976.21
		12	11.01	65.77	1048.93
		13	14.96	65.23	1437.05
	Koşullu	1	7.89	66.43	744.18
		2	8.85	65.75	843.40
		3	11.75	64.93	1133.97
%2 HL	Koşulsuz	11	10.58	65.65	1009.86
		12	8.9	65.94	845.76
		13	9.8	66.04	929.88
	Koşullu	1	7.07	65.36	677.79
		2	8.67	64.69	839.74
		3	8.73	63.96	855.29

Tablo 41. SBS(değişken oranlar)-NC(%3) modifiye bitümlü karışımların dolaylı çekme mukavemeti test sonuçları

Karışım türü	Koşullama	Briket no	P(kN)	Yükseklik (mm)	ITS (kPa)
%5 SBS %3 NC	Koşulsuz	11	12.82	65.05	1234.89
		12	14.08	66.08	1335.12
		13	15.88	66.15	1504.13
	Koşullu	1	13.14	66.12	1245.29
		2	8.93	65.67	852.10
		3	11.88	65.24	1140.95
%4 SBS %3 NC	Koşulsuz	11	13.62	65.25	1307.93
		12	13.3	66.73	1248.87
		13	12.86	65.01	1239.50
	Koşullu	1	12.11	65.25	1162.98
		2	11.4	64.91	1100.53
		3	6.36	66.28	601.26
%3 SBS %3 NC	Koşulsuz	11	13.6	65.29	1305.27
		12	13.99	65.64	1335.54
		13	14.98	65.53	1432.45
	Koşullu	1	12.38	63.93	1213.40
		2	12.44	65.19	1195.65
		3	10.83	65.93	1029.28
%2 SBS %3 NC	Koşulsuz	11	14.12	65.68	1347.13
		12	11.27	64.51	1094.61
		13	13.21	65.47	1264.29
	Koşullu	1	7.9	65.46	756.16
		2	9.98	65.20	959.06
		3	9.4	65.03	905.69
%1 SBS %3 NC	Koşulsuz	11	12.54	65.27	1203.91
		12	12.66	65.82	1205.27
		13	13	65.05	1252.29
	Koşullu	1	10.01	65.27	961.01
		2	10.71	64.66	1037.81
		3	10.61	64.35	1033.18

Tablo 42. SBS(değişken oranlar)-NC(%2) modifiye bitümlü karışımların dolaylı çekme mukavemeti test sonuçları

Karışım türü	Koşullama	Briket no	P(kN)	Yükseklik (mm)	ITS (kPa)
%5 SBS %2 NC	Koşulsuz	11	13.73	65.24	1318.62
		12	13.75	65.53	1314.83
		13	13.66	65.88	1299.22
	Koşullu	1	8.13	64.96	784.25
		2	9.82	65.77	935.56
		3	8.15	66.45	768.55
%4 SBS %2 NC	Koşulsuz	11	13.45	65.04	1295.84
		12	13.69	65.54	1308.83
		13	13.65	65.35	1308.73
	Koşullu	1	9.83	65.31	943.06
		2	10.47	65.40	1003.07
		3	11.6	64.86	1120.64
%3 SBS %2 NC	Koşulsuz	11	15.73	64.97	1517.14
		12	13.06	67.54	1211.63
		13	15.78	65.21	1516.28
	Koşullu	1	12.05	64.91	1163.28
		2	12.99	65.39	1244.76
		3	13.43	65.29	1288.82
%2 SBS %2 NC	Koşulsuz	11	15.39	64.83	1487.55
		12	14.98	64.59	1453.30
		13	13.98	64.23	1363.82
	Koşullu	1	12.24	64.54	1188.27
		2	12.8	64.72	1239.25
		3	11.12	64.14	1086.27
%1 SBS %2 NC	Koşulsuz	11	13.45	64.61	1304.46
		12	13.08	65.01	1260.77
		13	13.25	65.08	1275.72
	Koşullu	1	10.11	65.05	973.85
		2	9.91	64.87	957.18
		3	10.22	64.90	986.72

Tablo 43. SBS(değişken oranlar)-NC(%3)-HL (%1) modifiye karışımların dolaylı çekme mukavemeti test sonuçları

Karışım türü	Koşullama	Briket no	P(kN)	Yükseklik (mm)	ITS (kPa)
%5 SBS %3 NC %1 HL	Koşulsuz	11	10.71	66.27	1012.65
		12	7.44	65.91	707.27
		13	9.54	66.00	905.67
	Koşullu	1	10.13	65.68	966.46
		2	7.32	66.72	687.48
		3	9.42	66.31	890.18
%4 SBS %3 NC %1 HL	Koşulsuz	11	14.22	66.02	1349.62
		12	12.85	65.85	1222.68
		13	14.38	65.60	1373.47
	Koşullu	1	7.15	65.97	679.08
		2	11.88	65.48	1136.77
		3	11.28	64.56	1094.79
%3 SBS %3 NC %1 HL	Koşulsuz	11	14.83	65.10	1427.40
		12	14.55	64.81	1406.72
		13	13.95	65.24	1339.82
	Koşullu	1	11.97	65.66	1142.24
		2	11.87	65.45	1136.45
		3	11.99	65.19	1152.46
%2 SBS %3 NC %1 HL	Koşulsuz	11	12.32	65.18	1184.36
		12	12.54	65.27	1203.91
		13	13.2	65.70	1258.97
	Koşullu	1	10.87	65.63	1037.80
		2	9.48	66.09	898.79
		3	10.21	65.74	973.11
%1 SBS %3 NC %1 HL	Koşulsuz	11	13.26	65.14	1275.57
		12	13.49	65.29	1294.65
		13	12.96	65.34	1242.83
	Koşullu	1	11.49	64.88	1109.73
		2	10.45	64.69	1012.20
		3	9.91	64.49	962.92

Tablo 44. SBS(değişken oranlar)-NC(%2)-HL (%1) modifiye karışımların dolaylı çekme mukavemeti test sonuçları

Karışım türü	Koşullama	Briket no	P(kN)	Yükseklik (mm)	ITS (kPa)
%5 SBS %2 NC %1 HL	Koşulsuz	11	12.77	65.96	1213.04
		12	14.9	66.58	1402.26
		13	13.83	65.68	1319.46
	Koşullu	1	12.96	65.91	1232.08
		2	12.17	65.35	1166.83
		3	12.78	65.26	1227.01
%4 SBS %2 NC %1 HL	Koşulsuz	11	11.96	66.36	1129.36
		12	13.91	65.78	1325.08
		13	13.44	65.72	1281.41
	Koşullu	1	11.35	65.06	1093.18
		2	10.67	64.66	1033.93
		3	11.73	64.95	1131.63
%3 SBS %2 NC %1 HL	Koşulsuz	11	13.8	65.74	1315.33
		12	13.06	65.67	1246.06
		13	15.35	64.58	1489.35
	Koşullu	1	12.2	65.44	1168.22
		2	12.67	65.04	1220.56
		3	10.4	65.14	1000.45
%2 SBS %2 NC %1 HL	Koşulsuz	11	13.37	65.49	1279.15
		12	12.18	65.42	1166.60
		13	12.4	65.55	1185.38
	Koşullu	1	10.1	65.84	961.16
		2	10.54	65.31	1011.28
		3	9.98	65.79	950.46
%1 SBS %2 NC %1 HL	Koşulsuz	11	12.99	63.72	1277.38
		12	13.56	64.82	1310.87
		13	14.35	64.35	1397.37
	Koşullu	1	11.94	63.88	1171.19
		2	12.41	63.93	1216.27
		3	11.89	64.74	1150.73

Tüm modifiye karışımlar, düşük sıcaklık çatlama direncini önemli ölçüde artırmaktadır. Kirecin bulunmadığı karışımlarda, %3 NC içeriğinde azalan SBS içerikli karışımlar (1.14-1.34 kat) %14-%34 arasında daha yüksek düşük sıcaklık çatlama direnci oluşturmaktadır.

Tablo 45. SBS(değişken oranlar)-NC(%3) modifiye bitümlü karışımların ITSr değerleri

Karışım türü	Koşullama	ITS (kPa)	ITSr
Kontrol	Koşulsuz	1303.77	
	Koşullu	1163.63	
%5 SBS	Koşulsuz	1154.06	0.78
	Koşullu	907.18	
%5 SBS %3 NC	Koşulsuz	1358.04	0.93
	Koşullu	1079.45	
%4 SBS %3 NC	Koşulsuz	1265.43	0.82
	Koşullu	954.92	
%3 SBS %3 NC	Koşulsuz	1357.76	0.98
	Koşullu	1146.11	
%2 SBS %3 NC	Koşulsuz	1235.35	0.75
	Koşullu	873.64	
%1 SBS %3 NC	Koşulsuz	1220.49	0.87
	Koşullu	1010.67	

Tablo 46. SBS(değişken oranlar)-NC(%2) modifiye bitümlü karışımların ITSr değerleri

	Koşullama	ITS (kPa)	ITSr
Kontrol	Koşulsuz	1303.7687	
	Koşullu	1163.6349	
%5 SBS	Koşulsuz	1154.0615	0.78
	Koşullu	907.18285	
%5 SBS %2 NC	Koşulsuz	1310.8934	0.71
	Koşullu	829.45065	
%4 SBS %2 NC	Koşulsuz	1304.4672	0.88
	Koşullu	1022.2584	
%3 SBS %2 NC	Koşulsuz	1415.0138	1.06
	Koşullu	1232.2865	
%2 SBS %2 NC	Koşulsuz	1434.8884	1.01
	Koşullu	1171.2651	
%1 SBS %2 NC	Koşulsuz	1280.317	0.83
	Koşullu	972.58117	

Tablo 47. SBS(değişken oranlar)-NC(%3)-HL (%1) modifiye karışımların ITSr değerleri

	Koşullama	ITS (kPa)	ITSr
Kontrol	Koşulsuz	1303.77	
	Koşullu	1163.63	
%5 SBS	Koşulsuz	1154.06	0.78
	Koşullu	907.18	
%2 HL	Koşulsuz	928.50	0.68
	Koşullu	790.94	
%5 SBS %3 NC %1 HL	Koşulsuz	875.20	0.73
	Koşullu	848.04	
%4 SBS %3 NC %1 HL	Koşulsuz	1315.25	0.83
	Koşullu	970.22	
%3 SBS %3 NC %1 HL	Koşulsuz	1391.31	0.98
	Koşullu	1143.72	
%2 SBS %3 NC %1 HL	Koşulsuz	1215.75	0.83
	Koşullu	969.90	
%1 SBS %3 NC %1 HL	Koşulsuz	1271.02	0.88
	Koşullu	1028.28	

Tablo 48. SBS(değişken oranlar)-NC(%2)-HL (%1) modifiye karışımların ITSr değerleri

Briket no	Koşullama	ITS (kPa)	ITSr
Kontrol	Koşulsuz	1303.77	
	Koşullu	1163.63	
%5 SBS	Koşulsuz	1154.06	0.78
	Koşullu	907.18	
%2 HL	Koşulsuz	928.50	0.68
	Koşullu	790.94	
%5 SBS %2 NC %1 HL	Koşulsuz	1311.59	1.04
	Koşullu	1208.64	
%4 SBS %2 NC %1 HL	Koşulsuz	1245.28	0.93
	Koşullu	1086.25	
%3 SBS %2 NC %1 HL	Koşulsuz	1350.25	0.97
	Koşullu	1129.74	
%2 SBS %2 NC %1 HL	Koşulsuz	1210.38	0.84
	Koşullu	974.30	
%1 SBS %2 NC %1 HL	Koşulsuz	1328.54	1.01
	Koşullu	1179.40	

Benzer şekilde %2 NC içeriği için %30-%47 DSC artışı, %1 kireçli %3 NC içeriği %10-%54, %1 kireçli %2 NC içeriği %10-%7 arasında önemli oranda DSC direncini artırmaktadır. Açıkça görülen şudur ki, tüm modifiye karışımlar DSC direncini oldukça yüksek oranda artırmaktadır. Özellikle %3 SBS-%2 NC, %3SBS-%3NC, %^SBS-%2 NC-%1HL, %3 SBS-%3 NC-%1 HL seçeneklerinde 1.34, 1.47, 1.49, 1.42 olarak, ortalama %40 düzeyinde bir DSC direnci artışı görülmektedir.

2.4.3. Dolaylı Çekme Mukavemeti Testi

Bitümlü karışımların çekme dayanımı özellikleri, çatlama ile ilgili problemlerden dolayı asfalt kaplama mühendisliğinde önemli bir araştırma konusudur. TMA asfalt kaplamalar, basınçta olduğu gibi çekmede güçlü olmasa da, kaplama uygulamalarında TMA çekme mukavemeti önemlidir. Dolaylı çekme mukavemeti testi (ITS), bitümlü karışımın çekme özelliklerini belirlemek için kullanılır ve bu da kaplamanın çatlama özelliklerine bağlıdır. Düşük sıcaklıkta çatlama, yorulma ve tekerlek izi üç ana hasar mekanizmasıdır. Daha yüksek bir çekme mukavemeti daha güçlü bir çatlama direncine karşılık gelir [125].

Bu çalışmada, karışımların düşük sıcaklık çatlama değerlendirmesi AASHTO T 283 yöntemine göre koşullanmış örneklerin, 0°C sıcaklıkta 12 saat bekletildikten sonra elde edilen dolaylı çekme mukavemeti değerlerine göre yapıldı. Deney sırasında alınan bir görüntü Şekil 14'te sunulmuştur. Deney sonuçları ise Tablo 49.- Tablo 52'de verilmiştir.

Tablo 49. SBS(değişken oranlar)-NC(%3) modifiye bitümlü karışımların ITS değerleri

Karışım türü	Briket no	P (kN)	Yükseklik (mm)	ITS (kPa)	Ortalama ITS (kPa)
Kontrol	4	31.28	64.9	3017.84	2551.01
	5	26.81	66.6	2524.01	
	6	22.48	66.7	2111.19	
%5 SBS	4	35.03	64.3	3413.09	3397.09
	5	34.06	64.3	3319.44	
	6	35.32	64.0	3458.74	
%5 SBS % 3 NC	4	31.17	66.5	2935.95	3186.58
	5	36.1	65.6	3446.78	
	6	33.31	65.7	3177.00	
%4 SBS % 3 NC	4	31.88	66.6	2998.02	2901.94
	5	25.28	66.1	2394.97	
	6	34.72	65.7	3312.83	
%3 SBS % 3 NC	4	34.61	65.1	3330.57	3418.56
	5	37.66	65.1	3626.86	
	6	34.29	65.1	3298.25	
%2 SBS % 3 NC	4	41.05	65.5	3928.98	3262.19
	5	29.06	65.7	2773.20	
	6	31.85	64.7	3084.39	
%1 SBS % 3 NC	4	36.78	65.1	3541.75	3117.78
	5	30.42	65.3	2916.90	
	6	30.21	65.4	2894.70	



Şekil 14. Dolaylı çekme mukavemeti deneyinin yapılışı

Tablo 50. SBS(değişken oranlar)-NC(%2) modifiye bitümlü karışımların ITS değerleri

Karışım türü	Briket no	P (kN)	Yükseklik (mm)	ITS (kPa)	Ortalama ITS (kPa)
Kontrol	4	31.28	64.9	3017.841	2551.014
	5	26.81	66.6	2524.013	
	6	22.48	66.7	2111.187	
%5 SBS	4	35.03	64.3	3413.092	3397.091
	5	34.06	64.3	3319.442	
	6	35.32	64.0	3458.738	
%5 SBS % 2 NC	4	37.7	65.4	3612.571	3329.23
	5	31.38	65.9	2981.731	
	6	35.53	65.6	3393.389	
%4 SBS %2 NC	4	36.68	64.8	3548.111	3450.391
	5	36.96	65.9	3513.542	
	6	33.69	64.2	3289.522	
%3 SBS %2 NC	4	37.89	65.2	3642.103	3744.351
	5	39.08	65.2	3757.45	
	6	40.65	66.4	3833.501	
%2 SBS %2 NC	4	38.56	65.0	3718.103	3408.607
	5	36.07	64.8	3486.951	
	6	30.96	64.2	3020.766	
%1 SBS %2 NC	4	35.49	65.3	3406.356	3717.796
	5	41.75	64.6	4051.674	
	6	37.87	64.2	3695.358	

Tablo 51. SBS(değişken oranlar)-NC(%3)-HL (%1) modifiye karışımların ITS değerleri

Karışım türü	Briket no	P (kN)	Yükseklik (mm)	ITS (kPa)	Ortalama ITS (kPa)
Kontrol	4	31.28	64.9	3017.841	2551.014
	5	26.81	66.6	2524.013	
	6	22.48	66.7	2111.187	
%5 SBS	4	35.03	64.3	3413.092	3397.091
	5	34.06	64.3	3319.442	
	6	35.32	64.0	3458.738	
%2 HL	4	28.48	65.0	2745.447	2818.082
	5	31.08	64.9	3000.547	
	6	27.94	64.6	2708.252	
%5 SBS %3 NC %1 HL	4	40.11	66.2	3796.862	3478.501
	5	33.75	65.7	3219.133	
	6	36.1	66.2	3419.509	
%4 SBS %3 NC %1 HL	4	39.82	66.7	3739.095	3372.29
	5	36.44	65.8	3471.482	
	6	30.6	66.0	2906.293	
%3 SBS %3 NC %1 HL	4	39.4	65.0	3796.178	3796.601
	5	42.44	65.6	4053.141	
	6	37.04	65.6	3540.484	
%2 SBS %3 NC %1 HL	4	39.54	65.7	3770.245	3936.236
	5	45.59	65.8	4343.604	
	6	38.83	65.9	3694.86	
%1 SBS %3 NC %1 HL	4	40.64	65.2	3907.641	3752.564
	5	37.62	64.5	3657.294	
	6	38.14	64.7	3692.759	

Tablo 52. SBS(değişken oranlar)-NC(%2)-HL (%1) modifiye karışımların ITS değerleri

Karışım türü	Briket no	P (kN)	Yükseklik (mm)	ITS (kPa)	Ortalama ITS (kPa)
Kontrol	4	31.28	64.9	3017.841	
	5	26.81	66.6	2524.013	2551.014
	6	22.48	66.7	2111.187	
%5 SBS	4	35.03	64.3	3413.092	
	5	34.06	64.3	3319.442	3397.091
	6	35.32	64.0	3458.738	
%2 HL	4	28.48	65.0	2745.447	
	5	31.08	64.9	3000.547	2818.082
	6	27.94	64.6	2708.252	
%5 SBS %2 NC %1 HL	4	44.36	66.6	4176.04	
	5	33.44	66.1	3169.622	3565.175
	6	35.24	65.9	3349.863	
%4 SBS %2 NC %1 HL	4	41.06	65.5	3925.935	
	5	35.57	65.7	3392.728	3508.413
	6	33.4	65.3	3206.575	
%3 SBS %2 NC %1 HL	4	41.18	65.2	3958.146	
	5	37	65.1	3561.288	3627.004
	6	34.85	65.0	3361.578	
%2 SBS %2 NC %1 HL	4	40.65	65.9	3865.694	
	5	37.43	65.5	3581.04	3645.423
	6	36.83	66.1	3489.536	
%1 SBS %2 NC %1HL	4	44.13	64.5	4288.622	
	5	43.97	64.0	4304.674	4261.124
	6	42.98	64.3	4190.077	

%3 NC ve %2 NC oranları için 0.70 oranı kabul edilebilir bir kriter olarak seçilirse, tüm karışımların su hasarı direnci bakımından yeterli olduğu görülmektedir. Ancak SBS oranının azaltılması noktasında sabit NC oranları için ITSR anlamında lineer bir ilişki yoktur. Tüm karışımlardan elde edilen sonuç u hasarı yorumu noktasında, Lottman testi ile SBS oranının azaltılabileceğini göstermektedir. Benzer şekilde daha düşük NC oranı olan %2 içeriğinde tüm SBS içerikli karışımlar için (%3 NC'ye göre) çok daha yüksek oranlar vermektedir. Bu durum ise sönmüş kirecin daha düşük NC oranlarında daha yüksek su hasarı direnci gösterdiğiidir.

2.4.4. Marshall Oranı (MQ)

Marshall testinden elde edilen önemli verilerden birisi stabilitenin (kN) akmaya (mm) oranıdır. Marshall oranı olarak belirtilen bu MQ oranı değerlendirilerek, asfalt karışım dayanımı, deformasyon ve tekerlek izi tahmin edilebilir. Yüksek MQ değeri, asfalt karışımının daha rijit olduğunu ve kalıcı deformasyona karşı daha dirençli olduğunu gösterir [118 - 120].

Bir tekerlek izi göstergesi olarak MQ oransal değeri, asfalt karışımının tekerlek izi mukavemeti anlamında RHA ilavesiyle pozitif ilişkide bulundu [121].

Bu çalışmada Marshall stabilite testi 25°C sıcaklıkta, Marshall stabilite cihazında Şekil 15'te gösterildiği gibi yapılmıştır. Testten elde edilen sonuçlar Tablo 52. – Tablo 55.'de özetlenmiştir.



Şekil 15. Marshall stabilite testi deney düzeneği

Tablo 53. Değişik oranlarda SBS ve %3NC modifiye bitümlü karışımların stabilite ve MQ değerleri

Karışım Türü	Briket No	Akma(mm)	Stabilite (kN)	MQ (kN/mm)
Kontrol	7	6.66	36.29	5.45
	8	5.37	37.33	6.95
	9	6.87	37.82	5.50
	10	6.33	40.48	6.40
%5SBS	7	11.58	40.10	3.46
	8	4.03	44.24	10.98
	9	3.89	43.62	11.21
	10	6.15	41.80	6.80
%5SBS %3NC	7	2.29	43.91	19.18
	8	11.6	43.22	3.73
	9	3.94	44.32	11.25
	10	2.83	44.48	15.72
%4SBS %3NC	7	11.81	39.30	3.33
	8	11.75	39.65	3.37
	9	12.57	40.43	3.22
	10	11.66	38.83	3.33
%3SBS %3NC	7	3.37	44.03	13.07
	8	11.8	42.31	3.59
	9	6.53	40.17	6.15
	10	12.23	36.27	2.97
%2SBS %3NC	7	14.82	34.12	2.30
	8	10.47	39.36	3.76
	9	7.25	39.40	5.43
	10	11.47	34.29	2.99
%1SBS %3NC	7	9.86	38.81	3.94
	8	7.06	40.99	5.81
	9	5.44	36.75	6.76
	10	8.64	38.12	4.41

Tablo 54. Değişik oranlarda SBS ve %2NC modifiye bitümlü karışımların stabilite ve MQ değerleri

Karışım Türü	Briket No	Akma(mm)	Stabilite (kN)	MQ (kN/mm)
Kontrol	7	6.66	36.29	5.45
	8	5.37	37.33	6.95
	9	6.87	37.82	5.50
	10	6.33	40.48	6.40
%5SBS	7	11.58	40.10	3.46
	8	4.03	44.24	10.98
	9	3.89	43.62	11.21
	10	6.15	41.80	6.80
%5SBS %2NC	7	8.88	39.61	4.46
	8	6.7	39.57	5.91
	9	6.14	39.41	6.42
	10	7.16	38.48	5.37
%4SBS %2NC	7	12.44	38.68	3.11
	8	2.79	39.22	14.06
	9	3.52	41.34	11.75
	10	9.48	40.92	4.32
%3SBS %2NC	7	3.2	41.64	13.01
	8	5.51	44.33	8.05
	9	6.79	38.09	5.61
	10	6.98	44.14	6.32
%2SBS %2NC	7	3.43	43.79	12.77
	8	5.71	43.32	7.59
	9	7.22	42.52	5.89
	10	2.66	44.41	16.70
%1SBS %2 NC	7	8.32	39.49	4.75
	8	5.52	40.33	7.31
	9	11.28	41.06	3.64
	10	7.03	41.71	5.93

Tablo 55. Değişik oranlarda SBS- %3NC-%1HL modifiye karışımların stabilite ve MQ değerleri

Karışım Türü	Briket No	Akma(mm)	Stabilite (kN)	MQ (kN/mm)
Kontrol	7	6.66	36.29	5.45
	8	5.37	37.33	6.95
	9	6.87	37.82	5.50
	10	6.33	40.48	6.40
%5SBS	7	11.58	40.10	3.46
	8	4.03	44.24	10.98
	9	3.89	43.62	11.21
	10	6.15	41.80	6.80
%2HL	7	9.17	32.85	3.58
	8	1.38	34.76	25.19
	9	6.05	34.85	5.76
	10	6.76	32.05	4.74
%5SBS %3NC %1HL	7	10.79	43.48	4.03
	8	3.54	44.24	12.50
	9	1.75	45.76	26.15
	10	9.5	44.06	4.64
%4SBS %3NC %1HL	7	5.16	43.71	8.47
	8	10.65	41.31	3.88
	9	8.18	42.13	5.15
	10	3.59	43.02	11.98
%3SBS %3NC %1 HL	7	3.01	43.76	14.54
	8	3.43	44.51	12.98
	9	3.67	44.05	12.00
	10	3.05	44.16	14.48
%2SBS %3NC %1HL	7	4.65	40.39	8.69
	8	6	41.60	6.93
	9	6.62	43.68	6.60
	10	5.56	39.65	7.13
%1SBS %3NC %1HL	7	4.1	40.96	9.99
	8	8.16	42.32	5.19
	9	6.4	38.94	6.09
	10	6.09	38.98	6.40

Tablo 56. Değişik oranlarda SBS- %2NC-%1HL modifiye karışımların stabilite ve MQ değerleri

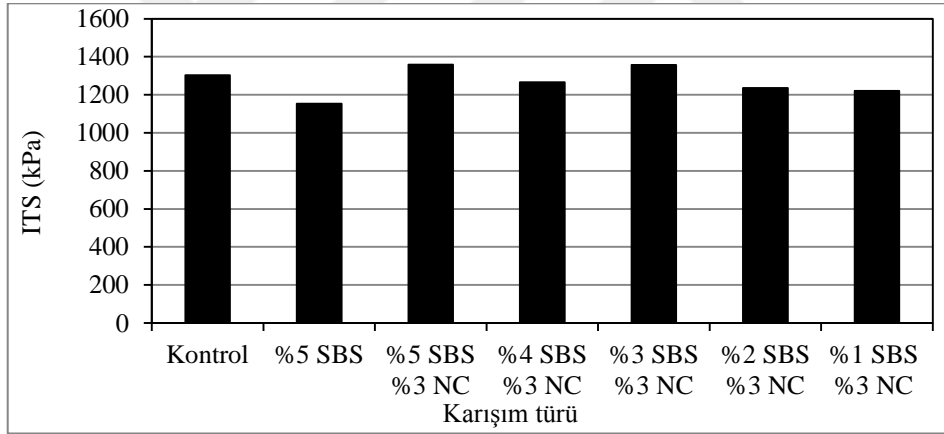
Karışım Türü	Briket No	Akma(mm)	Stabilite (kN)	MQ (kN/mm)
Kontrol	7	6.66	36.29	5.45
	8	5.37	37.33	6.95
	9	6.87	37.82	5.50
	10	6.33	40.48	6.40
%5SBS	7	11.58	40.10	3.46
	8	4.03	44.24	10.98
	9	3.89	43.62	11.21
	10	6.15	41.80	6.80
%2HL	7	9.17	32.85	3.58
	8	1.38	34.76	25.19
	9	6.05	34.85	5.76
	10	6.76	32.05	4.74
%5SBS %2NC %1HL	7	9.85	42.28	4.29
	8	9.71	41.77	4.30
	9	8.04	39.73	4.94
	10	3.81	43.84	11.51
%4SBS %2NC %1HL	7	6.7	43.99	6.57
	8	9.41	42.31	4.50
	9	4.63	44.23	9.55
	10	3.56	44.09	12.39
%3SBS %2NC %1HL	7	7.86	43.86	5.58
	8	4.63	43.90	9.48
	9	9.31	42.56	4.57
	10	3.23	43.75	13.55
%2SBS %2NC %1HL	7	9.16	35.17	3.84
	8	8.09	37.00	4.57
	9	7.34	40.61	5.53
	10	10.51	39.66	3.77
%1SBS %2NC %1HL	7	8.08	39.53	4.89
	8	6.5	38.91	5.99
	9	5.57	43.09	7.74
	10	5.09	41.62	8.18

3. BULGULAR VE İRDELEME

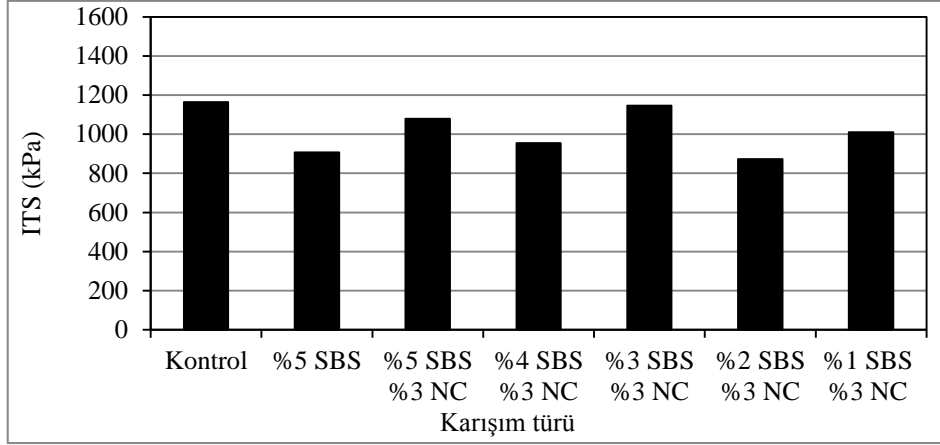
Bu kısımda, uygulanan çalışmalardan elde edilen bulgular değerlendirilmektedir. Ulaşılan sonuçlar literatür ile karşılaştırmalı olarak irdelenmektedir.

3.1. Su Hasarı Değerlendirmesi

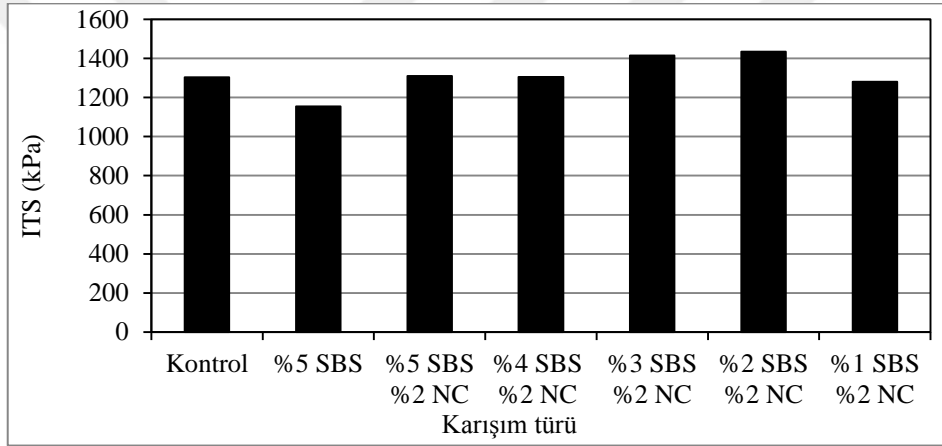
Katkılı ve katkısız bütün karışımların su hasarına karşı direnci Modifiye Lottman (AASHTO T 283) yöntemine göre belirlendi. Test yöntemine göre, 25°C sıcaklıkta koşullu ve koşulsuz örneklerle dolaylı çekme mukavemeti testi yapıldı. Karışımların çekme mukavemeti değerleri Şekil 16 – Şekil 23’te verildi.



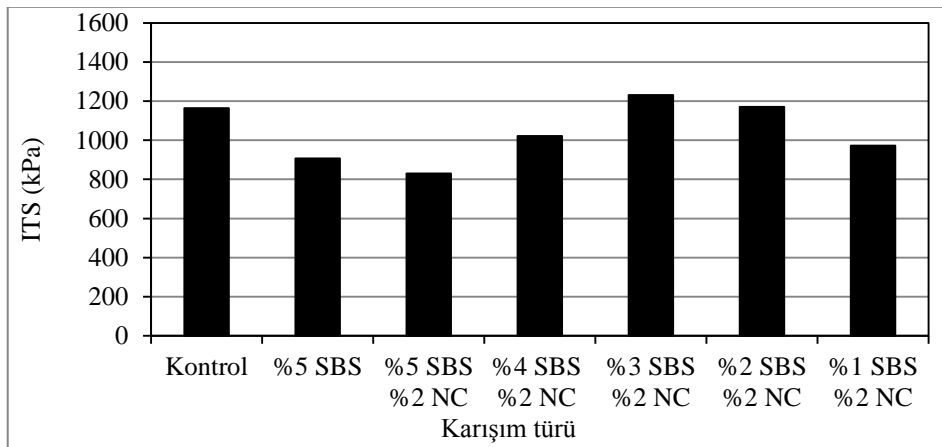
Şekil 16. %3 NC modifiye seçenekli koşulsuz karışımların 25°C sıcaklıktaki çekme mukavemeti değerleri



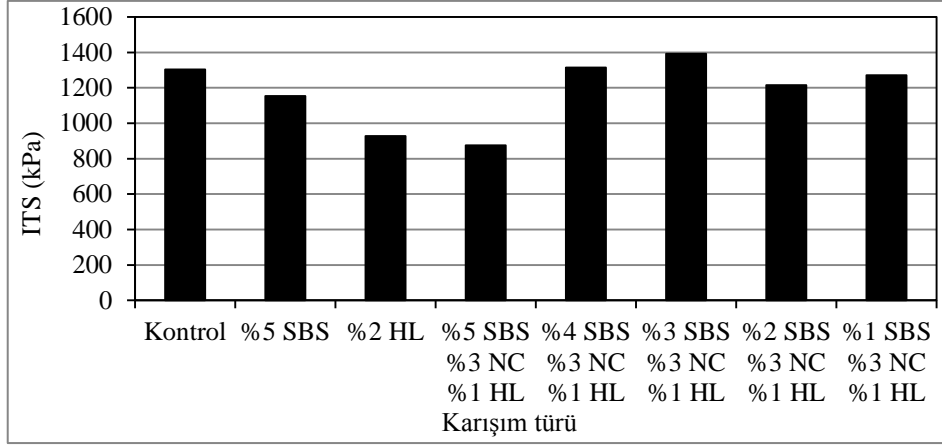
Şekil 17. %3 NC modifiye seçenekli koşullu karışımların 25°C sıcaklıktaki çekme mukavemeti değerleri



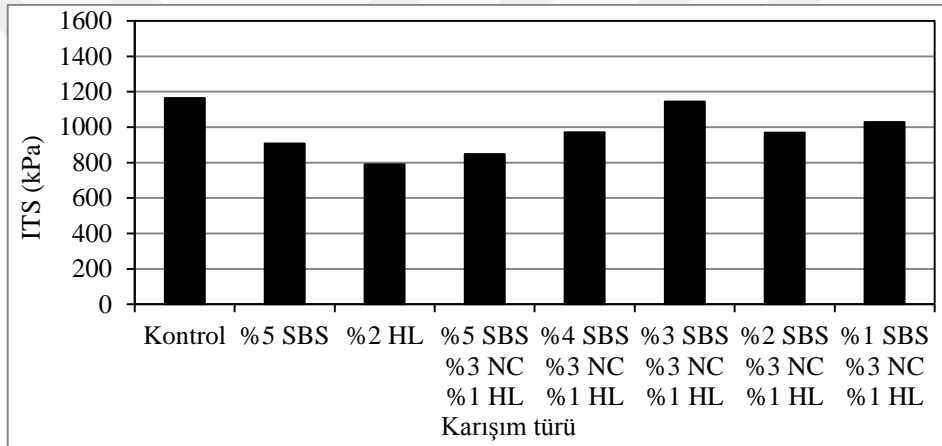
Şekil 18. %2 NC modifiye seçenekli koşulsuz karışımların 25°C sıcaklıktaki çekme mukavemeti değerleri



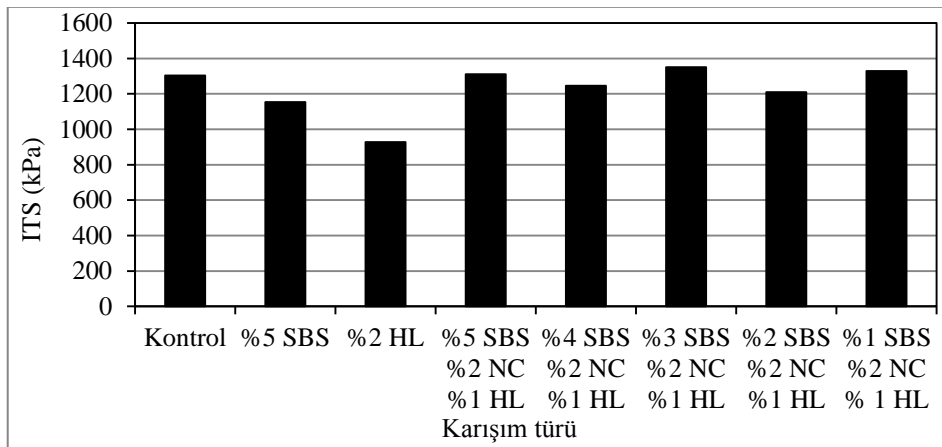
Şekil 19. %2 NC modifiye seçenekli koşullu karışımların 25°C sıcaklıktaki çekme mukavemeti değerleri



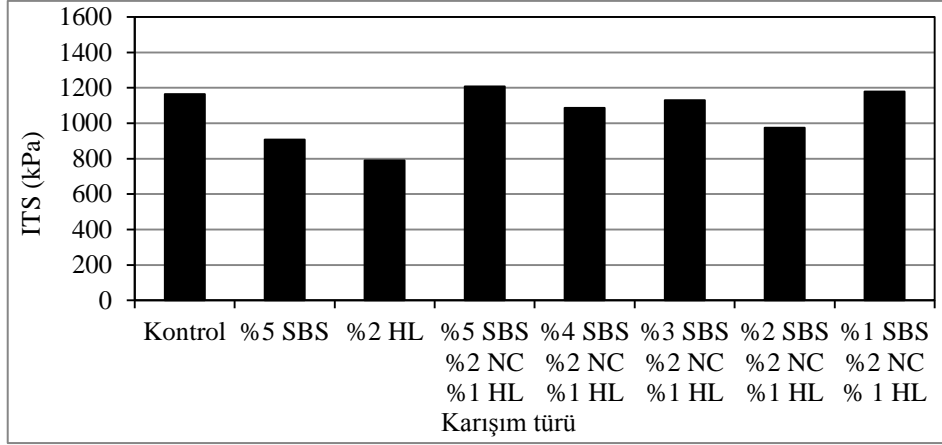
Şekil 20. %3 NC ve %1HL modifiye seçenekli koşulsuz karışımların 25°C sıcaklıktaki çekme mukavemeti değerleri



Şekil 21. %3 NC ve %1HL modifiye seçenekli koşullu karışımların 25°C sıcaklıktaki çekme mukavemeti değerleri

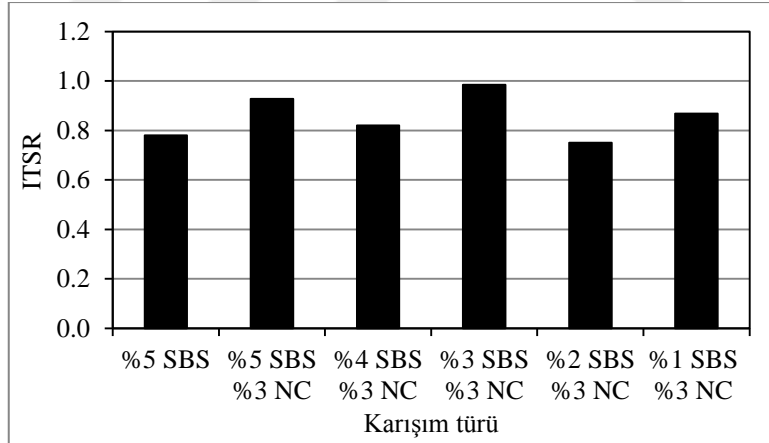


Şekil 22. %2 NC ve %1HL modifiye seçenekli koşulsuz karışımların 25°C sıcaklıktaki çekme mukavemeti değerleri

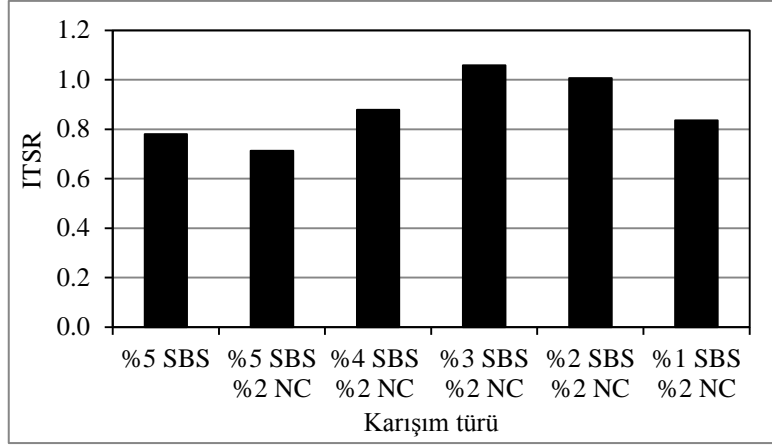


Şekil 23. %2 NC ve %1HL modifiye seçenekli koşullu karışımların 25°C sıcaklıktaki çekme mukavemeti değerleri

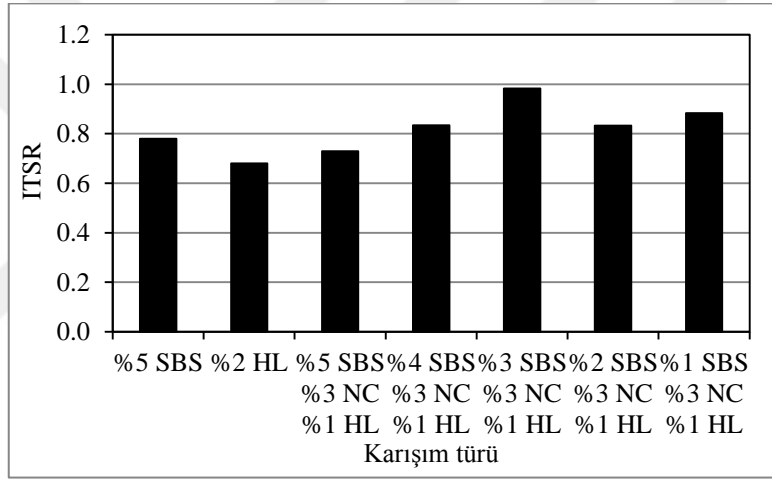
Su hasarı değerlendirmesi çekme mukavemeti oranı (ITSR) değeri ile yapıldı. ITSR, katkıli karışımların koşullu çekme mukavemetinin kontrol karışımların koşullu çekme mukavemetine oranı olarak hesaplandı. Katkı türü ve oranlarına bağlı olarak oluşturulan karışım kombinasyonları için ITSR değerleri Şekil 25 – Şekil 28’de gösterildi.



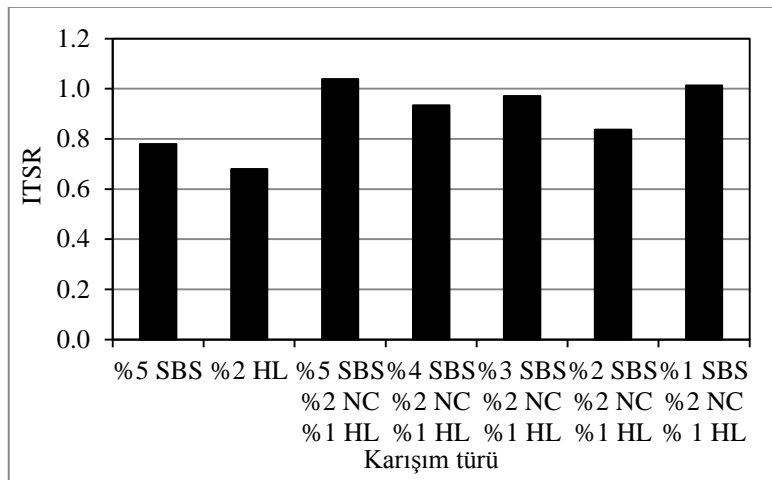
Şekil 24. %3 NC modifiye seçenekli karışımların ITSR değerleri



Şekil 25. %2 NC modifiye seçenekli karışımların ITSR değerleri



Şekil 26. %3 NC ve %1HL modifiye seçenekli karışımların ITSR değerleri



Şekil 27. %2NC ve %1HL modifiye seçenekli karışımların ITSR değerleri

Modifiye Lottman testi su hasarı bakımından uygulandı. %1HL içeriği, %2 ve %3 sabit NC oranları için, SBS oranlarının azaltılabilesine, su hasarı bakımından olanak sağlamaktadır. Bütün NC katkılı azalan SBS oranlı modifiye karışımlar, %1HL ile daha yüksek su hasarı direnci vermektedir. Yani zaten katılması zorunlu görülen NC katkısı, HL ile birlikte (%1) düşünülduğünde su hasarı bakımından SBS oranının azaltılabileceği dile getirilmektedir. Bununla birlikte söz konusu çoklu katkı seçenekleri için Modifiye Lottman testinin ayırt edici bir deney yöntemi olarak görüldüğü açıkça ortaya çıkmaktadır.

Modifiye Lottman testi ile kireçsiz karışımlarda su hasarı problemi irdelendiğinde şu çıkarımlar olanaklı gözükmektedir. %3NC içeriğinde SBS oranı azaltılsa bile su hasarı direnci artmaktadır. Dolayısıyla SBS oranının azaltılabilesi olanaklı görülmektedir. %2NC oranı için yine SBS oranı azaltılsa bile su hasarı direnci artmaktadır. Düşük SBS ile %2NC daha yüksek su hasarı direnci göstermektedir. Bu anlamda düşük SBS daha düşük NC içeriğinin (%2) sinerjik bir yararı su hasarı bakımından gösterdiği anlaşılmaktadır. %2NC değeri, su hasarı bakımından %3NC değerine göre çok daha uygun olarak mütalaa edilmektedir.

Su hasarı bakımından, kireç kullanılmayan karışımlarda, %3NC değerine göre, kabul kriteri olabilen 0.70-0.80 oransal değerleri bakımından yorumlandığında, %2NC değeri daha mantıklı bir oran olarak görülmektedir.

Lottman testinde, Standart olarak genellikle 0,70 ila 0,80 arasında bir minimum dolaylı çekme mukavemeti oranı (TSR) kabul kriteri olarak kullanılır. Koşulsuz numunelerin bölünmüş dolaylı çekme mukavemetini, su ile kısmen doymuş numunelerle karşılaştırır. Test, şartlandırılmış grubu kısmi vakum doygunluğuna ve isteğe bağlı bir donma-çözülme döngüsüne maruz bırakır. Su koşullandırılmalı numunelerin daha düşük bir gerilme mukavemetine sahip olması beklense de, aşırı düşük değerler nem hasarı potansiyelini göstermektedir.

Sıcak karışım asfaltta (HMA) oluşan nem hasarı esnek kaplamaların dayanıklılığındaki en önemli sorunlardan biridir. Son yıllarda HMA'nın nem duyarlılığını değerlendirmek için çok sayıda yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemlerden bazıları daha basit ve daha az maliyetlidir (kalitatif testler) ve bazıları daha güvenilirdir. Kaynama suyu testini (ASTM D3625) görsel değerlendirmeden objektif değerlendirmeye çevirmek için bir dijital görüntü analizi yaklaşımı kullanılmıştır. Kaynar su testi ve modifiye Lottman testi (AASHTO T283) sonuçlarının görüntü analizinden elde edilen soyulma yüzdelerini karşılaştırmak için laboratuvar testleri gerçekleştirildi. AASHTO T283 testinde, Dolaylı

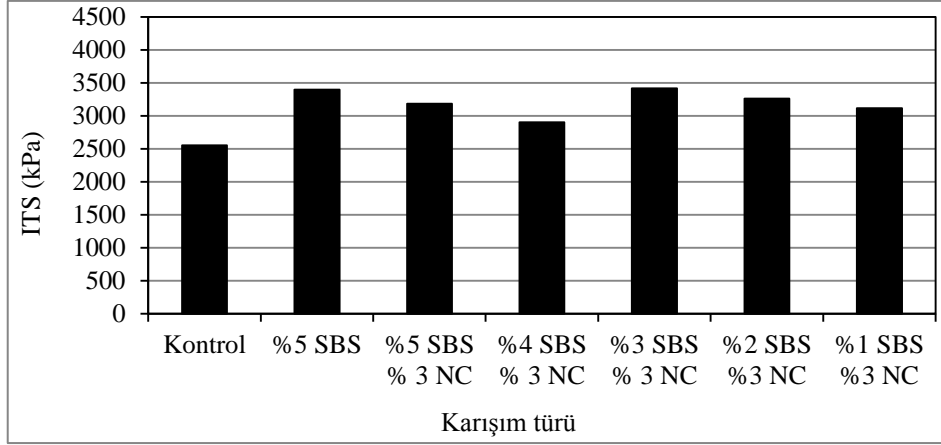
çekme testine ek olarak, dinamik modül (E^*) testi ve Marshall stabilite testi yapıldı. Bu nedenle üç kriter; iki yöntemin sonuçlarının karşılaştırılması için çekme mukavemeti oranı (TSR), E^* rijitlik oranı (ESR) ve kalıcı (oransal) Marshall stabilitesi (RMS) kullanılmıştır. Dinamik modül testi dolaylı gerilim modunda gerçekleştirildi ve dinamik modül E^* 'ın hesaplanması için lineer viskoelastik çözelti kullanılmıştır. Bulgular kaynama su testi sonuçlarının TSR ve ESR ile anlamlı ilişki oluşturduğunu göstermiştir. Üç test arasında iyi bir ilişki bulunmuştur; bununla birlikte, kaynama testi sonuçları RMS ile anlamlı ilişki göstermemiştir [33].

Nanokil, nano hidrate kireç ve nano karbon gibi nanomalzemeler, asfalt bağlayıcıların ve karışımların mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesinde önemli etkiye sahiptir. Nanokil malzemelerin birçok yararı veya ümit vaat eder potansiyeli, esnek kaplama uygulamaları için baz bitüm ile modifiye edildiğinde söz konusudur. Bu malzemeler ayrıca SBS-modifiye bağlayıcının performans özelliklerini daha da geliştirmek için ikincil bir modifiye edici olarak kullanılmıştır [142].

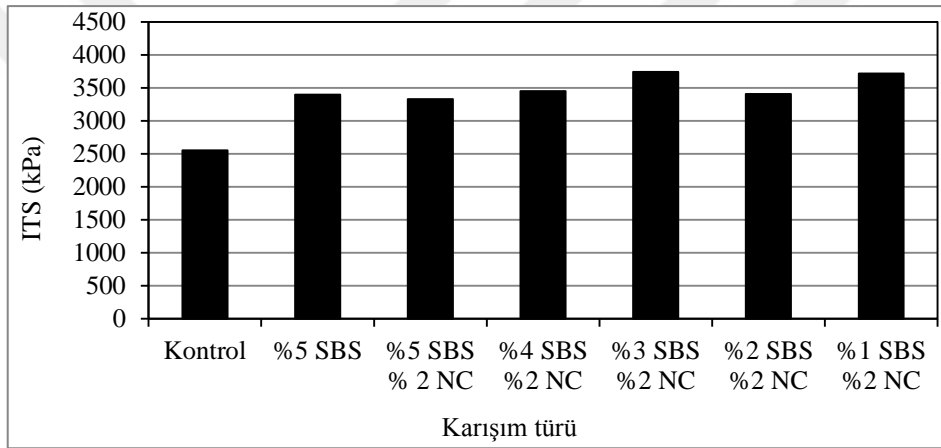
Sıcak karışım asfalt (HMA) karışımlarında, toplam karışımın ağırlığının yüzdesi olarak 2, 3.5 ve 5 farklı dozajlarında filler maddesi olarak nanokil parçacıkları kullanıldığı bir çalışmada performans karakteristikleri; nem duyarlılığı, dolaylı çekme mukavemeti, tekrarlı sünme ve Modifiye Lottman testleri ile incelenerek, nanokilin % 2 değerini içeren karışımın en iyi performansa sahip olduğu belirlenmiştir [138].

3.2. Düşük Sıcaklık Çatlama Değerlendirmesi

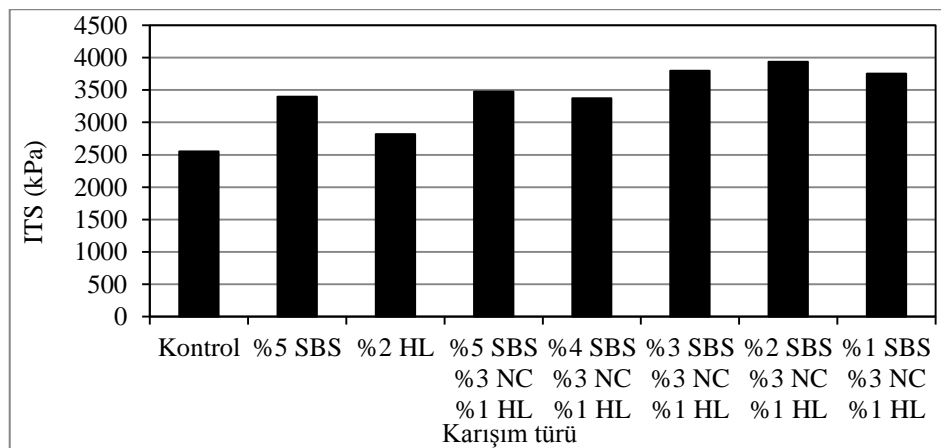
Asfalt karışım örneklerinin düşük sıcaklık çatlama dolaylı çekme mukavemeti deneyi ile 0°C sıcaklıkta yapılan testlerle değerlendirildi. Bütün testlerde AASHTO T 283'e göre koşullama yapılmış Marshall briketleri kullanıldı. Yöntem ile elde edilen sonuçlar Şekil 28 – Şekil 31'de verildi.



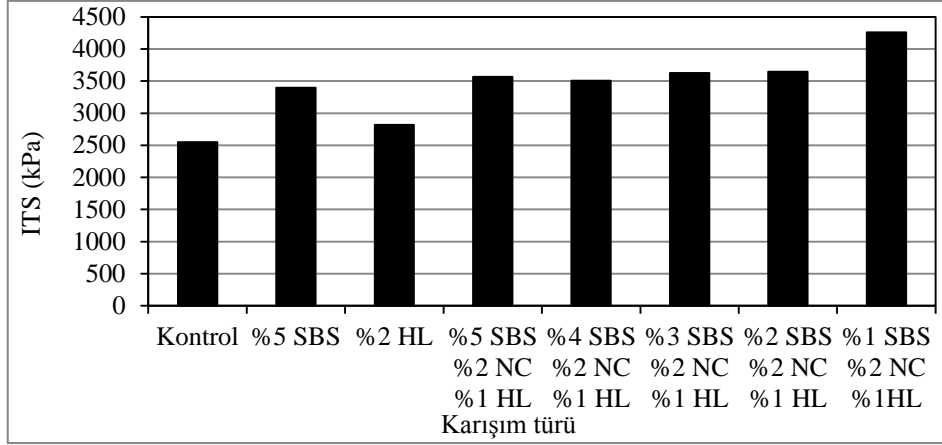
Şekil 28. %3 NC katkıli karışımların düşük sıcaklık çatlaması değerlendirilmesi



Şekil 29. %2 NC katkıli karışımların düşük sıcaklık çatlaması değerlendirilmesi



Şekil 30. %3 NC -%1 HL katkıli karışımların düşük sıcaklık çatlaması değerlendirilmesi



Şekil 31. %2 NC -%1 HL katkıli karışımların düşük sıcaklık çatlama değerlendirmesi

Tanımlanan karışımlara dolaylı çekme mukavemeti deneyi uygulanmış ve düşük sıcaklık çatlama probleminin değerlendirilmesi yoluna gidilmiştir. %3NC sabit oranında SBS oranının %5 değerinden %1 değerine kadar kademeli olarak azalması durumunda, %1HL içeriği düşük sıcaklık çatlama problemini önemli ölçüde iyileştirmektedir. Düşük sıcaklık çatlama problemi bakımından 1HL ilavesi ile %3NC için ve aynı zamanda %2NC için de geçerli olmak üzere, tüm katkıli seçeneklerde yüksek çatlama dayanımı elde edilmektedir. Yani, DSC problemi noktasında, %1HL içeriği NC'nin %2 ve %3 değerleri için etkin görülmektedir. SBS oranı, DSC noktasında maliyet sorgulamasına ilişkin olarak, oranın azaltılabileceği ve uyumun güçlendirilebileceği değerlendirilmektedir.

Düşük sıcaklık çatlama problemi dolaylı çekme mukavemeti testleri kireçsiz karışımlarda değerlendirildi. Bu karışımlar, kontrol karışımlar, %5SBS içerikli karışımlar, %5-%4-%3-%2-%1 azalan SBS'li ve %2-%3 NC içerikli karışımlardır. %3 NC katkıli karışımlar değerlendirildiğinde, düşük sıcaklık çatlama problemi bakımından %3-%2-%1 SBS oranlarının yeterli olduğu görülmektedir. %2 NC katkıli karışımlar değerlendirildiğinde yine %3-%2-%1 SBS katkıli karışımların %5 SBS ile benzer performans verdiği anlaşılmaktadır.

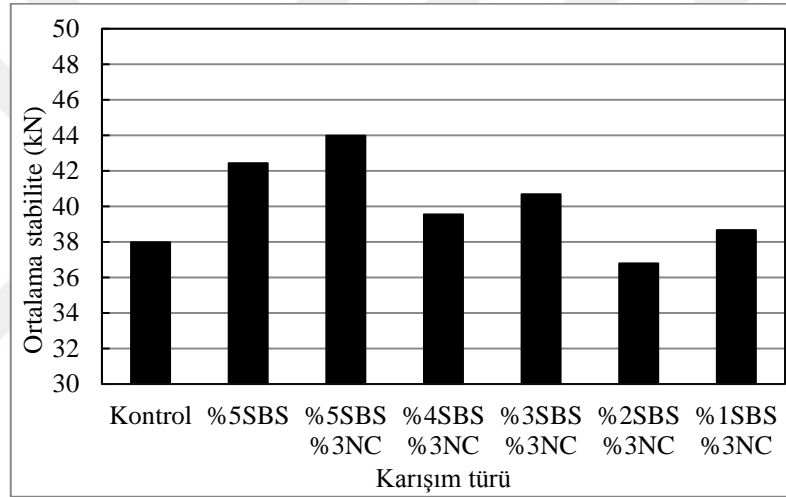
Düşük sıcaklık çatlama direnci bakımından, kireç kullanılmayan karışımlarda, %3NC değerine göre %2NC değerinin seçilmesi daha mantıklı bulunmaktadır. Daha yüksek mukavemet değeri elde edilmektedir.

Su duyarlılığı ve çekme mukavemeti problemleri nano-kil ve karbon mikrofiber modifikasyonu ile incelendiği bir çalışmada da nano-kil ajanlar, asfalt karışımlarının

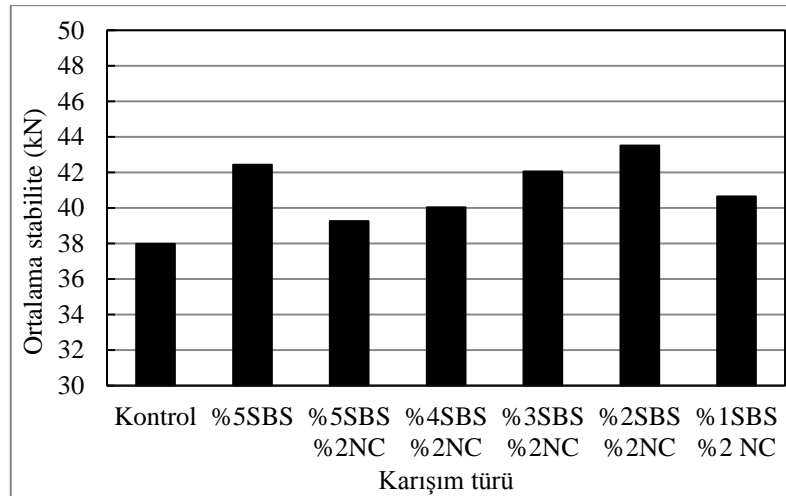
mekanik mukavemetini arttırmış, %1.5 nano-kil modifikasyonu, daha yüksek çekme mukavemeti ve nem duyarlılık performansı göstermiştir [94].

3.3. Tekerlek İzi Değerlendirmesi

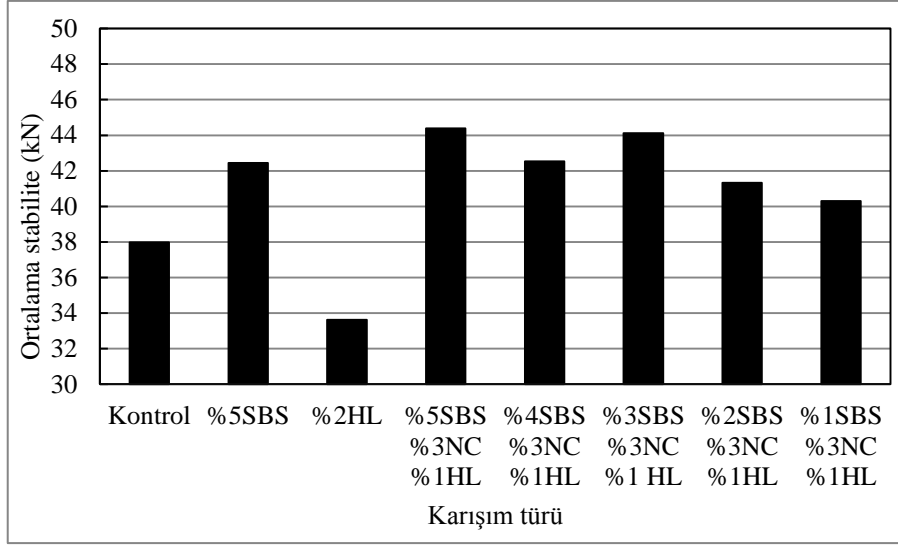
Karışımlar tekerlek izi direnci açısından Marshall oranı (MQ) yaklaşımıyla değerlendirildi. MQ, 25°C sıcaklıkta yapılan Marshall stabilitesi testinden elde edilen stabilite değerlerinin akma değerlerine oranlanmasıyla belirlendi. Karışımların stabilite değerleri Şekil 32 – Şekil 35’te, MQ değerleri ise Şekil 36-Şekil 39’da özetlendi.



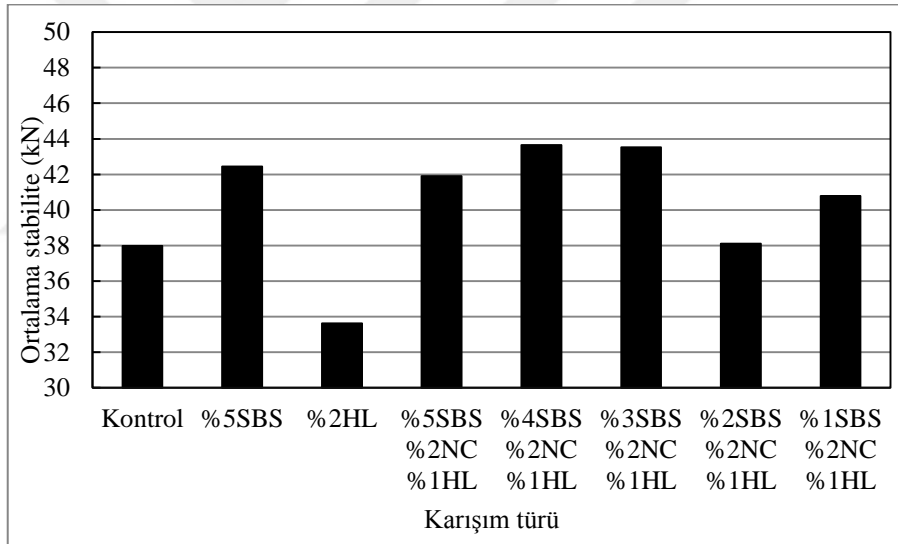
Şekil 32. %3NC katkıli karışımların ortalama stabilite değerleri



Şekil 33. %2NC katkıli karışımların ortalama stabilite değerleri



Şekil 34. %3NC -%1HL katkıli karışımların ortalama stabilite değerleri



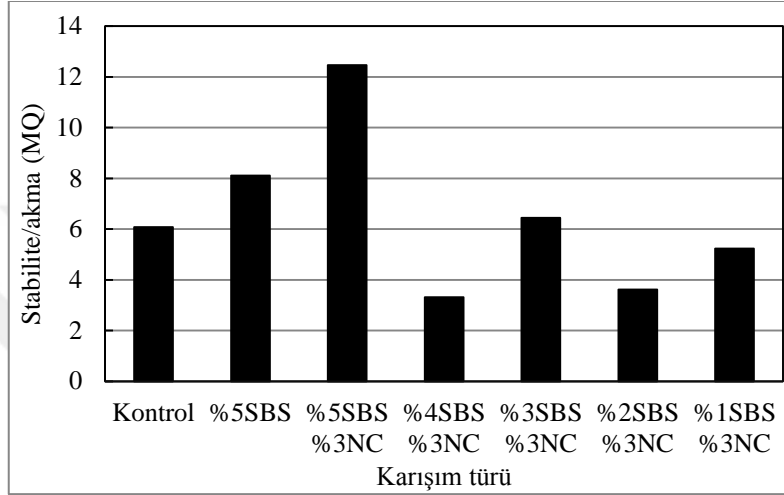
Şekil 35. %2NC -%1HL katkıli karışımların ortalama stabilite değerleri

Nanokil ve sönmüş kireç birlikteliği seçilen katkı oranları için stabilite anlamında sinerjik bir etki göstermektedir. Bu konu, nanokilin hem %3 kullanım oranı hem de %2 kullanım oranı için geçerliliğini sürdürmüştür. Buna karşın SBS önemli bir performans artırıcı katkı olarak görülmektedir.

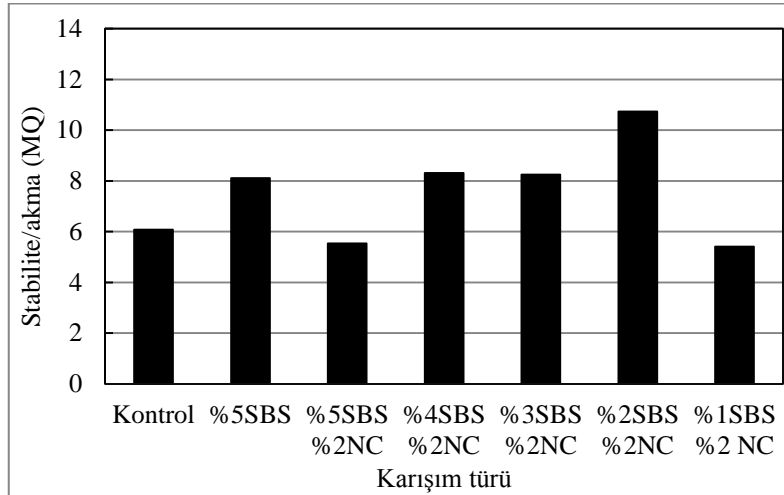
Literatürde, modifiye edilmemiş ve nano-kil modifiye bitümlü asfalt karışımları için testler için karşılaştırmalı mekanik ve reolojik testler de gerçekleştirilmiştir. Nano-kil,

asfalt karışımlarının dolaylı çekme mukavemeti, esnek modülü ve stabilitesini iyileştirme etkisine sahip olduğu görülmüştür [25].

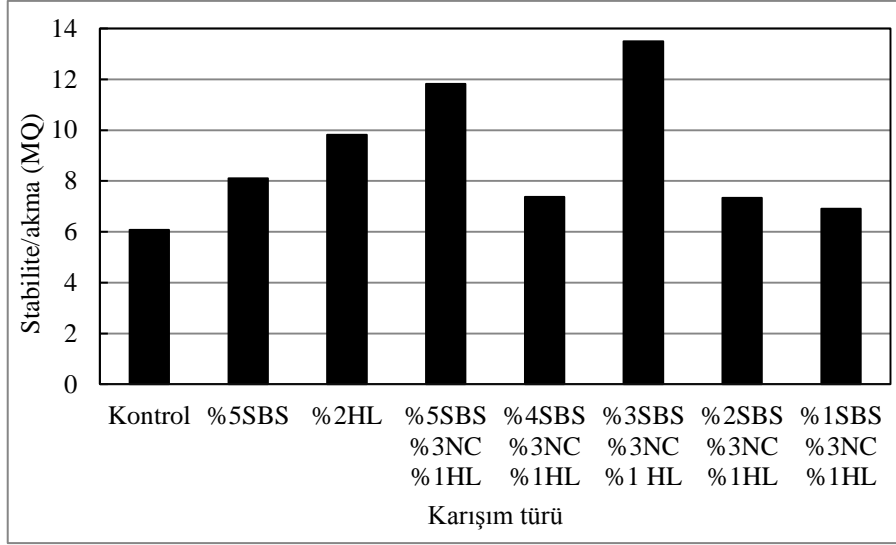
Nano kompozit modifiye bitümün performansı araştırıldı. Geleneksel bitümün fiziksel, mekanik ve reolojik özellikleri ile nano-kompozit ile modifiye edilmiş bitüm karşılaştırılmıştır. Nano kompozit, fiziksel ve reolojik davranışları ve de bitümün stabilitesini artırabileceği ileri sürülmüştür [2].



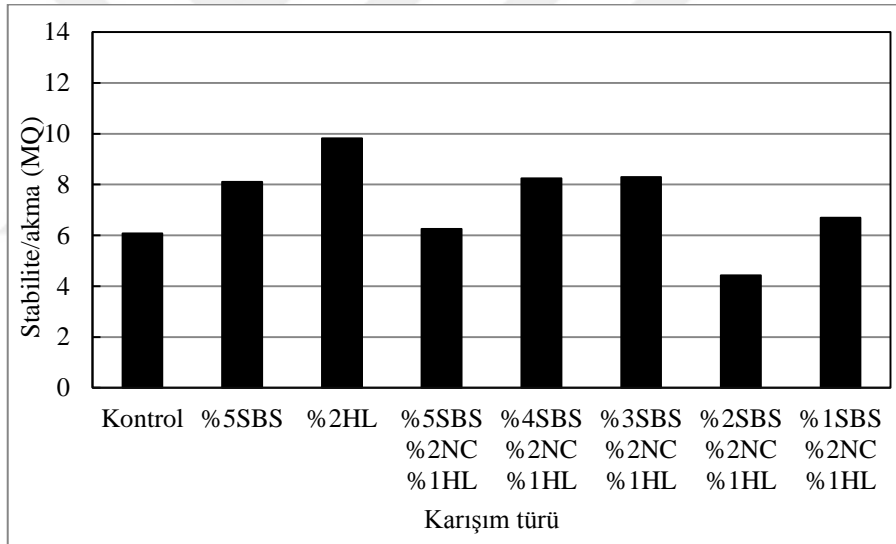
Şekil 36. %3NC katkıli karışımların MQ değerleri



Şekil 37. %2NC katkıli karışımların MQ değerleri



Şekil 38. %3NC -%1HL katkıli karışımların MQ değerleri



Şekil 39. %2NC -%1HL katkıli karışımların MQ değerleri

Stabilite/akma değerleri irdelenmiştir. %3NC ve SBS kullanılan karışımlarda, ilave olarak sönmüş kireç katkısının kullanılması stabilite/akma oranlarını artırmaktadır. Yani MQ yaklaşımı noktasında, HL, MQ değerini artırmaktadır. %5 SBS oranının altına düştüğünde %3 NC ilaveli karışımlarda (SBS+NC) MQ oranlarında önemli derecede performans azalması görülmektedir. Fakat SBS+NC karışımlarda %1HL ilavesi ile düşük SBS oranlarında da yüksek MQ değeri elde edilmektedir. Bu durum, HL'nin NC ile karışımda SBS azalsa bile sinerjik bir etkileşim içerisinde olduğunu göstermektedir. Aynı

etki, yani HL'nin MQ üzerinde belirtilen etkisi %2NC karışımlarda da benzer biçimde olmasına karşın %3NC oranı için daha belirgin durumdadır. %3NC oranı için (SBA+NC+HL) karışımlarda daha belirgin durumdadır. MQ yorumuna göre, %3NC oranı %1HL etkileşimi noktasında kritik bir değer olarak önerilebilir. MQ yorumu noktasında %5SBS'e göre değerlendirme yapılırsa düşük SBS içeriklerinde (%1-2 gibi) HL katkısı SBS azaltılmasına olanak sağlamaktadır.

Plastik deformasyon direncinin değerlendirilmesi bakımından MQ yaklaşımı seçilmiştir. %3NC oranı için MQ oranları değerlendirildiğinde, %5SBS+%3NC karışımlar, %5SBS'den büyük MQ oranları vermektedir. Diğer karışımlar ise daha düşük MQ oranı sunmaktadır. %2NC katkılı karışım seçeneklerinde, SBS+NC katkılı karışımlar MQ oranları bakımından %2NC ve %3 NC içeriklerinde doğrusal bir ilişki sunmamaktadır. Ancak, bu durum %3NC içeriği özellikle belirgin durumdadır. %2NC içeriğinde, MQ oranları kontrole ve %5SBS'e göre birçok karışım türünde daha yüksek olabilmektedir. SBS içeriğinin %5 değerinden %1-%2-%3 bölgesine çekilmesi ve NC'nin düşük örneğin %1.5-%2 gibi oranlarda kullanımının hem MQ hem de diğer seçilen performans problemleri yaklaşımları bakımından daha uygun olacağı belirtilebilir.

MQ yorumu bakımından doğrudan doğruya bir ilişki kurulamamış olsa bile, %2NC içeriğinin birçok karışımda daha yüksek ve uygun sonuçlar gösterdiği görülmektedir.

Nano-kil modifikasyonları, bitümlü bağlayıcı ve karışımların özelliklerinde kayda değer bir gelişme sağlar; Bununla birlikte, bu değişikliklerin daha büyük ölçeklerde kullanılmadan önce daha ileri çalışmaların yapılması gerekmektedir. Bu değişikliklerin gerçek ortamlarda uygulanmasından önce daha fazla çalışma yapılması gerekliliğinin temel nedeni, asıl olarak asfalt karışımlarındaki yorulmayı nasıl azalttığı ve tekerlek izi direncini nasıl arttırdığı ile ilgili sınırlı miktarda bilgidir. Çin'de nano-kalsiyum karbonat (nano-CaCO₃) ile modifiye edilen asfaltta nano-CaCO₃'ün asfaltın sıcaklık direncini (normalde oldukça düşük) ve tekerlek izine karşı direncini geliştirebileceğini belirten benzer çalışmalar yapılmıştır. Asfalt ve nano-CaCO₃ karışımı, asfaltın sıcaklığa karşı duyarlılığını iyileştiren sabit ve muntazam bir bileşim sistemi ile sonuçlanmaktadır. Bu tür gözlemlere rağmen, bu tür nano modifikasyonların asfaltın davranış ve özelliklerini değiştirdiği mekanizmaların hala sınırlı bir literatürü vardır [143-145].

Geleneksel asfalt bağlayıcı test sonuçlarının yanı sıra SBS modifiye asfalt bağlayıcılar ve nanokil polimer modifiye asfalt bağlayıcılar üzerindeki depolama stabilitesi ve dönel vizkozimetre testleri; nanokil partikülleri varlığında asfalt bağlayıcıların

performans özelliklerinde artış olduğunu ortaya koymuştur [19]. Tüm TMA karışımlarının Marshall stabilitesi ve akma parametreleri, kümülatif plastik şekil değiştirmesi, sünme rijitliği ve tekerlek izi derinliği yönünden eğilimi; Marshall testi, dinamik sünme ve Hamburg tekerlek izi testleri ile incelenmiştir. Sonuçlar, polimer modifiye asfalt bağlayıcılarla TMA karışımlarının, fiber içerenlerden daha iyi performans özelliklerine sahip olduğunu göstermektedir. Nanokil dozajları ile ilgili olarak,% 3 nanokil içeren TMA karışımları diğer karışımlara göre en iyi tekerlek izi direnci ve en az plastik deformasyona sahiptir. Polimer modifiye asfalt bağlayıcı ve %3 nanokil içeren TMA karışımının kalıcı deformasyona karşı en yüksek dirence sahip olduğu sonucuna varılabilir [19].

Closite_15A ve Nano-fill-15 nanokil malzemeleri asfalt bağlayıcı ve karışımlarla değerlendirildi. Nano-kil katkı maddeleri, sertliği, dolaylı çekme mukavemeti, esnek modülü, Marshall Stabilitesini arttırmış ve modifiye edilmiş karışımların tekerlek izi direncini arttırmıştır. Ancak, yorulma mukavemeti düşük sıcaklıklarda azalmıştır [25].

Kalıcı deformasyona ve düşük sıcaklıkta çatlamaya karşı daha az duyarlı olan bir bağlayıcı üretmek amacıyla, nanokil kompozitlerin küçük yüzdelerini saf asfaltta harmanlayarak ön testler yapıldı. Çalışma, bitümlü binderin servis sıcaklıklarında sıcaklık duyarlılığını önemli ölçüde azaltmak ve inşaat sıcaklıklarında işlenebilirliği sürdürmektir. Nano modifiye asfalt, asfalt karışımlarının tekerlek izi, çatlama ve yorulma direncini potansiyel olarak artırabilir [146].

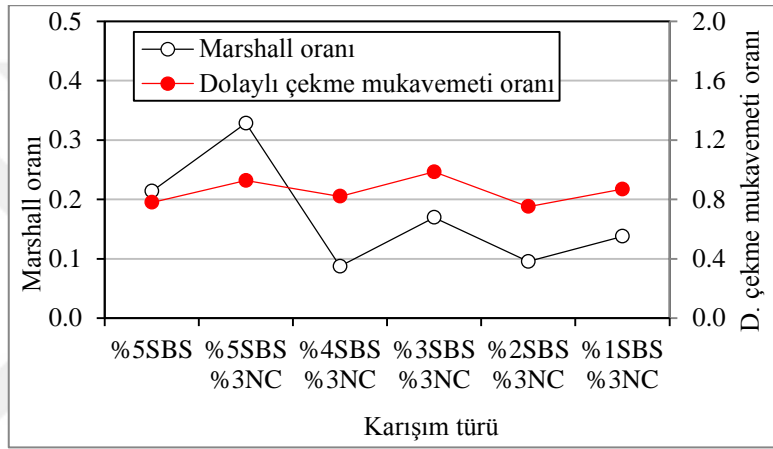
Literatürde yapılan çalışmalarla bu çalışmada elde edilen çalışmalar nanokilin asfalt karışımların çekme mukavemeti değerini arttırdığı yönünde benzerlik oluşturmaktadır.

3.4. Marshall ve Dolaylı Çekme Mukavemeti Oranlarının Karşılaştırılması

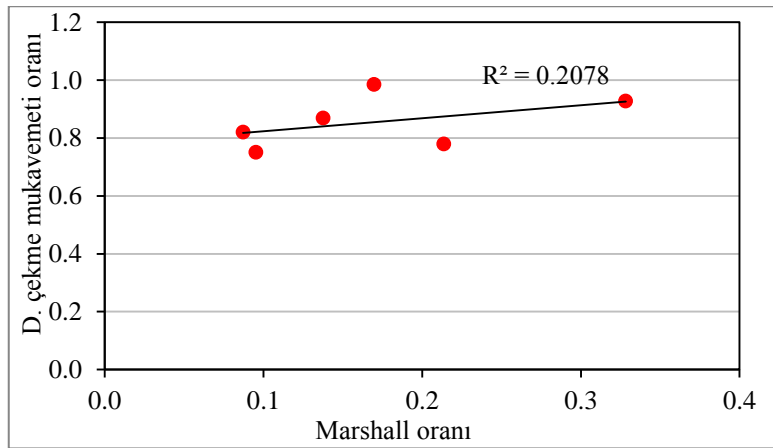
Aktif adezyon probleminin değerlendirilmesi açısından su hasarı probleminin irdelenmesi için dolaylı çekme mukavemeti oranları ile Marshall oranları karşılaştırılmıştır. Marshall oranları, herbir karışım için koşullu Marshall stabilitesinin katkısız koşulu Marshall stabilitesine oranlanmasıyla (MTR) elde edilmiştir.

Benzer şekilde tüm oluşturulan karışımlar için olmak üzere dolaylı çekme mukavemeti oranları elde edilmiştir. Herbir karışımın koşullu dolaylı çekme mukavemeti oranı katkısız karışımların koşullu mukavemet oranlarına oranlanarak ITSr oranları elde edilmiştir.

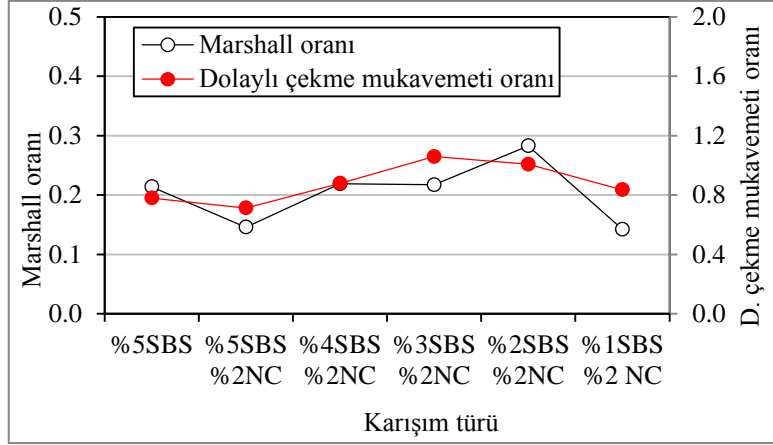
Su hasarının yorumlanması noktasında farklı deney yöntemlerinin farklı sonuçlar verebildiği değerlendirilmektedir. Bu anlamda Modified Lottman testi yaygın kabul gören bir test yöntemi olarak görülmektedir. Mekanik parametreler bakımından oransal değerlendirmeler, su hasarının değerlendirilmesinde ölçüt olarak kullanılmaktadır. Aşağıda Marshall oranları ve dolaylı çekme mukavemeti oranları şekil ve tablolar halinde sıralanmaktadır. Daha sonra değerlendirme ölçütü olarak Marshall oranı ve dolaylı çekme mukavemeti oranları arasında bir regresyon ilişkisi kurulmuş ve gerekli irdelemeler yapılmıştır (Şekil 40 – Şekil 47).



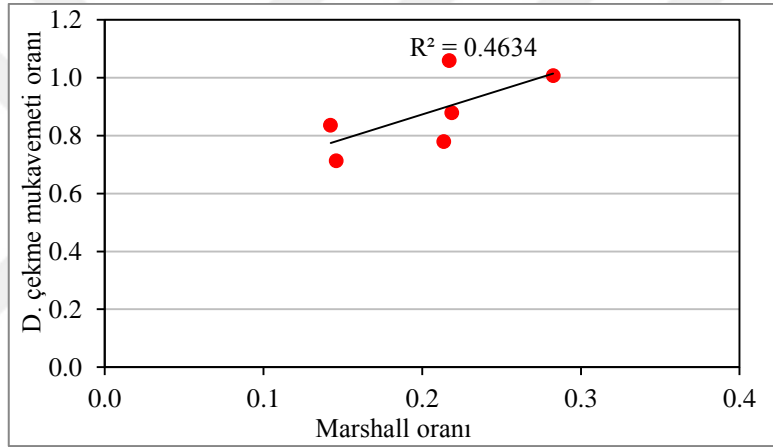
Şekil 40. %3 NC katkıli karışımlarda MQ-ITSR ilişkisi



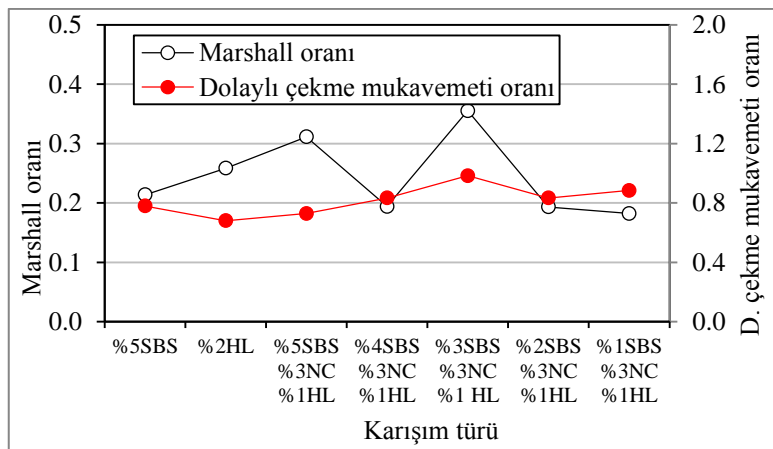
Şekil 41. %3 NC katkıli karışımlarda regresyon analizi



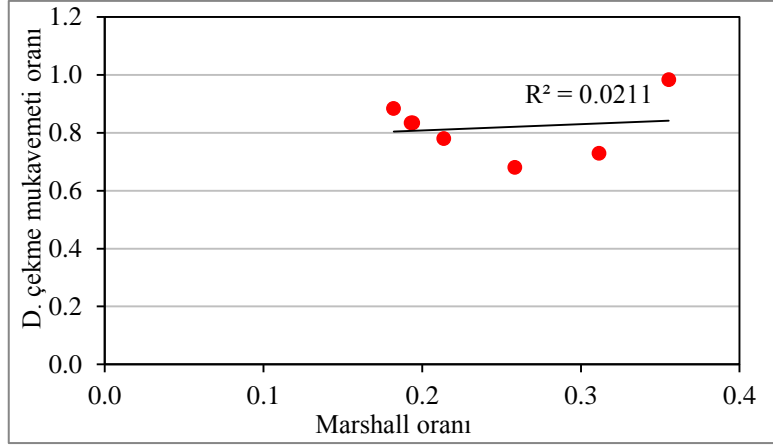
Şekil 42. %2 NC katkıli karışımlarda MQ-ITSR ilişkisi



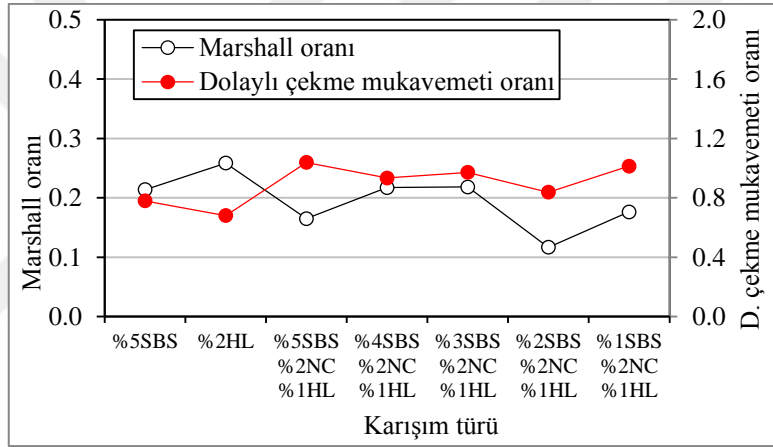
Şekil 43. %2 NC katkıli karışımlarda regresyon analizi



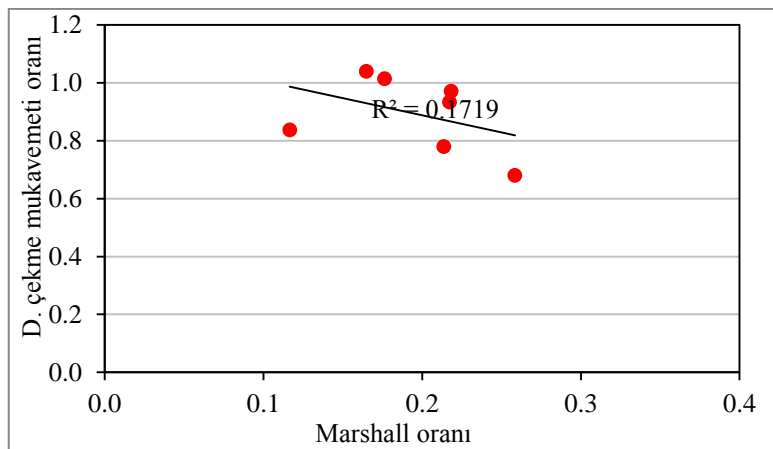
Şekil 44. %3 NC-%1 HL katkıli karışımlarda MQ-ITSR ilişkisi



Şekil 45. %3 NC-%1 HL katkıli karışımlarda regresyon analizi



Şekil 46. %2 NC-%1 HL katkıli karışımlarda MQ-ITSR ilişkisi



Şekil 47. %2 NC-%1 HL katkıli karışımlarda regresyon analizi

Azalan orandaki SBS katkılı %3NC içerikli karışımlar, azalan orandaki SBS katkılı %2NC içerikli karışımlar, azalan orandaki SBS katkılı %3NC+%1HL içerikli karışımlar ve azalan orandaki SBS katkılı %2NC+%1HL içerikli karışımların hepsinde dolaylı çekme mukavemeti oranları, Marshall oranlarından yüksek değerler vermektedir. 0.70 değerinin bir kabul kriteri olarak alınması durumunda bir karışım (%2 HL) (0.68) hariç olmak üzere tüm karışımlar kabul kriterini karşılamaktadır. Bu durum, su hasarı yorumu bakımından karışımların uyumluluğunu artırmak ve faz ayrışma probleminin önüne geçebilmek için nanokil ve sönmüş kireç kullanımının uygun olacağı anlamına gelmektedir. SBS oranının azaltılabilmesi ve bu anlamda literatürde belirtildiği üzere ekonomi sağlanması yoluna gidilebilir. SBS oranları azaltıldığında karışımda ister %2NC olsun isterse %3 NC olsun, her durumda daha yüksek ITSR oranları yani daha yüksek su hasarı direnci sunmaktadır. %2NC içeriğinin bu anlamda uygun olacağı değerlendirilmektedir.

Seçilen karışım türü gradasyon olarak taş mastik asfalt (TMA) seçilmiştir. SMS karışımlar için elde edilen Marshall oranları değerlendirildiğinde dolaylı çekme mukavemeti oranlarına göre oldukça düşük değerler söz konusudur. Marshall oranları ile dolaylı çekme mukavemeti oranları karşılaştırılmış ve regresyon ilişkisine dönüştürülmüştür. Görüldüğü üzere, su hasarı direnci bakımından Marshall oranları ile dolaylı çekme mukavemeti oranları arasında düşük regresyon söz konusudur.

Marshall Daldırma Testi, Marshall stabilitesinin ölçülen mekanik özellik olması haricinde, Daldırma-Sıkıştırma Testi ile neredeyse aynıdır. Marshall Daldırma Testinde, nem koşullandırması genellikle numuneyi 24 saat 140°F'de ıslatmak suretiyle gerçekleştirilir. Rutubet hasarı, koşullu ve koşulsuz numuneler için Marshall stabilitesinin oranına göre değerlendirilir. Ancak testin birçok varyasyonu mevcut kullanımdadır [147].

Oransal Marshall stabilitesi, Porto Riko ve diğer bazı eyaletlerde kullanılmıştır. Çeşitli kurumlar tarafından çok çeşitli test yöntemleri kullanılmaktadır. Bununla birlikte, hiçbir testin diğer testlere “üstün” olduğu kanıtlanmamıştır ve hiçbir test, tüm durumlarda neme duyarlı bir karışımı doğru bir şekilde tanımlayamaz. Bu, aksi takdirde sahada tatmin edici bir şekilde yerine getirebilecek birçok HMA karışımının, bu testler ve kriterler kullanıldığında kabul edilemez olduğu anlamına gelir. Ayrıca, bazı durumlarda zayıf karışımların kullanım için kabul edildiği anlamına da gelebilir. Bu testlerin kullanımı, birçok eyalette soyulma önleyici katkı maddelerinin kullanımının artmasına neden olmuştur. Bununla birlikte, Modifiye Lottman testinin (AASHTO T 283), HMA karışımlarındaki nem hasarını tespit etmek için mevcut olan en uygun test yöntemi olduğu

görülmektedir. Bu yöntem kullanıldığında, tipik olarak 0.70'lik bir minimum TSR önerilir. Bu kriter aynı zamanda laboratuvarında üretilen karışımlara ek olarak sahaya da uygulanmalıdır. Superpave karışım tasarım prosedürlerine AASHTO T 283 dahil edilmiştir. Son araştırmalara dayanarak, birçok eyalet tüm eyaletler için AASHTO T 283'te bir donma / çözülme döngüsünün zorunlu olması gerektiğine inanmaktadır [148, 149].

Dört katkı maddesinin, yani iki yağ amininin (Wetfix I, Lilamin VP 75P), bir katalizörün (Chemcrete) ve bir polimerin (kauçuk), asfalt karışımlarının su hasarına olan etkisi incelenmiştir. Bağlayıcıların reolojik özellikleri, hem orijinal hem de ince film fırında yaşlandırılan geleneksel yöntemler kullanılarak ölçülmüştür. Karışımların mekanik özellikleri Marshall, dolaylı çekme ve Lottman testleri ile değerlendirildi. Bu çalışmada kullanılan katkı maddeleri, asfalt karışımlarındaki neme bağlı hasar seviyesini azaltmıştır. Asfalt karışımlarında Chemcrete ve Wetfix I'in% 0,2'si ve Lilamin VP 75P'nin% 0,4-0,6'sı kullanıldığında minimum kabul edilebilir dolaylı çekme mukavemeti oranı (0.70) elde edilir. Dolaylı çekme mukavemeti oranı, kuru örneklerde elde edilen nispeten daha yüksek mukavemete göre şartlandırılmış olanlara göre azalabilir. Asfalt numunelerinin dolaylı çekme mukavemeti oranlarının Marshall Stabilite oranlarından daha az olduğu bulunmuştur [150].

SBS polimerleri, asfalt bağlayıcının tüm performans özelliklerini etkileyebilir. Önceki çalışmaya dayanarak, SBS'nin optimum içeriği asfalt bağlayıcı maddenin ağırlığına göre % 5'tir. Bu dozajda, asfalt bağlayıcı ve ilgili asfalt karışımının tüm performans özellikleri iyileştirilebilir [3, 17, 18].

Nanomalzemeler, asfalt malzemelerin fiziksel özelliklerinin artırılmasında ümit verici sonuçlar veren başka bir katkı maddesi türüdür [151].

Nano partiküllerin farklı tipleri arasında, nanokil partiküllerinin hem asfalt bağlayıcıların hem de karışımların performans özelliklerinin artırılmasında önemli etkileri vardır. Nano malzemeler, polimer modifiye asfalt materyallerde de katkı maddesi olarak kullanılmıştır [152-155].

Nanokil parçacıklarının en önemli özelliklerinden biri, yüksek uzunluktaki kalınlık oranıdır. Nanokilin tabaka yapısı, polimerlerin gücünü ve modül değerini artırır [156].

Nano- Al_2O_3 'ün TMA karışımlarının dinamik performansı üzerindeki etkileri araştırıldı. Nano- Al_2O_3 parçacıkları, temel bağlayıcıya 0.3, 0.6, 0.9 ve 1.2 oranında ilave edilirken, selüloz lifleri, karışımdaki süzülme olayını önlemek için%0.3'lük bir dozda kullanıldı. Dinamik performans durumu, dinamik sünme testi, tekerlek izi testi ve dolaylı

çekme yorulma testi ile incelenmiştir. Sonuçlar; farklı miktarlardaki nano- AL_2O_3 'ün TMA karışımlarının performans karakteristikleri üzerindeki potansiyel etkilerini değişken derecelere göstermiştir. Ekonomik konular göz önüne alındığında, %0,6 nano- AL_2O_3 içeren TMA karışımı, kaplamalarda kullanılmak üzere optimum alternatif olarak önerildi [157].

Kaplama asfalt karışımlarında farklı seviyelerde SBS ve nano- SiO_2 tozu kullanımı ile ilgili faydalar da değerlendirilmiştir. Beş farklı bitüm formülasyonunu geliştirmek için farklı oranlarda nano- SiO_2 tozu ve SBS kullanılmıştır; Hem modifiye edilmemiş hem de modifiye bitüm daha sonra Marshall örneklerini hazırlamak için kullanıldı. Test sonuçlarına göre en iyi performans, %1 nano- SiO_2 tozu ve %5 SBS ile asfalt karışımlarında gözlenmiştir [98].

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Asfalt kaplamalarda SBS polimer modifikasyonu yaygınca kullanılan bir modifikasyon yöntemidir. SBS modifikasyonu ile faz ayrışma problemlerinin giderilebilmesi noktasında son yıllarda uygulanan araştırma çalışmalarından birisi nanokillerin kullanılmasıdır. Bu amaçla nanokompozit üretimi de söz konusudur. Ayrıca, sönmüş kireç katkısı da ayrıca bir soyulma önleyici katkı olarak mütalaa edilmektedir. SBS yaygın kullanım oranı genellikle %5 oranı olarak seçilmektedir. SBS karışımların kullanım oranının azaltılabilmesi ve nanokillerle takviye edilmesi konusunun maliyet etkin bir yöntem olduğu üzerinde araştırmalar söz konusudur. Bu araştırmada SBS kullanım oranı olarak %5 oranı seçilmiş ve seçilen iki farklı nanokil oranı için (%2 ve %3 nanokil oranları) her iki seçenekte SBS kullanım oranı %1 azalma oranları ile %5-4-3-2-1 oranları için ayrı ayrı performans değerlendirmelerine tabi tutulmuştur. Nanokiller her ne kadar performans artırıcı katkılar olsa da kil türevi ürünler olmalarından dolayı, karışımda sönmüş kireç kullanımının sinerjik bir performans artırıcı olarak etki gösterebileceği değerlendirilmiştir. Dolayısıyla, %1 sönmüş kireç içeriği bütün karışımlar için ayrı bir seçenek olarak nanokil+SBS polimer seçeneklerine uygulanmıştır. Karışımlarda çok sayıda briket üretimi gerçekleştirilerek Modifiye Lottman testleri ile su hasarı, dolaylı çekme mukavemeti ile düşük sıcaklık çatlama problemi ve Marshall oranı yaklaşımı ile plastik deformasyon oluşum direnci problemleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Önemli miktardaki verilerin değerlendirilmesi ile bu araştırmadan aşağıdaki sonuçlara varmak olanaklı gözükmektedir.

1. Karışımlarda %2 ve %3 nanokil kullanım oranları için, düşük sıcaklık çatlama problemi bakımından, %1SBS, %2SBS, %3SBS kullanım oranları, sadece %5SBS modifikasyonuna benzer sonuçlar vermektedir. Nanokillerle düşük sıcaklık çatlama direnci bakımından, SBS oranlarının azaltılabilmesi mümkün olabilmektedir. Bu ayırım konusu, dolaylı çekme mukavemeti testleri ile gözlemlenebilmektedir.
2. Su hasarı probleminin Modifiye Lottman testleri ile değerlendirilmesi noktasında, gerek %2 gerekse %3 nanokil katkılı seçeneklerde, SBS oranının azaltılması ile su hasarı direncinin arttığı açıkça görülmektedir. Kanıtlanmış bir deney yöntemi olarak Modifiye Lottman testi, su hasarı direnci için Nanokil ve SBS etkileşiminde

sinerji oluştuğunu, SBS oranının azaltılabildiğini göstermektedir. Ayrıca %2 nanokil içeriği %3 nanokil içeriğine göre daha yüksek su hasarı direnci vermektedir. Bu anlamda, Modifiye Lottman Testi, katkılı seçenekler bağlamında SBS, nanokil kompozit karışımlarının performansını –ayırt edici biçimde- değerlendirebilmektedir.

3. Su hasarı probleminin değerlendirilmesinde oransal hasar değerleri kullanılmaktadır. Bu araştırmada, tüm katkılı seçeneklerde, tanımlanan tüm karışım türleri bağlamında, dolaylı çekme mukavemeti oranlarına dayanan Modifiye Lottman testi, Marshall oranlarına göre daha yüksek ve beklenen sonuçları vermektedir. Marshall oranları, seçilen taş mastik asfalt (TMA) gradasyonunda, dolaylı çekme oranlarından çok daha küçük elde edilmektedir. Marshall oranları ve dolaylı çekme mukavemeti oranları arasındaki korelasyon katsayısı düşük bulunmaktadır. Marshall deney yönteminin temsil yeteneği, su hasarı bakımından düşük bulunmuştur.
4. %2 nanokil içeriği, gerek düşük sıcaklık çatlama direnci ve su hasarı bakımından gerekse de stabilite/akma oranları bakımından %3 nanokil içeriğine göre daha iyi sonuçlar vermektedir.

Stabilite açısından değerlendirildiğinde, nanokil ve sönmüş kireç birlikteliği seçilen katkı oranları için stabilite anlamında sinerjik bir etki göstermektedir. Bu konu, nanokilin hem %3 kullanım oranı hem de %2 kullanım oranı için geçerliliğini sürdürmüştür. Buna karşın SBS önemli bir performans artırıcı katkı olduğu görülmüştür.

“Kireç nanokil katkılı karışımlarda sinerjik bir etki oluşturdu mu?” sorusunun cevabı olarak %3 NC+SBS katkılı karışımların %1HL ile modifiye edilmesi durumunda aşağıdaki değerlendirmeler yapılabilmektedir.

Stabilite/akma değerleri irdelenmiştir. %3 NC ve SBS kullanılan karışımlarda, ilave olarak sönmüş kireç katkısının kullanılması stabilite/akma oranlarını artırmaktadır. Yani MQ yaklaşımı noktasında, HL, MQ değerini artırmaktadır. %5 SBS oranının altına düşüldüğünde %3NC ilaveli karışımlarda (SBS+NC) MQ oranlarında önemli derecede performans azalması görülmektedir. Fakat SBS+NC karışımlarda %1HL ilavesi ile düşük SBS oranlarında da yüksek MQ değeri elde edilmektedir. Bu durum, HL'nin NC ile karışımda SBS azalsa bile sinerjik bir etkileşim içerisinde olduğunu göstermektedir. Aynı etki, yani HL'nin MQ üzerinde belirtilen etkisi %2 NC karışımlarda da benzer biçimde olmasına karşın %3 NC oranı için daha belirgin durumdadır. %3 NC oranı için

(SBA+NC+HL) karışımlarda daha belirgin durumdadır. MQ yorumuna göre, %3 NC oranı %1 HL etkileşimi noktasında kritik bir değer olarak önerilebilir. MQ yorumu noktasında %5 SBS'e göre değerlendirme yapılırsa düşük SBS içeriklerinde (%1-%2 gibi) HL katkısı SBS azaltılmasına olanak sağlamaktadır.

Tanımlanan karışımlara dolaylı çekme mukavemeti deneyi uygulanmış ve düşük sıcaklık çatlama probleminin değerlendirilmesi yoluna gidilmiştir. %3 NC sabit oranında SBS oranının %5 değerinden %1 değerine kadar kademeli olarak azalması durumunda, %1 HL içeriği düşük sıcaklık çatlama problemini önemli ölçüde iyileştirmektedir. Düşük sıcaklık çatlama problemi bakımından %1 HL ilavesi ile %3 NC için ve aynı zamanda %2 NC için de geçerli olmak üzere, tüm katkılı seçeneklerde yüksek çatlama dayanımı elde edilmektedir. Yani, DSC problemi noktasında, %1 HL içeriği NC'nin %2 ve %3 değerleri için etkin görülmektedir. SBS oranı, DSC noktasında maliyet sorgulamasına ilişkin olarak, oranın azaltılabileceği ve uyumun güçlendirilebileceği değerlendirilmektedir.

Modifiye Lottman testi su hasarı bakımından uygulanmıştı. %1HL içeriği, %2 ve %3 sabit NC oranları için, SBS oranlarının azaltılabilmesine, su hasarı yorumu bakımından olanak sağlamaktadır. Bütün NC katkılı azalan SBS oranlı modifiye karışımlar, %1HL ile daha yüksek su hasarı direnci vermektedir. Yani katılması zorunlu görülen NC katkısı, HL ile birlikte (%1) düşünüldüğünde su hasarı bakımından SBS oranının azaltılabileceği dile getirilmektedir. Bununla birlikte söz konusu çoklu katkı seçenekleri için Modifiye Lottman testinin ayırt edici bir deney yöntemi olarak görüldüğü açıkça ortaya çıkmaktadır.

Kireçsiz karışımlarda, nanokil oranları için en uygun polimer oranı nedir, %1, %2, %3, %4, %5 SBS oranları için en uygun polimer oranı önerilebiliyor mu? Düşük sıcaklık çatlama problemi dolaylı çekme mukavemeti testleri kireçsiz karışımlarda değerlendirildi. Bu karışımlar, kontrol karışımlar, %5SBS içerikli karışımlar, %5-4-3-2-1 azalan SBS li ve %2-3NC içerikli karışımlardır. %3NC katkılı karışımlar değerlendirildiğinde, düşük sıcaklık çatlama problemi bakımından %3-2-1SBS oranlarının yeterli olduğu görülmektedir. %2NC katkılı karışımlar değerlendirildiğinde yine %3-2-1SBS katkılı karışımların %5SBS ile benzer performans verdiği anlaşılmaktadır.

Modifiye Lottman testi ile kireçsiz karışımlarda su hasarı problemi irdelendiğinde şu çıkarımlar olanaklı gözükmemektedir. %3NC içeriğinde SBS oranı azaltılsa bile su hasarı direnci artmaktadır. Dolayısıyla SBS oranının azaltılabilmesi olanaklı görülmektedir. %2 NC oranı için yine SBS oranı azaltılsa bile su hasarı direnci artmaktadır. Düşük SBS ile

%2 NC daha yüksek su hasarı direnci göstermektedir. Bu anlamda düşük SBS daha düşük NC içeriğinin (%2) sinerjik bir yararı su hasarı bakımından gösterdiği anlaşılmaktadır. %2 NC değeri, su hasarı bakımından %3NC değerine göre çok daha uygun olarak mütalaa edilmektedir.

Plastik deformasyon direncinin değerlendirilmesi bakımından MQ yaklaşımı seçilmiştir. %3 NC oranı için MQ oranları değerlendirildiğinde, %5 SBS+%3 NC karışımlar, %5 SBS'den büyük MQ oranları vermektedir. Diğer karışımlar ise daha düşük MQ oranı sunmaktadır. %2 NC katkılı karışım seçeneklerinde, SBS+NC katkılı karışımlar MQ oranları bakımından %2 NC ve %3 NC içeriklerinde doğrusal bir ilişki sunmamaktadır. Ancak, bu durum %3 NC içeriği özellikle belirgin durumdadır. %2 NC içeriğinde, MQ oranları kontrole ve %5 SBS'e göre birçok karışım türünde daha yüksek olabilmektedir. SBS içeriğinin %5 değerinden %1-2-3 bölgesine çekilmesi ve NC'nin düşük örneğin %1.5-%2 gibi oranlarda kullanımının hem MQ hem de diğer seçilen performans problemleri yaklaşımları bakımından daha uygun olacağı belirtilebilir.

Kireçsiz karışımlarda sabit polimer oranlarında nanokil oranının artışı sonuçları performans problemleri bakımından nasıl etkilemektedir? Düşük sıcaklık çatlama direnci bakımından, kireç kullanılmayan karışımlarda, %3 NC değerine göre %2 NC değerinin seçilmesi daha mantıklı bulunmaktadır. Daha yüksek mukavemet değeri elde edilmektedir.

Su hasarı bakımından, kireç kullanılmayan karışımlarda, %3 NC değerine göre, kabul kriteri olabilen 0.70-0.80 oransal değerleri bakımından yorumlandığında, %2 NC değeri daha mantıklı bir oran olarak görülmektedir.

MQ yorumu bakımından doğrudan doğruya bir ilişki kurulamamış olsa bile, %2 NC içeriğinin birçok karışımda daha yüksek ve uygun sonuçlar gösterdiği görülmektedir.

Aktif adezyon probleminin değerlendirilmesi noktasında su hasarı probleminin irdelenmesi için dolaylı çekme mukavemeti oranları ile Marshall oranları karşılaştırılmıştır. Marshall oranları, her bir karışım için koşullu Marshall stabilitesinin katkısız koşulu Marshall stabilitesine oranlanmasıyla (MTR) elde edilmiştir. Benzer şekilde tüm oluşturulan karışımlar için olmak üzere dolaylı çekme mukavemeti oranları elde edilmiştir. Her bir karışımın koşullu dolaylı çekme mukavemeti oranı katkısız karışımların koşullu mukavemet oranlarına oranlanarak ITSR oranları elde edilmiştir.

Su hasarının yorumlanması noktasında farklı deney yöntemlerinin farklı sonuçlar verebildiği değerlendirilmektedir. Bu anlamda Modified Lottman testi yaygın kabul gören bir test yöntemi olarak görülmektedir. Mekanik parametreler bakımından oransal değerlendirmeler, su hasarının değerlendirilmesinde ölçüt olarak kullanılmaktadır.

Azalan orandaki SBS katkılı %3NC içerikli karışımlar, azalan orandaki SBS katkılı %2NC içerikli karışımlar, azalan orandaki SBS katkılı %3NC+%1HL içerikli karışımlar ve azalan orandaki SBS katkılı %2NC+%1HL içerikli karışımların hepsinde dolaylı çekme mukavemeti oranları, Marshall oranlarından yüksek değerler vermektedir. 0.70 değerinin bir kabul kriteri olarak alınması durumunda bir karışım (0.68) hariç olmak üzere tüm karışımlar kabul kriterini karşılamaktadır. Bu durum, su hasarı yorumu bakımından karışımların uyumluluğunu artırmak ve faz ayrışma probleminin önüne geçebilmek noktasında nanokil ve sönmüş kireç kullanımının uygun olacağı anlamına gelmektedir. SBS oranının azaltılabilmesi ve bu anlamda literatürde belirtildiği üzere ekonomi sağlanması yoluna gidilebilir. SBS oranları azaltıldığında karışımda ister %2NC olsun isterse %3 NC olsun, her durumda daha yüksek ITR oranları yani daha yüksek su hasarı direnci sunmaktadır. %2NC içeriğinin bu anlamda uygun olacağı değerlendirilmektedir.

Seçilen karışım türü gradasyon olarak taş mastik asfalt (TMA) seçilmiştir. TMA karışımlar için elde edilen Marshall oranları değerlendirildiğinde dolaylı çekme mukavemeti oranlarına göre oldukça düşük değerler söz konusudur. Marshall oranları ile dolaylı çekme mukavemeti oranları karşılaştırılmış ve regresyon ilişkisine dönüştürülmüştür. Görüldüğü üzere, su hasarı direnci bakımından Marshall oranları ile dolaylı çekme mukavemeti oranları arasında düşük regresyon söz konusudur.

Asfalt kaplamalarda, SBS polimer modifikasyonun yaygınca uygulandığı bilinmektedir. Bununla birlikte depolanma stabilitesi ve modifikasyonda faz ayrımı problemleri bakımından son yıllarda nanokil modifikasyonu kullanılmaya başlanmış, dizayn sürecinin bir parçası olagelmıştır. Nanokillerin kullanımı ile birlikte SBS katkıların ilave iyileşmelere ve performans artışlarına binaen kullanılan SBS oranının azaltılabileceği değerlendirilmeye başlanmıştır. Nanokompozitler önemli bir çalışma alanını bu anlamda oluşturmaktadır. Nanokillerin kil orijinli oluşu ve karışımda SBS modifikasyonu ile birlikte kullanılmaları noktasında diğer bir özgün fikir olarak SBS oranı karışımda azaltılırken beraberinde sönmüş kirecin kullanılması olmuştur. Bu anlamda %2 ve %3 nanokil içeren karışımlarda etkin ve yaygın bir oran olarak %1 sönmüş kireç içeriği de ayrıca bir faktör olarak ele alınmıştır. Modifiye Lottman testi ile su hasarının, dolaylı

çekme mukavemeti ile düşük sıcaklık çatlama probleminin ve Marshall Stabilité/Marshall akma oranı ile plastik deformasyonun araştırıldığı bu çalışmadan önemli sonuçlar elde edilmiştir. Bu sonuçlar yeni araştırma konularını öneri olarak sunma fırsatı oluşturmuştur. Yeni araştırma konuları olarak aşağıdaki öneriler sıralanabilir.

1. Asfalt karışımlarda çok farklı türde modifiye polimerler kullanılmaktadır. Seçilen çeşitli türdeki farklı nanokillerle birlikte farklı polimerik malzemeler seçilerek çalışmalar kapsamlandırılabilir. Farklı türdeki elastomerik veya plastomerik polimerlerle farklı kil orijinlerinden elde edilen nanokillerin etkileşimi sorgulanabilir. Karışımlar üzerinde gerçekleştirilecek kapsamlı deneylerle ve irdemelerle etkin nanokil ve etkin polimer oranlarına karar verilebilir. Bu çalışmada görüldüğü üzere %2 nanokil içeriğinde nanokil ve azalan SBS oranına göre performans problemleri bakımından sinerji oluşmaktadır. Farklı polimerlerle hangi nanokil türevlerinin sinerji oluşturup oluşturmadığı konuları birçok araştırmanın konusu olacaktır.

2. Bu tez kapsamında, özellikle su hasarı ve düşük sıcaklık çatlama bakımından çok sayıdaki karışım alternatifleri ile karışım testleri ile önemli sonuçlar elde edilmiştir. Kapsamın çok geniş tutulması noktasında plastik deformasyon probleminin irdelenmesi için Marshall oranı yaklaşımı kullanılmıştır. Su hasarı tekerlek izinde oturma ilişkisi hipotezi bağlamında, su hasarı direnci ile tekerlek izi oluşum direncinin paralel olduğu kabul edilebilir bu anlamda dolaylı da olsa karışımlar tekerlek izi bağlamında su hasarı verileri ile irdelenebilir. Ancak, daha ileri deney yöntemleri söz konusudur. Örneğin Fransız Tekerlek izi cihazı ya da Hamburg tekerlek izi cihazı kullanılarak ele alınan karışımların prizmatik örnekler üzerindeki tekerlek izi oluşum performansı da irdelenebilir.

3. Çalışmada koşullama sistemi olarak Modifiye Lottman koşullama sistemi uygulanmıştır. Bununla birlikte farklı su hasarı koşullandırma sistemlerine bağlı olarak karışım performansları sorgulanabilir. Modifiye Lottman testinin karışımlar üzerindeki kanıtlanmış performans yaklaşımları ile tekerlek izi testlerinin (Wheel tracking) korelasyonuna bakılabilir.

4. Araziden alınacak karotlar üzerinde çalışmalar gerçekleştirilebilir. Belirlenen karışımlar için deneme kesiti yapılarak karot örnekleri alınabilir. Bu karot örnekleri silindirik örnekler olarak farklı çaplarda olabilir. Bununla birlikte farklı kalınlıklarda dikdörtgen prizmatik örneklerde alınarak silindir sıkıştırması ve laboratuvar sıkıştırma metotları arasındaki ilişki irdelenebilir.

5. Sönmüş kireç oranı olarak bu çalışmada %1 oranı seçilmiştir. Literatürde sönmüş kireç kullanım oranının %1-2 düzeyinde de olabileceği değerlendirilmektedir. Bu bakımdan farklı sönmüş kireç içeriklerinde konu sorgulanabilir.

6. Katkıların bitümlü bağlayıcıya ya da granül agrega karışımlarına katıştırma yöntemlerine bağlı olarak performans etkileşimleri sorgulanabilir.

7. Bu araştırmada SBS kullanım oranının azaltılabileceği görülmektedir. Nanokil ilavesi ve azalan SBS oranlarına bağlı olarak sönmüş kireçli ve sönmüş kireçsiz seçeneklerde maliyet analizleri yapılarak elde edilecek performans seviyelerine ilişkin maliyet analizleri gerçekleştirilebilir.

8. Bölgesel olarak mevcut kil hammaddelerinin örneğin Ünye Bölgesi bentonitlerinin nanokil ve nanokompozit üretiminde kullanılabilmesi noktasında arge projeleri ve doktora tezleri gerçekleştirilebilir.

5. KAYNAKLAR

1. Wen, G., Zhang, Y., Zhang, Y., Sun, K., ve Fan, Y., Rheological Characterization of Storage Stable SBS-Modified Asphalts, Polym Testing 21,3 (2002) 295-302.
2. Golestani, B., Nejad, F.M. ve Galooyak, S.S., Performance Evaluation of Linear and Nonlinear Nanocomposite Modified Asphalts, Construction and Building Materials, 35, (2012) 197-203.
3. Galooyak, S.S., Dabir, B., Nazarbeygi, A.E. ve Moeini, A., Rheological Properties and Storage Stability of Bitumen/SBS/Montmorillonite Composites, Construction and Building Materials, 24,3 (2010) 300-307.
4. Pinnavaia, T.J. ve Beall, G.W., Polymer-clay Nanocomposites, England: John Wiley and Sons Ltd, ISBN 978-0-471-63700-4, 2000.
5. Paul, D.R. ve Robeson, L.M., Polymer Nanotechnology: Nanocomposites, Polymer, 49,15 (2008),3187-3204.
6. Ray S.S ve Okamoto M., Polymer/layered Silicate Nanocomposites: A Review From Preparation to Processing, Progress in Polymer Science, 28,11 (2003) 1539-1641.
7. Yang, J. ve Tighe, S., A Review of Advances of Nanotechnology in Asphalt Mixtures, Procedia – Social and Behavioral Sciences, 96,6 (2013) 1269-1276.
8. You, Z., Mills-Beale, J., Foley, J.M., Roy, S., Odegard, G.M., Dai, Q. ve Goh, S.W., Nanoclay Modified Asphalt Materials: Preparation and Characterization, Construction and Building Materials, 25,2 (2011) 1072-1078.
9. Yusoff, N.I.M., Breem, A.A.S., Alattug, H.N. ve Hamim, A., The Effects of Moisture Susceptibility and Ageing Conditions on Nano-Silica/Polymer-Modified Asphalt Mixtures, Construction and Building Materials, 72,15 (2014) 139-147.
10. Hamed, G.H., Nejad, F.M. ve Oveisi, K., Estimating the Moisture Damage of Asphalt Mixture Modified with Nano Zinc Oxide, Materials and Structures, (2015) 1-10.
11. Diab, A. ve You Z., Effects of Regular-Sized and Nanosized Hydrated Lime on Binder Rheology and Surface Free Energy of Adhesion of Foamed Warm Mix Asphalt, Journal of Materials in Civil Engineering, 27,9 (2014) 1-7.
12. Hossain, Z., Zaman, M., Hawa, T. ve Saha, M.C., Evaluation of Moisture Susceptibility of Nanoclay-Modified Asphalt Binders Through the Surface Science Approach, Journal of Materials in Civil Engineering, 27,10 (2014) 1-9.

13. Shahabadi, A.Z., Shokuhfar, A. ve Nejad, S.E., Preparation and Rheological Characterization of Asphalt Binders Reinforced with Layered Silicate Nanoparticles, Construction and Building Materials, 24,7 (2010) 1239-1244.
14. Liu, G. van de Ven, M., Wu, S. Yu, J. ve Molenaar, A., Influence of Organomontmorillonites on Fatigue Properties of Bitumen and Mortar, Construction and Building Materials, 33,12 (2011) 1574-1582.
15. Yao, H., You, Z., Li, L., Goh, S., Mills-Beale, J., Shi, X. ve Wingard, D., Evaluation of Asphalt Blended with Low Percentage of Carbon Micro-Fiber and Nanoclay, Journal of Testing and Evaluation, 41,2 (2013) 1-11.
16. Shafabakhsh, G.H., Mirabdolazimi, S.M. ve Sadeghnejad, M., Evaluation the Effect of Nano-TiO₂ on the Rutting and Fatigue Behavior of Asphalt Mixtures, Construction and Building Materials, 54 (2014) 566-571.
17. Mokhtari, A. ve Nejad, F.M., Mechanistic Approach for Fiber and Polymer Modified SMA Mixtures, Construction and Building Materials, 36 (2012) 381-390.
18. Ghasemi, M. ve Marandi, S.M., Engineering Properties of SMA Mixtures/Polymer/RGP Blends, Int. J. Transp. Eng., 2,2 (2014) 97-106.
19. Ameri, M., Mohammadi, R., Vamegh, M. ve Molayem, M., Evaluation the Effects of Nanoclay on Permanent Deformation Behavior of Stone Mastic Asphalt Mixtures, Construction and Building Materials, 156 (2017) 107-113.
20. Pamplona TF et al., Asphalt Binders Modified by SBS and SBS/Nanoclays: Effect on Rheological Properties, Journal of The Brazilian Chemical Society, 23,4, (2012) 639-647.
21. Ahmed, R. ve Nehal, S., Nanocomposite Materials Based on Montmorillonite Clay Intercalated into Pristine Polyurethane, Material Science and Engineering A, 399, (2005) 368-376.
22. Fu, H., Leidong, X., Ming, Y. ve Yao, S. Construction and Building Materials, 21 (2007) 1528.
23. Wang, S., Zhang, Y. ve Zhang, YK., Polymers and Polymer Composites, 11,6 (2003) 477.
24. Polacco, G., Kriz, P. ve Filippi, S., et al., European Polymer Journal, 44,11 (2008) 3512.
25. Jahromi, S.G., Andalibizade, B. ve Vossough, S., Engineering Properties of Nanoclay Modified Asphalt Concrete Mixtures, Arabian Journal for Science & Engineering 35, (2010) 89-103.

26. Sureshkumar, M.S., Filippi, S., Polacco, G., Kazatchkov, I., Stastna, J. ve Zanzotto, L., Internal Structure and Linear Viscoelastic Properties of EVA/Asphalt Nanocomposites, European Polymer Journal, 46, 4 (2010) 621-633.
27. Xiao, F., Amirkhanian, A.N. ve Amirkhanian, S.N., Influence on Rheological Characteristics of Asphalt Binders Containing Carbon Nanoparticles, Journal of Materials in Civil Engineering, 23, (2011) 423-431.
28. Taiyu Vietnam Co., Ltd, Tough Fix Hyper For Anti – Stripping; Vietnam, Room 302, 3rd Floor, 101 Lang Ha Building, Lang Ha Ward, Dong Da District, Hanoi.
29. Opal Paints Products Pvt.Ltd (OPAL), Bitumen Additive Specialist, A-48 Sector 10, Noida (U.P) 201301.
30. Haghshenas, H.F., Khodaii, A., Khedmati, M. ve Tapkin, S., A Mathematical Model for Predicting Stripping Potential of Hot Mix Asphalt, Construction and Building Materials, 75 (2015) 488-495.
31. Nazirizad, M., Kavussi, A. ve Abdi, A., Evaluation of the Effects of Anti-Stripping Agents on the Performance of Asphalt Mixtures, Construction and Building Materials, 84 (2015) 348–353.
32. Gandhi, T., Xiao, F. ve Amirkhanian, S.N., Estimating Indirect Tensile Strength of Mixtures Containing Anti-Stripping Agents Using An Artificial Neural Network Approach, International Journal of Pavement Research and Technology, 2,1 (2009) 1-12.
33. Amelian, S., Abtahi, S.M. ve Hejazi, S.M., Moisture Susceptibility Evaluation of Asphalt Mixes Based on Image Analysis, Construction and Building Materials, 63 (2014) 294-302.
34. Lin, J., Chen, M. ve Shaopeng, W., Utilization of Silicone Maintenance Materials to Improve Moisture Sensitivity of Asphalt Mixtures, Construction and Building Materials, 33 (2012) 1-6.
35. Asphalt Institute, Mix Design Methods for Asphalt Concrete, Manual Series No:2 USA, 6th ed., 1993.
36. Mehrara, A. ve Khodaii, A., A Review of State of the Art on Stripping Phenomenon in Asphalt Concrete, Construction and Building Materials, 38 (2013) 423–442.
37. Kerh, T., Wang, Y-M. ve Lin, Y., Experimental Evaluation of Anti-Stripping Additives Mixing in Road Surface Pavement Materials, American Journal of Applied Sciences, 2,10 (2005) 1427-33.
38. Anderson, D. ve Dukatz, E., The Effect of Anti-Strip Additives on the Properties of Asphalt Cement, Assoc Asphalt Paving Technol, 51 (1982) 298-317.

39. Ford, M.C., Manke, P.G. ve O'Bannon, C.E., Quantitative Evaluation of Stripping by Surface Reaction Test, TRR, 515 (1973) 40-54.
40. Kiggundu, B.M. ve Roberts, F.L., Stripping of in HMA Mixtures: State of Art and Critical Review of Test Methods, NCAT Report No. 88-2, 1998.
41. Lin, D.F., Lin, C.D. ve Cheng, G.F., Rutting Evaluation and Prevention for Asphalt Concrete Pavement. Proceedings of the Conference on Asphalt Concrete Road Surface and Material Characteristics, Taiwan, 1994, 395-410.
42. Tunnicliff, D.G. ve Root, R.E., Use of Anti-Stripping Additives in Asphaltic Concrete Mixtures, NCHRP Report, No. 274, 1984.
43. Lottman, R.P., Laboratory Test Method for Predicting Moisture Induced Damage to Asphalt Concrete, Transportation Research Record, 843 (1983) 88-95.
44. Kim, Y.R., Pinto, I. ve Park, S.W., Experimental Evaluation of Anti-Stripping Additives in Bituminous Mixtures through Multiple Scale Laboratory Test Results, Construction and Building Materials, 29 (2012) 386-93.
45. Hunter, E.R., Evaluating Moisture Susceptibility of Asphalt Mixes, MPC report. WY: University of Wyoming, 2001.
46. Xiao, F. ve Amirkhanian, S.N., Laboratory Investigation of Moisture Damage in Rubberized Asphalt Mixtures Containing Reclaimed Asphalt Pavement, International Journal of Pavement Research and Technology, 10,5 (2009) 319-28.
47. Lu, Q. ve Harvey, J.T., Laboratory Evaluation of Long-Term Effectiveness of Antistripping Additives, TRR, 1970 (2007) 14-24.
48. Law, E.W., Anti-stripping Agent for Roads Compound for Bituminous Pavements, Department of Civil Engineering, National University of Singapore, 1995.
49. Taylor, M.A. ve Khosla, N.P., Stripping of Asphalt Pavements: State of the Art, Transportation Research Board, Washington, D.C., 1983.
50. Solaimanian, M., Kennedy, T.W. ve Elmore, W.E., Long-Term Evaluation of Stripping and Moisture Damage in Asphalt Pavements Treated With Lime and Anti-Stripping Agents Report CTR 0-1286-1F, TxDOT, University of Texas, Austin, TX, 1993.
51. Little, D.N. ve Epps, J.A., The Benefits of Hydrated Lime in Hot Mix Asphalt, The Versatile Chemical, National Lime Association, Arlington, Virginia, 2001.
52. Solaimanian, M., Harvey, J., Tahmoressi, M. ve Tandon, V., Test Methods to Predict Moisture Sensitivity of Hot-Mix Asphalt Pavements, Moisture Sensitivity of Asphalt Pavements: A National Seminar, San Diego, California, 2003.

53. Al-Qadi, I.L., Abuawad, I.M., Dhasmana, H., Coenen, A.R. ve Trepanier, J.S., Effects of Various Asphalt Binder Additives/Modifiers on Moisture-Susceptible Asphaltic Mixtures, Research Report FHWA-ICT-14-004, University of Illinois, Urbana, 2014.
54. Yin, F., Arambula, E., Lytton, R., Martin, A.E. ve Cucalon, L.G., Novel Method for Moisture Susceptibility and Rutting Evaluation Using Hamburg Wheel Tracking Test, J. Transp. Res. Board, 2446 (2014) 1–7.
55. Walubita, L.F., Faruk, A.N.M., Zhang, J., Lee, S.I. ve Simate, G.S., The Hamburg Rutting Test: Alternative Data Analysis Methods and HMA Screening Criteria, 95th TRB Annual Meeting, Washington D.C., 2016.
56. Podolsky, J.H., Buss, A., Williams, R.C., Cochran, E.W., The Rutting and Stripping Resistance of Warm and Hot Mix Asphalt Using Bio-Additives, Construction and Building Materials, 112 (2016) 128-139.
57. Abandansari, H.F. ve Modarres, A., Investigating Effects of Using Nanomaterial on Moisture Susceptibility of Hot-Mix Asphalt Using Mechanical and Thermodynamic Methods, Construction and Building Materials, 131 (2017) 667-675.
58. Fakhri, M. ve Hosseini, S.A., Laboratory Evaluation of Rutting and Moisture Damage Resistance of Glass Fiber Modified Warm Mix Asphalt Incorporating High RAP Proportion, Construction and Building Materials, 134 (2017) 626–640.
59. Nesichi, S. ve Ishai, I., A Modified Method for Predicting Reduced Asphaltic Pavement Life from Moisture Damage, J Assoc Asphalt Pav Technol (AAPT), 55 (1986) 149–75.
60. Lottman, R.P., Predicting Moisture-Induced Damage to Asphaltic Concrete-Field Evaluation Phase, Transportation Research Board, National Cooperative Highway Research Program Interim Report No. ITD-RP081, 1982.
61. Kim, Y.R., Zhang, J. ve Ban, H., Moisture Damage Characterization of Warm-Mix Asphalt Mixtures Based on Laboratory-Field Evaluation, Construction and Building Materials, 31 (2012) 204-211.
62. Ghabchi, R., Singh, D. ve Zaman, M., Evaluation of Moisture Susceptibility of Asphalt Mixes Containing RAP and Different Types of Aggregates and Asphalt Binders Using the Surface Free Energy Method, Construction and Building Materials, 73 (2014) 479-489.
63. Buss, A., Christopher, W.R. ve Schram, S., Evaluation of Moisture Susceptibility Tests for Warm Mix Asphalts, Construction and Building Materials, 102 (2016) 358-366.

64. Hicks, R.G., NCHRP Synthesis of Highway Practice 175: Moisture Damage in Asphalt Concrete, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 1991.
65. Kringos, N., Scarpas, A., Copeland, A. ve Youtcheff, J., Modelling of Combined Physical–Mechanical Moisture-Induced Damage in Asphaltic Mixes: Part 2. Moisture Susceptibility Parameters, International Journal of Pavement Research and Technology, 9, 2 (2008) 129-151.
66. Baldi-Sevilla, A., Aguiar-Moya, J.P., Vargas-Nordbeck, A. ve Loria-Salazar, L., Effect of Aggregate–Bitumen Compatibility on Moisture Susceptibility of Asphalt Mixtures, Road Mater. Pavement Des., 18 (Suppl. 2) (2017) 318-328.
67. Yan, K., Ge, D., You, L. ve Wang, X., Laboratory Investigation of the Characteristics of SMA Mixtures under Freeze–Thaw Cycles, Cold Regions Science and Technol., 119 (2015) 68–74.
68. Bagampadde, U. ve Kiggundu, B.M., Influence of Truck Load Channelization on Stripping in Asphalt Mixtures, Constr. Build. Mater., 21, 8 (2007) 1628-1635.
69. Canestrari, F., Cardone, F., Graziani, A., Santagata, F.A. ve Bahia, H.U., Adhesive and Cohesive Properties of Asphalt-Aggregate Systems Subjected to Moisture Damage, Road Mater. Pavement Des., 11 (Suppl.1) (2011) 11-32.
70. Hesami, E. ve Mehdizadeh, G., Study of the Amine-Based Liquid Anti-Stripping Agents by Simulating Hot Mix Asphalt Plant Production Process, Construction and Building Materials, 157 (2017) 1011-1017.
71. Arabani, M., Roshani, H. ve Hamedi, G.H., Estimating Moisture Sensitivity of Warm Mix Asphalt Modified with Zycosoil as An Antistrip Agent Using Surface Free Energy Method, Journal of Materials in Civil Engineering, 24, 7 (2012) 889-897.
72. Xiao, F., Zhao, W., Gandhi, T. ve Amirkhanian, S.N., Influence of Antistripping Additives on Moisture Susceptibility of Warm Mix Asphalt Mixtures, Journal of Materials in Civil Engineering, 22 (2010) 1047–1055.
73. Park, D.W., Seo, W.J., Kim, J. ve Vo, H.V., Evaluation of Moisture Susceptibility of Asphalt Mixture Using Liquid Anti-Stripping Agents, Construction and Building Materials, 144 (2017) 399-405.
74. Zheng, C.F., Qin, Y., Lv, D., Zhang, T., Liu, X.Y. ve Zheng, S., Effects of Anti-Stripping Agents on the Microscopic Strength of Mineral Aggregate Contact Surface, , Construction and Building Materials, 49 (2013) 627-634.
75. Xiao, F. ve Amirkhanian, S.N., Effects of Liquid Antistrip Additives on Rheology and Moisture Susceptibility of Water Bearing Warm Mixtures, Construction and Building Materials, 24 ,9 (2010) 1649-1655.

76. Selvaratnam, S., Zaman, M. ve Laguros, G., Laboratory Evaluation of Unmodified and Polymer-Modified Performance-Grade Binders with Anti-Stripping Additives, J. Eng. Comput. Archit., 1, 2 (2007) 1934-7197.
77. Hossain, Z., Zaman, M. ve Kenneth, R.H., Effects of Liquid Anti-Stripping Additives on Rheological Properties of Performance Grade Binders, Int. J. Pavement Res. Technol., 3, 4 (2010) 160-170.
78. Hossain, Z., Zaman, M., Wasiuddin, N.M., Sneed, J. ve O'Rear, E.A., Rheological Evaluation of Warm Mix and Anti-Stripping Additives Modified Performance Grade Binders, Road Mater. Pavement Des., 12, 4 (2011) 875-895.
79. Hossain, Z., Zaman, M., O'Rear, E.A. ve Chen, D.H., Effectiveness of Water-Bearing and Anti-Stripping Additives in Warm Mix Asphalt Technology, Int. J. Pavement Eng., 13, 5 (2012) 424-432.
80. Watson, D., et al., Effectiveness of Antistrip Agents in Asphalt Mixtures, Transp. Res. Rec., 2370,1 (2013) 128-136.
81. Gorkem, C. ve Sengoz, B., Predicting Stripping and Moisture Induced Damage of Asphalt Concrete Prepared with Polymer Modified Bitumen and Hydrated Lime, Construction and Building Materials, 23, 6 (2009) 2227-2236.
82. Sebaaly, P.E., et al., Impact of Lime and Liquid Antistrip Agents on Properties of Idaho Hot-Mix Asphalt Mixture, Transp. Res. Rec., 1998,1 (2007) 65-74.
83. Tayebali, A.A., Knappe, D.R ve Mandapaka, V.L., Effect of Prolonged Heating on The Asphalt-Aggregate Bond Strength of HMA Containing Liquid Anti-Strip Additives, 2008, 1-15.
84. Putman, B.J. ve Amirkhanian, S.N., Laboratory Evaluation of Anti-Strip Additives in Hot Mix Asphalt, Final Report, Report No. FHWA-SC-06-07, SCDOT and Clemson University, 2006.
85. Xiong, P., Hao, P.W. ve Gao, C.M., Pavement Performance of SBS Modified Asphalt, J. Chang'an Univ. (Nat. Sci. Ed.), 25, 1 (2005) 10-19.
86. Yilmaz, M. ve Çeloğlu, M.E., Effects of SBS and Different Natural Asphalts on the Properties of Bituminous Binders and Mixtures, Construction and Building Materials, 44 (2013) 533-540.
87. Li, R.X., Karki, P., Hao, P.W. ve Bhasin, A., Rheological and Low Temperature Properties of Asphalt Composites Containing Rock Asphalt, Construction and Building Materials, 96 (2015) 47-54.
88. Huang, W.D., Zheng, M. ve Huang, M., Fatigue Performance Comparison of Various Kind of Asphalt Mixture, J. Build. Mater., 18, 6 (2015) 1089-1094.

89. Kök, B.V., Yılmaz, M. ve Guler, M., Evaluation of high temperature performance of SBS + Gilsonite modified binder, *Fuel*, 90 (2011) 3093-3099.
90. Yang, K. ve Liu, D., Research on Performance of Trinidad Lake Asphalt Added with SBS-modified Asphalt Mixture, *J. Highway Trans. Res. Dev.*, 33,7 (2015) 28-32.
91. Polacco, G., Kriz, P., Filippi, S. ve Zanzotto, L., Rheological Properties of Asphalt/SBS/ Clay Blends, *Eur. Polymer Journal*, 44, 11 (2008) 3512-3521.
92. Sun, P., Han, S., Zhang, H.L., Wang, Z.Y. ve Xu, O.M., High-temperature Performance of Nano-CaCO₃/SBS Modified Asphalt Mixture, *Mater. Rev.*, 30, 4 (2016) 122-126.
93. Sun, L., Xin, X.T. ve Ren, J.L., Asphalt Modification Using Nano-Materials and Polymers Composite Considering High and Low Temperature Performance, *Construction and Building Materials*, 133 (2017) 358–366.
94. Goh, S.W., Akin, M., You, Z. ve Shi, X., Effect of Deicing Solutions on the Tensile Strength of Micro- or Nano-Modified Asphalt Mixture, *Construction and Building Materials*, 25, 1 (2011) 195-200.
95. Jahromi, S.G. ve Khodaii, A., Effects of Nanoclay on Rheological Properties of Bitumen Binder, *Construction and Building Materials*, 23, 8 (2009) 2894-2904.
96. You, Z., Mills-Beale, J., Foley, J.M., Roy, S., Odegard, G.M., Dai, Q. et al., Nanoclay Modified Asphalt Materials: Preparation and Characterization, *Construction and Building Materials*, 25, 2, (2011) 1072-1078.
97. Cheng, J., Shen, J ve, Xiao, F., Moisture Susceptibility of Warm-Mix Asphalt Mixtures Containing Nanosized Hydrated Lime, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23, 11, (2011) 1552-1559.
98. Ghasemi, M., Marandi, S.M., Tahmooresi, M., Kamali, R.J.1 ve Taherzade, R. Modification of Stone Matrix Asphalt With Nano-Sio₂, *J Basic Appl Sci Res*, 2, 2 (2012) 1338-1344.
99. You, Z., Nanomaterials in Asphalt Pavements, *International Journal of Pavement Research and Technology*, 6, 3 (2013) IV-V.
100. Road Engineering Solutions, Integra Base & Nanotechnology: Modifying Asphalt on a Molecular Level, November 12, 2008, 20801 N. 90th Place Suite 201 Scottsdale, www.resperion.com. 1 Temmuz 2015.
101. Van de Ven, M.F.C., Besamusca, J. ve Molenaar, A.A.A., Nanoclay for Binder Modification of Asphalt Mixtures, *Advanced Testing and Characterization of Bituminous Materials*, Two Volume Set, Chapter 14, 2009.

102. Özen, İ., Çetin, P., Uçar, T. ve Menciloğlu, Y.Z., Organokil Üretimi ve Karakterizasyonu, Eczacıbaşı Esan/Sabancı Üniversitesi Kil Raporu, Sabancı Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Programı, 1 Ağustos 2009.
103. Polacco, G., Kriz, P., Filippi, S., Stastna, J., Biondi, D. ve Ludovit, Z., Rheological Properties of Asphalt/SBS/clay Blends, European Polymer Journal, 44, (2008) 3512-3521.
104. Mittal, A., Jain, P.K., Sengupta, J.B. Ganvir Di. V., New and Emerging Road Technologies for Future: New Building Materials & Construction World NBM & CW,. <http://search.proquest.com.proxy.lib.uwaterloo.ca/docview/1038935755>. 09.10.2018
105. Shaopeng, W.U., Jingang, W. ve Liu, J., Preparation and Fatigue Property of Nanoclay Modified Asphalt Binder, Key Laboratory of Silicate Materials, Science and Engineering of Ministry of Education, Wuhan University of Technology, Wuhan City, China, 978-1-4244-7739-5/10, 2010.
106. Saeed, G.J., Behrooz, A. ve Shahram, V., Engineering Properties of Nanoclay Modified Asphalt Concrete Mixtures, The Arabian Journal for Science and Engineering, 35, 1B (2010).
107. Chen, J.S., Liao, M.C. ve Tsai, H.H., Evaluation and Optimization of the Engineering Properties of Polymer-Modified Asphalt, Practical Failure Analysis, 2 (2002) 75-83.
108. Piotr, R., Modified Asphalt Mixtures Resistance to Permanent Deformations, Journal of Civil Engineering and Management, 13, 4 (2007) 307-315.
109. Yasmin, A., Luo, J.J., Abot, J.L. ve Daniel, I.M., Mechanical and Thermal Behavior of Clay/Epoxy Nanocomposites at Room and Elevated Temperatures, Proceedings of ASC, 18th Annual Technical Conference, 2003.
110. National Lime Association, Lime-The Versatile Chemical, FACT SHEET: Hydrated Lime – A Solution for High Performance Hot Mix Asphalt, November 2006, page 4.
111. Hicks, R. G. ve Todd, V.S., Life Cycle Costs for Lime in Hot Mix Asphalt, Report & Software, 2001.
112. Bari, J. ve Witczak, M.W., Evaluation of the Effect of Lime Modification on the Dynamic Modulus Stiffness of HMA Use with the New Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1929, (2005) 10-19.
113. Petersen, J.C., Plancher, H. ve Harnsbergen, P.M., Lime Treatment of Asphalt to Reduce Age Hardening and Improve Flow Properties, Proceedings, AAPT, 56, 1987.

114. Khan, S., Nagabhushana, M.N., Tiwari, D. ve Jain, P.K., Rutting in Flexible Pavement: An Approach of Evaluation with Accelerated Pavement Testing Facility, Procedia - Social and Behavioral Sciences, 104 (2013) 149-157.
115. Walker, D. (Ed.). (n.d.). Understanding asphalt pavement distresses – five distresses explained. <http://asphaltmagazine.com/understandingasphalt-pavement-distresses-five-distresses-explained/> 8 Şubat 2018.
116. Smith, M., Contact Us | Allied Paving Equipment Magazine - The Information Source for the Paving & Pavement Maintenance Industry. <http://callape.com/issue/november-2016/section/contact-us> 9 Şubat 2018.
117. Akbulut, H., Güreç, C., Çetin, S. ve Elmacı, A., Investigation of Using Granite Sludge as Filler in Bituminous Hot Mixtures, Construction and Building Materials, 36 (2012) 430-436.
118. Bostancıoğlu, M. ve Oruç, S., Effect of Activated Carbon and Furan Resin on Asphalt Mixture Performance, Road Mater. Pavement Des., (2015) 1-4.
119. Yılmaz, M., Kök, B.V. ve Kuloglu, N., Effects of Using Asphaltite as Filler on Mechanical Properties of Hot Mix Asphalt, Construction and Building Materials, 25, 11 (2011) 4279–4286.
120. Arabani, M. ve Tahami, S.A., Assessment of Mechanical Properties of Rice Husk Ash Modified Asphalt Mixture, Construction and Building Materials, 149 (2017) 350-358.
121. Tapkın, S., Improved Asphalt Aggregate Mix Properties by Portland Cement Modification, Master Thesis, Middle East Technical University, Civil Engineering Department, Turkey, 1998.
122. Kuloglu, N., Effect of Astragalus on Characteristics of Asphalt Concrete, Journal Of Materials in Civil Engineering, 11, (1999) 283-286.
123. Nijboer, L.W., Some Considerations of the Marshall Test Method for Investigating Bituminous Masses, Strasse Autobahn, (1957) 210-214.
124. Haddadi, S., Ghorbel, E. ve Laradi, N., Effects of the Manufacturing Process on the Performances of the Bituminous Binders Modified with EVA, Constr. Build. Mater., 22 (2008) 1212-1219.
125. Tayfur, S., Ozen, H. ve Aksoy, A., Investigation of Rutting Performance of Asphalt Mixtures Containing Polymer Modifiers, Construction and Building Materials, 21, 2 (2007) 328-37.
126. Masoudi, S., Abtahi, S.M. ve Goli, A., Evaluation of Electric Arc Furnace Steel Slag Coarse Aggregate in Warm Mix Asphalt Subjected to Long-Term Aging, Construction and Building Materials, 135 (2017) 260-266.

127. IS 73, Paving Bitumen —Specification (Fourth Revision), Bureau of Indian Standards, New Delhi, 2013.
128. Swamy, A.K., Matolia, V. ve Ramana, G.V., Use of Angle of Repose of Aggregates as An Indicator of Asphalt Concrete Properties, Construction and Building Materials, 168 (2018) 849-857.
129. Hussein, A., Gibreil, A. ve Feng, C.P., Effects of High-Density Polyethylene and Crumb Rubber Powder as Modifiers on Properties of Hot Mix Asphalt, Construction and Building Materials, 142 (2017) 101-108.
130. Korea Standard (KS) F 2398, Testing Method for Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture Induced Damage, Korea Technology Center, Seoul, Korea, 2012.
131. <https://www.materialdatacenter.com/ms/en/Kraton%20D/Kraton+Polymers/Kraton+D11101+ASM/d8ef228e/1413> 15 Ağustos 2018.
132. Lu, X. ve Isacson, U., Laboratory Study on the Low Temperature Physical Hardening of Conventional and Polymer Modified Bitumens, Construction and Building Materials, 14, 4 (2000) 79-88.
133. Navarro, F.J., Partal, P., Martinez-Boza, F., Valencia, C. ve Gallegos, C., Rheological Characteristics of Ground Tire Rubber-Modified Bitumens, Chemical Engineering Journal, 89, (2002) 53-61.
134. Aglan, H., Othman, A., Figueroa, L. ve Rollings, R., Effect of Styrene-Butadiene-Styrene Block Copolymer on Fatigue Crack Propagation Behavior of Asphalt Concrete Mixtures, Transportation Research Record, 1417, (1993) 178-186.
135. Khattak, M. J. ve Baladi, G.Y., Engineering Properties of Polymer – Modified Asphalt Mixtures, Transportation Research Record, 1638, (1998) 12-22.
136. İskender, C., Cam Agrega Boyutu ve Agrega Gradasyonunun Asfalt Kaplama Performansına Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2017.
137. Asphalt Task Force, Hydrated Lime: A Proven Additive for Durable Asphalt Pavements, Critical Literature Review, European Lime Association, 2010.
138. İskender, E., Evaluation of Mechanical Properties of Nano-Clay Modified Asphalt Mixtures, Measurement, 93, (2016) 359-371.
139. KTŞ, Karayolu Teknik Şartnamesi, Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara, 2013.

140. Afonso, M.L., Dinis-Almeida, M. ve Fael, C.S., Study of the Porous Asphalt Performance with Cellulosic Fibres, Construction and Building Materials, 135 (2017) 104-111.
141. AASHTO T 283-03., Standard Method of Test for Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., 2014.
142. Abdullah, M.E., Zamhari, K.A., Hainin, M.R., Oluwasola, E.A., Yusoff, N.I. ve Hassan, N.A., High Temperature Characteristics of Warm Mix Asphalt Mixtures with Nanoclay and Chemical Warm Mix Asphalt Modified Binders, Journal of Cleaner Production, 122 (2016) 326-334.
143. Ghile, D.B., Effects of Nanoclay Modification on Rheology of Bitumen and on Performance of Asphalt Mixtures, Master Thesis, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands, 2006.
144. Liu, D.L., Yao, H.B. ve Bao, S.Y., Performance of Nano-Calcium Carbonate and SBS Compound Modified Asphalt, *Zhongnan Daxue Xuebao (Ziran Kexue Ban)/J. Cent. South Univ. (Sci. Technol.)*, 38, 3 (2007) 579-582.
145. Ma, F., Zhang, C. ve Fu, Z., Performance and Modification Mechanism of Nano-CaCO₃ Modified Asphalt, *Wuhan Ligong Daxue Xuebao Jiaotong Kexue Yu Gongc Ban*, 2007.
146. Robert, F.L., Kandhal, P.S., Brown, E.R., Dah, Y.L. ve Kennedy, T.W., Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design and Construction, second ed., NAPA Education Foundation, Lanham, Maryland, 1996, 248-485.
147. Tunnicliff, D.G. ve Root, R.E., Antistripping Additives in Asphalt Concrete-- State-of-the-Art, Paper Presented at 51st Annual Meeting, Assoc. of Asphalt Paving Technologists, Kansas City, MO, Feb., 1982.
148. Epps, J.A., Sebaaly, P.E., Penaranda, J., Maher, M.R., McCann, M.B. ve Hand, A.J., Compatibility of a Test for Moisture-Induced Damage with Superpave Volumetric Mix Design, Transportation Research Board, NCHRP Report 444.
149. Brown, E.R., Kandhal, P.S. ve Zhang, J., Performance Testing for Hot Mix Asphalt, National Center for Asphalt Technology Auburn University, Alabama NCAT Report 01-05 November 2001.
150. Aksoy, A., Şamlioğlu, K., Tayfur, S. ve Özen, H., Effects of Various Additives on the Moisture Damage Sensitivity of Asphalt Mixtures, Construction and Building Materials, 19, (2005) 11-18.
151. Li, R., Xiao, F., Amirkhanian, S., You, Z. ve Huang, J., Developments of Nano Materials and Technologies on Asphalt Materials--A review, Constr. Build. Mater. 143 (2017) 633-648.

152. Yao, H., You, Z., Li, L., Shi, X., Goh, S.W., Mills-Beale, J. ve Wingard, D., Performance of Asphalt Binder Blended with Non-Modified and Polymer-Modified Nanoclay, Construction and Building Materials, 35 (2012) 159-170.
153. Ashish, P.K., Singh, D. ve Bohm, S., Evaluation of Rutting, Fatigue and Moisture Damage Performance of Nanoclay Modified Asphalt Binder, Constr. Build. Mater., 113 (2016) 341-350.
154. De Melo, J.V.S. ve Trichês, G., Evaluation of Properties and Fatigue Life Estimation of Asphalt Mixture Modified by Organophilic Nanoclay, Construction and Building Materials, 140 (2017) 364-373.
155. Abdullah, M.E., Zamhari, K.A., Hainin, M.R., Oluwasola, E.A., Hassan, N.A. ve Yusoff, N.I.M., Engineering Properties of Asphalt Binders Containing Nanoclay and Chemical Warm-Mix Asphalt Additives, Constr. Build. Mater., 112 (2016) 232-240.
156. Nguyen, Q.T., Process for Improving the Exfoliation and Dispersion of Nanoclay Particles into Polymer Matrices Using Supercritical Carbon Dioxide Doctoral dissertation, Virginia Tech, 2007.
157. Chelovian, A. ve Shafabakhsh, G., Laboratory evaluation of Nano Al₂O₃ effect on dynamic performance of stone mastic asphalt, Int. J. Pavement Res. Technol., 10, 2 (2017) 131-138.

ÖZGEÇMİŞ

Dündar AYYILDIZ, 1976 yılında Trabzon'un Yomra ilçesinde doğdu. Eğitimine Almanya'da başlayan AYYILDIZ ilköğrenimini Trabzon 24 Şubat İlköğretim Okulu'nda tamamladı. Ortaöğrenim ve Lise eğitimine, Trabzon Özel Köşk Lisesi ve Trabzon Lisesi'nde devam etti. 2004 yılında Atatürk Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden mezun oldu. 2008 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü yapı anabilim dalında yüksek lisansını tamamlayarak "İnşaat Yüksek Mühendisi" unvanını aldı. 2007 – 2008 yılları arasında ABD'de mesleki ve bilimsel çalışma faaliyetlerinde bulundu. Bu süre içerisinde ulusal ve uluslararası bildiri ve makaleleri yayımlandı.

Halen Ayyıldızlar İnşaat ile Antra Mühendislik ve Müşavirlik firmalarının şirket müdürlüklerini ve Ortahisar Kent Konseyi başkanlığını yürütmektedir. İyi derecede İngilizce bilmekte olan Dündar AYYILDIZ evli ve iki çocuk babasıdır.