T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Yol Üstyapısının Trafik ve Çevresel Koşullar Altındaki Performans Karakteristiklerinin Değerlendirilmesi

Zahra MOHAMMADI

DANIŞMAN
Doç. Dr. Barış SAYIN

II. DANIŞMAN
Dr. Ahmet Sertaç KARAKAŞ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İnşaat Mühendisliği Programı

İSTANBUL-2021

Bu çalışma, 12.03.2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İnşaat Mühendisliği Programında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Doç. Dr. Barış SAYIN (Danışman)
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Mühendislik Fakültesi

Doç. Dr. Turgay COŞGUN
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Mühendislik Fakültesi

Dr. Öğr. Üyesi Atakan MANGIR
İstanbul Medipol Üniversitesi
Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi

20.04.2016 tarihli Resmi Gazete'de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa'nın abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

ÖNSÖZ

Her şeyden önce, desteği ve güveni ile her zaman yanımda olan ve hayatta elimden gelenin en iyisini yapmam için bana ilham ve cesaret veren canım anneme, babama ve kardeşlerime en derin şükranlarımı sunmak isterim. Bunun yanı sıra yüksek lisans eğitimim süresince bu zorlu süreçte hiçbir fedakarlıktan kaçınmayan, maddi, manevi desteklerini esirgemeyen canım eşim ve hayat arkadaşıma çok müteşekkirim.

Tezimin aracıyla aileme, benim için yaptığı her şey için teşekkürlerimi, sevgilerimi ve derin minnettarlığımı ifade etmek isterim.

Yüksek lisans eğitimi ve tez çalışmaları süresince bana yol gösteren, paha biçilmez önerilerde bulunan ve her türlü desteğini esirgemeyen çok değerli danışman hocalarım Doç. Dr. Barış Sayın'a ve Dr. A. Sertaç Karakaş'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, tez çalışması sürecinde yardımcı olan ve fikir alışverişinde bulunduğum Prof. Dr. Baha Vural Kök'e teşekkürlerimi sunarım.

Mart 2021 Zahra MOHAMMADI

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ ..... **iv**
İÇİNDEKİLER ..... **v**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **x**
TABLO LİSTESİ ..... **xiii**
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ ..... **xv**
ÖZET ..... **xvii**
SUMMARY ..... **xix**
1. GİRİŞ **1**
1.1 KONU **1**
1.2 ÇALIŞMANIN AMACI VE KAPSAMI **4**
1.3 LİTERATÜR **6**
2. GENEL KISIMLAR **12**
2.1 YOL ÜST YAPISI **12**
2.1.1 Rijit Kaplamalı Üstyapı 13
2.1.2 Esnek Kaplamalı Üstyapı 14
2.1.2.1 Taş Mastik Asfalt 15
2.2 ESNEK YOL ÜSTYAPISI TABAKALARI **16**
2.2.1 Kaplama 16
2.2.2 Temel 18
2.2.3 Alt Temel 18
2.2.4 Taban 19
2.3 AGREGALAR **20**
2.3.1 Agrega Gradasyonunun Belirlenmesi 20
2.3.2 Elek Analizi 21

2.3.3 Agrega Tipleri 22
2.3.4 Bitümlü Kaplamalarda Kullanılan Agregalar Özellikler 23
2.4 BİTÜMLÜ BAĞLAYICILAR 24
2.4.1 Bitüm Özellikleri 24
2.4.2 Bitümlü Kaplamalar 25
2.4.3 Sathi Kaplamalar 25
2.4.3.1 Sathi Kaplamaların Kullanış Amaçları 25
2.4.4 Bitümlü Karışımlar 26
2.4.4.1 Bitümlü karışımların sınıflandırılması 26
2.4.4.2 Bitümlü Kaplamaların Fiziksel ve Mekanik Özellikler 28
2.4.5 Marshall Metodu ile Bitümlü Sıcak Karışım Dizaynı 30
2.4.5.1 Marshall Deneyinin Amacı 30
2.4.5.2 Marshall Metodu ile Karışım Dizayn Aşamaları 30
2.4.6 Polimer Modifiye Bitümler 32
2.4.6.1 Polimer Modifiye Bitüm Özellikleri 33
2.4.6.2 Polimer Modifiye Bitümlerde Kullanılan Katkılar 34
2.4.6.3 Polimer Modifiye Bitümlerde Uygulanan Deneyler 36
2.5 ÇEVRESEL KOŞULLAR VE TRAFİK 40
2.5.1 İklim Koşulları 41
2.5.2 Trafik Koşulları 42
2.5.3 Kaplama Bozulmaları 42
2.5.3.1 Deformasyon 44
2.5.3.2 Ayrışma 44
2.5.3.3 Çatlamalar 45
2.6 SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ 46
2.6.1 Yöntemin Temel Amacı 46

2.6.2 Yöntemin Kullanım Alanları 47
2.6.3 Sonlu Elemanlar Tipleri 47
2.6.4 Yönteminde Kullanılan Bilgisayar yazılımları 47
2.6.5 Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Yapının Modellemesi 47
2.6.6 Abaqus 49
3. MALZEME VE YÖNTEM 50
3.1 KATKISIZ BSK MALZEME ÖZELLİKLERİ 50
3.1.1 Agrega Özellikleri 50
3.1.1.1 Elek Analizi 50
3.1.1.2 Özgül Ağırlığı ve Su Emme 51
3.1.1.3 Aşınma Kaybı (Los Angeles) 52
3.1.1.4 Donma ve Çözülme 52
3.1.1.5 Yassılık İndeksi 52
3.1.1.6 Cilalanma 52
3.1.1.7 Soyulma 53
3.1.2 Katkısız Bitüm Özellikleri 53
3.1.2.1 Penetrasyon 53
3.1.2.2 Bitüm Özgül Ağırlık 53
3.1.2.3 Karışımlarda Kullanılan Agrega ve Bitüm Miktarları 54
3.1.2.4 Aşınma Tabakası Dizaynı 54
3.1.3 Karışımın Deney Sonuçları 56
3.1.3.1 Pratik Özgül Ağırlık 56
3.1.3.2 Stabilite 57
3.1.3.3 Asfalt Dolu Boşluk 57
3.1.3.4 Boşluk 57
3.1.3.5 Agregalar Arası Boşluk 57

3.1.3.6 Optimum Bitüm Yüzdesinin Belirlenmesi 58
3.2 KATKILI TMA MALZEME ÖZELLİKLERİ 58
3.2.1 Katkılı TMA'da Agrega Özellikleri 58
3.2.2 Elek Analizi 59
3.2.3 Agrega Özgül Ağırlıkları 60
3.2.4 TMA'da Kullanılan Bitüm Özellikleri 60
3.2.5 Marshal Karışım Dizaynı 61
3.2.6 Tekerlek İzinde Oturma 61
3.2.7 İndirekt Çekme Mukavemeti 62
3.3 TABAKALARIN ESNEKLİK MODÜLÜ 62
3.4 TEMEL VE ALTTEMEL TABAKASINDA KULLANILAN AGREGA 63
3.5 YÖNTEM 64
3.5.1 Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Yol Üstyapı Tabakaların Modellemesi 64
4. BULGULAR 67
4.1 MODELLEME 68
4.2 1. AY ABAQUS NÜMERİK ANALİZ SONUÇLARI 70
4.2.1 Model 1 71
4.2.2 Model 2 72
4.2.3 Model 3 74
4.3 1. AY MODELLERIN SONUÇ KARŞILAŞTIRMASI 75
4.3.1 Von-Mises Gerilmelerin Karşılaştırması 75
4.3.2 Düşey Gerilmelerin Karşılaştırması 78
4.3.3 Yatay Gerilmelerin Karşılaştırması 80
4.3.4 Deformasyonların Karşılaştırılması 82
4.4 12. AY MODELLERİN SONUÇ KARŞILAŞTIRMASI 84
4.4.1 Von-Mises Gerilmelerin Karşılaştırması 84

4.4.2 Düşey Gerilmelerin Karşılaştırması 87
4.4.3 Yatay Gerilmelerin Karşılaştırması 89
4.4.2 Deformasyonların Karşılaştırması 91
4.5 1. AY VE 12. AY MODELLERIN PERFOMANS KARŞILAŞTIRMASI 93
4.5.1 Von-Mises Gerilmesi 93
4.5.2 Düşey Gerilmesi 95
4.5.3 Yatay Gerilmesi 97
4.5.4 Deformasyon 98
5. TARTIŞMA VE SONUÇ 100
KAYNAKLAR 104
EKLER 112

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1: Türkiye'deki yük ve yolcu taşımacılığının dağılımı (Beyhan, 2019). 2
Şekil 2.1 : Tipik yol üst yapısı kesiti (Karadağ vd, 2019). 12
Şekil 2.2 : Rijit üstyapı veya beton kaplama (Mutyılmaz, 2014). 13
Şekil 2.3 : Rijit üstyapı kesiti ve yük dağılımı (Karaşahin, 2014). 13
Şekil 2.4 : Esnek üstyapı kesiti ve yük dağılımı (Karaşahin, 2014) 14
Şekil 2.5 : Esnek üstyapı veya asfalt kaplama (Kara, 2012). 14
Şekil 2.6 : Taş mastik asfalt (ISMAEL, 2020) 16
Şekil 2.7: Bitümlü sıcak karışım uygulaması (Karaşahin, 2014). 17
Şekil 2.8 : Taş mastik asfalt uygulaması (ISMAEL, 2020). 17
Şekil 2.9 : Yol üstyapısı temel ve alt temel tabakaları hazırlanması (Karaşahin, 2014). 19
Şekil 2.10 : Yol üstyapısı taban zemini hazırlanması (Karaşahin, 2014). 20
Şekil 2.11 : Gradasyonlu agrega tipleri (Tunç, 2004) 21
Şekil 2.12 : Gradasyonlu agrega tiplerin grafiği (Orhan, 2012). 21
Şekil 2.13 : Elek analizi aletleri (WSEA, Aralık 2020). 22
Şekil 2.14 : Çeşitli agrega tipleri. 23
Şekil 2.15 : Agregaların tane boyutu ve şekli (Orhan, 2012). 24
Şekil 2.16 : Agrega tanelerin yüzeysel yapısı (Orhan, 2012) 24
Şekil 2.17 : Agrega tanelerin gözeneklilik tipleri (Orhan, 2012). 24
Şekil 2.18 : Sathi kaplama uyulama tipileri (Caltrans Division of Maintenance, 2003) 25
Şekil 2.19 : Gradasyonlu karışım tipleri (Austrodus, 2000). 27
Şekil 2.20 : Esnek üstyapıda soyulmanın genel görünümü (Karaşahin, 2014). 29
Şekil 2.21 : Stiren butadien stiren (SBS) bitüm katkı maddesi (Çeloğlu, 2014) 36
Şekil 2.22 : RTFO testi (Çeloğlu, 2014). 38
Şekil 2.23 : PAV deney aletleri (Çeloğlu, 2014). 39
Şekil 2.24 : Mekanistik-Ampirik dizayn işleyiş diyagramı (Bal, 2013) 41
Şekil 2.25 : Yol üstyapısında etken iklim faktörleri (Herb, vd., 2009). 41
Şekil 2.26 : Esnek üstyapılarda tekerlek izi oluşumu (Karaşahin, 2014). 42
Şekil 2.27 : Esnek yol üstyapıda oluşan çatlaklar (Karaşahin, 2014) 43

Şekil 2.28 : a: bölgesel çökme, b: Ondülasyon (Bağdatlı vd., 2017) 44
Şekil 2.29 : a: Asfalt kusması, b: asfalt kaplamada oluşan oyuklar (çukur) (karakaş, 2014). . 45
Şekil 2.30 : a: Boyuna derz, b: Enine, c: Kayma, d: Timsah sırtı çatlağı (Karakaş, 2014) 45
Şekil 2.31 : Sonlu elemanlar yöntemiyle modelleme ve meshlenme. 48
Şekil 2.32 : Abaqus programın giriş sayfası. 49
Şekil 3.1 : Cebeci taş ocağı, İstanbul (Google haritası, SBB, Aralık 2020) 50
Şekil 3.2 : Elek analizinde geçen agregaların grafiği. 55
Şekil 3.3 : Karışım granolümetresi grafiği 59
Şekil 3.4 : 3 Boyutlu yol üstyapısı en kesiti. 64
Şekil 3.5 : Abaqus programın işleyiş diyagramı. 65
Şekil 3.6 : Yol üstyapısının çalışma şeması 66
Şekil 4.1: TEM Otoyolu, Avcılar-Kınalı istikameti (Arsalan, 2014). 67
Şekil 4.2: İstanbul'un 2019-2020 yılına ait ortalama yağış ve sıcaklık grafiği (hikb, 2020) .. 68
Şekil 4.3: Yol üstyapısı tabakaların kalınlığı 69
Şekil 4.4: a: Modelleme, b: özellikleri atanması, c: yükleme-mesnetlenme, d: Meshlenme ... 70
Şekil 4.5 : Model 1 Von Mises gerilmesi 71
Şekil 4.6 : Model 1 Düşey gerilmesi (en kesiti). 72
Şekil 4.7 : Model 1 Deformasyonu (en kesiti). 72
Şekil 4.8 : Model 2 Von Mises gerilmesi 73
Şekil 4.9 : Model 2 Düşey gerilmesi (en kesiti). 73
Şekil 4.10 : Model 2 Deformasyonu (en kesiti). 73
Şekil 4.11 : Model 3 Von Mises gerilmesi 74
Şekil 4.12 : Model 3 Düşey gerilmesi (en kesiti). 74
Şekil 4.13 : Model 3 Deformasyonu (en kesiti). 75
Şekil 4.14 : Kaplama tabakasında oluşan Von-Misesi gerilmesi (1.Ay). 76
Şekil 4.15 : Temel tabakasında oluşan Von-Misesi gerilmesi (1.Ay). 77
Şekil 4.16 : Alttemel tabakasında oluşan Von-Misesi gerilmesi (1.Ay). 77
Şekil 4.17: Kaplama tabakasında oluşan düşey gerilmesi (1.Ay). 79
Şekil 4.18 : Temel tabakasında oluşan düşey gerilmesi (1.Ay). 79
Şekil 4.19 : Alttemel tabakasında oluşan düşey gerilmesi (1.Ay). 79
Şekil 4.20 : Kaplama tabakasında oluşan yatay gerilmesi (1.Ay). 81
Şekil 4.21 : Kaplama tabakasında oluşan deformasyonu (1.Ay). 83
Şekil 4.22 : Temel tabakasında oluşan deformasyonu (1.Ay) 83

Şekil 4.23 : Alttemel tabakasında oluşan deformasyonu (1.Ay). 83
Şekil 4.24 : Kaplama tabakasında oluşan Von-Misesi gerilmesi (12.Ay). 85
Şekil 4.25 : Temel tabakasında oluşan Von-Misesi gerilmesi (12.Ay). 86
Şekil 4.26 : Alttemel tabakasında oluşan Von-Misesi gerilmesi (12.Ay)..... 86
Şekil 4.27 : Kaplama tabakasında oluşan düşey gerilmesi (12.Ay). 88
Şekil 4.28 : Temel tabakasında oluşan düşey gerilmesi (12.Ay). 88
Şekil 4.29 : Alttemel tabakasında oluşan düşey gerilmesi (12.Ay)..... 88
Şekil 4.30 : Kaplama tabakasında oluşan yatay gerilmesi (12.Ay). 90
Şekil 4.31 : Kaplama tabakasında oluşan deformasyonu (12.Ay)..... 92
Şekil 4.32 : Temel tabakasında oluşan deformasyonu (12.Ay)..... 92
Şekil 4.33 : Alttemel tabakasında oluşan deformasyonu (12.Ay). 92
Şekil 4.34 : Katkılı TMA Modellerin Von mises gerilmesi karşılaştırması (1.Ay-12.Ay). 93
Şekil 4.35 : Katkısız BSK Modellerin Von mises gerilmesi karşılaştırması (1.Ay-12.Ay). ... 93
Şekil 4.36 : Katkılı TMA Modellerin düşey gerilmesi karşılaştırması (1.Ay-12.Ay)..... 95
Şekil 4.37 : Katkısız BSK Modellerin düşey gerilmesi karşılaştırması (1.Ay-12.Ay)..... 95
Şekil 4.38 : Katkılı TMA Modellerin yatay gerilmesi karşılaştırması (1.Ay-12.Ay). 97
Şekil 4.39: Katkısız BSK Modellerin yatay gerilmesi karşılaştırması (1.Ay-12.Ay). 97
Şekil 4.40 : Katkılı TMA Modellerin deformasyonu karşılaştırması (1.Ay-12.Ay). 98
Şekil 4.41 : Katkısız BSK Modellerin deformasyonu karşılaştırması (1.Ay-12.Ay). 98

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1: Elek açıklığı ve tane boyutları (Orhan, 2012)..... 22
Tablo 2.2 : Modifiye bitümlerde kullanılan ana kimyasal katkılar (Orhan, 2012). 34
Tablo 3.1 : Katkısız kumtaşı agregaların elek analiz sonuçları (İSFALT)..... 51
Tablo 3.2 : Çalışmada kullanılan hacım özgül ağırlık ve Absobsiyon sonuçları (İSFALT)... 51
Tablo 3.3 : Parçalanma direnci deney sonucu (İSFALT)..... 52
Tablo 3.4 : Hava tesirlerini karşı dayanaklık deney sonucu (İSFALT) 52
Tablo 3.5 : Yassılık indeksi deney sonucu (İSFALT)..... 52
Tablo 3.6 : Cilalanma deney sonucu (İSFALT)..... 53
Tablo 3.7 : Soyulma deney sonucu (İSFALT)..... 53
Tablo 3.8 : Penetrasyon deney sonucu (İSFALT)..... 53
Tablo 3.9 : Bitüm özgül ağrılık deney sonucu (İSFALT) 54
Tablo 3.10 : Aşınma tabakası dizayn gradasyonu (İSFALT)..... 54
Tablo 3.11 : Bulunan karışım oranlarına göre karışım gradasyonu hesaplanması. 55
Tablo 3.12 : Agrega kullanım oranları ve karışım gradasyonu (İSFALT)..... 55
Tablo 3.13 : Karışımda kullanılan agrega % ve KTŞ 2013 limitler (İSFALT). 56
Tablo 3.14 : Pratik özgül ağırlık deney sonucu (İSFALT)..... 56
Tablo 3.15 : Stabilite deney sonucu (İSFALT)..... 57
Tablo 3.16 : Asfalt dolu boşluk sonucu (İSFALT) 57
Tablo 3.17 : Karışımda boşluk oranı sonucu (İSFALT) 57
Tablo 3.18 : Agregalar arası boşluk oranı (VMA) sonucu (İSFALT) 58
Tablo 3.19 : Optimum bitümdeki diğer sonuçları. 58
Tablo 3.20 : Agregalara uygulanan deneyler..... 58
Tablo 3.21 : TMA karışımın gradasyonu. 59
Tablo 3.22 : Agregaların özgül ağırlığı ve su absorbsiyonu. 60
Tablo 3.23 : Modifyeli bitüm özelliklerin deney sonuçları. 60
Tablo 3.24 : Marshal karışım dizayn sonuçları. 61
Tablo 3.25 : Tekerlek izni deney sonuçları. 61
Tablo 3.26 : İndirekt çekmek mukavemeti deney sonuçları..... 62

Tablo 3.27 : Asfalt karışımların esneklik modülleri 62
Tablo 3.28 : Granüler temel tabakası gradasyonu. 63
Tablo 3.29 : Alttemel malzemesi gradasyonu. 63
Tablo 4.1: Modifiyesiz BSK yol üstyapısının malzeme özellikleri 69
Tablo 4.2: Modifiyeli TMA yol üstyapısının malzeme özellikleri. 69
Tablo 4.3 : Modellerin mesh özellikleri. 71
Tablo 4.4: Katkısız BSK Von-Misesi gerilmesi nümerik analiz sonuçları (1.Ay). 75
Tablo 4.5: Katkılı TMA Von-Mises gerilmesi nümerik analiz sonuçları (1.Ay). 76
Tablo 4.6: Katkısız BSK düşey gerilmesi nümerik analiz sonuçları (1.Ay). 78
Tablo 4.7: Katkılı TMA düşey gerilmesi nümerik analiz sonuçları (12.Ay)..... 78
Tablo 4.8: Katkısız BSK yatay gerilmesi nümerik analiz sonuçları (1.Ay) 80
Tablo 4.9: Katkılı TMA yatay gerilmesi nümerik analiz sonuçları (1.Ay). 81
Tablo 4.10: Katkısız BSK deformasyonu nümerik analiz sonuçları (1.Ay)..... 82
Tablo 4.11: Katkılı TMA deformasyonu nümerik analiz sonuçları (1.Ay). 82
Tablo 4.12: Von-Mises gerilmesi nümerik analiz sonuçları (12.A)..... 84
Tablo 4.13: Katkılı TMA Von-Mises gerilmesi nümerik analiz sonuçları (12.Ay). 85
Tablo 4.14: Katkısız BSK düşey gerilmesi nümerik analiz sonuçları (12.Ay)..... 87
Tablo 4.15: Katkılı TMA düşey gerilmesi nümerik analiz sonuçları (12.Ay)..... 87
Tablo 4.16: Katkısız BSK yatay gerilmesi nümerik analiz sonuçları (12.Ay) 89
Tablo 4.17: Katkılı TMA yatay gerilmesi nümerik analiz sonuçları (12.Ay) 90
Tablo 4.18: Katkısız BSK deformasyonu nümerik analiz sonuçları (12.Ay)..... 91
Tablo 4.19: Katkılı TMA deformasyonu nümerik analiz sonuçları (12.Ay)..... 91
Tablo 4.20: Yol üstyapısı Von Mises gerilmelerin fonksiyon ve regresyon analizleri. 94
Tablo 4.21: Yol üstyapısı düşey gerilmelerin fonksiyon ve regresyon analizleri..... 96
Tablo 4.22: Yol üstyapısı deformasyon fonksiyon ve regresyon analizleri. 99

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
A	: Kesit Alanı
A*	: Numunenin havadaki ağırlığı (gr)
$\mathbf{D_p}$	: Pratik özgül ağırlık (gr/cm^3)
$\mathbf{D_T}$	: Teorik Özgül Ağırlık
E	: Esneklik modülü
F	: Yer değiştirmeler vektörü
g	: Yerçekimi ivmesi
$\mathbf{G_b}$	: Bitüm özgül ağırlık
$\mathbf{G_{ef}}$	: Agrega efektif özgül ağırlık
$\mathbf{G_{sb}}$	: Agreganın özgül ağırlığı (gr/cm^3)
γ	: yoğunluk
h	: Kalınlık
K	: Sertlik, Rijitlik
L	: Uzunluk
u	: Kuvvet vektörü
V	: Numunenin hacmi (cm^3)
$\boldsymbol{\nu}$	: Poisson oran
$\mathbf{V_f}$	: Asfalt dolu boşluk
$\mathbf{V_h}$	: Boşluk
VMA	: Agregalar arası boşluk
$\mathbf{W_a}$	: Agrega ağırlığına göre bitüm yüzdesi (%)
$\mathbf{W_b}$	: agrega karışımda bitüm ağırlıkça oranı
$\boldsymbol{\rho}$	: Öz kütle
$\boldsymbol{\gamma}$	: Özgül ağırlık

Kısaltmalar	Açıklama
AASHTO	: American Association of State Highway and Transportation Officials
BSK	: Bitümlü Sıcak Karışım
EBA	: Ethylene Butyl Acrylate
EMA	: Ethylene Methyl Acrylate
EVA	: Ethylene Vinyl Acetate
İSFALT	: İstanbul Asfalt Fabrikaları Sanayi ve Ticaret A.Ş.
KGM	: Karayolları Genel Müdürlüğü
KTŞ-2013	: Karayolu Teknik Şartnamesi 2013
PAV	: Pressure Aging Vessel (Basınçlı Yaşlandırma Kabı)
PIB	: Polyisobutene
RTFOT	: The Rolling thin film ovens (Dönmeli ince film etüvü testi)
SB	: Styrene Butadiene
SBR	: Styrene Butadiene Rubber
SBS	: Styrene Butadiene Styrene
SIS	: Styrene Isoprene Styrene
TFOT	: Thin Film Oven Test (İnce film halinde ısıtma)
UBAK	: Ulaştırma Bakanlığı
ASTM	: Amerikan Standartı
CBR	: Kaliforniya Taşıma Oranı
TMA	: Taş Mastik Asfalt
TSE	: Türk Standartları Enstitüsü

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YOL ÜSTYAPISININ TRAFİK VE ÇEVRESEL KOŞULLAR ALTINDAKİ PERFORMANS KARAKTERİSTİKLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Zahra MOHAMMADI

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Doç. Dr. Barış Sayın

II. Danışman : Dr. Ahmet Sertaç Karakaş

Asfalt bir yol tabakasında gerilmeleri oluşturan veya artmasına neden olan faktörlerden en önemlileri, iklim gibi çevresel koşulları ve trafik yükü olarak bilinmektedir. Bu parametreler, yolun performans seviyesinin belirlenmesinde etkin rol oynamaktadır. Gerçekleştirilen çalışmada, yol üstyapısının trafik ve çevresel koşullar altındaki performansı değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, farklı tabaka kalınlıklarındaki yol üst yapısının modifiyesiz ve modifiyeli özellikleri esas alınarak asfalt betonu kaplamaların doğrusal-izotropik davranışa sahip olduğu varsayımıyla mekanik özellikleri sonlu elemanlar yaklaşımı uygulanarak belirlenmiştir. Yol üstyapı kaplamalarında esnek üstyapılar, güvenlik, konfor, dayanım ve servis ömrü açısından yaygın olarak kullanılmaktadır. Bitümlü sıcak karışımların ve taş mastik asfaltın performans özelliklerini artırmak için kullanılan polimer katkılar kaplamada üstün performans sergilenmesi ve malzeme özelliklerinin iyileştirilmesinde etkin rol üstlenmektedir. Çalışma kapsamında KTŞ-2013 ve AASHTO standartları esas alınarak yol üstyapının katkılı ve katkısız durumlarda

değişik periyotlardaki yük altındaki performans analizleri gerçekleştirilmiştir. Şekil değiştirme yaklaşımının esas alındığı nümerik analizlerde sonlu elemanlar yazılımı olan Abaqus kullanılmıştır. Mevcut durum analizleri kapsamında, üç farklı kalınlıkta katkısız bitümlü sıcak karışım ve katkılı taş mastik asfalt içeren yol üstyapının (kaplama, temel ve alttemel tabakaları) gerilme ve deformasyon ilişkileri incelenmiştir. Çalışmada, her bir model için yol katmanlarını oluşturan kaplama tabakası, temel, alt temel ve taban zemin tabakalar arasındaki düşey-yatay gerilmeler ve şekil değiştirmeler esas alınmıştır. Bunun sonucunda, performans özellikleri karşılaştırılarak ideal yaklaşım modeli belirlenmiştir. Çalışma sonucunda inceleme konusu bitümlü sıcak karışımların ve taş mastik asfaltın trafik ve çevre koşulları altında gösterdikleri davranışla değişik kalınlıklarda tespit edilmiştir. Nümerik analiz davranışını laboratuvar deney sonuçları ile karşılaştırılmış ve nümerik analiz için tahminler yapılmıştır. Nümerik analiz sonuçlarının laboratuvar deney sonuçlarıyla uygunluk gösterdiği ve desteklendiği görülmüştür.

Şubat 2021, 125 sayfa.

Anahtar kelimeler: Yol üstyapısı, Sonlu eleman yöntemi, Taş mastik asfalt, Bitümlü sıcak karışım, Çevresel koşullar, Deformasyon

SUMMARY

M.Sc. THESIS

ASSESSMENT OF PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF ROAD SUPERSTRUCTURE UNDER TRAFFIC AND ENVIRONMENTAL CONDITIONS

Zahra MOHAMMADI

Istanbul University-Cerrahpasa

Institute of Graduate Studies

Department of Civil Engineering

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Barış Sayın

Co-Supervisor : Dr. Ahmet Sertaç Karakaş

The most important factors that cause stresses or increase of stress in an asphalt road layer are known as traffic load and environmental conditions such as climate. These parameters play an active role in determining the performance level of the road. The performance of the road pavement under traffic and environmental conditions has been evaluated in this study. In this context, the mechanical properties of asphalt concrete pavements were determined by applying the finite element method with the assumption that asphalt concrete pavements have linear-isotropic behavior based on the unmodified and modified properties of the road superstructure in different coating layer thicknesses. Flexible superstructures are widely used in road pavements in terms of safety, comfort, strength and service life. Polymer additives are used to increase the performance properties of hot mixtures asphalt and stone mastic asphalt, polymer additives also play an active role in showing superior performance in coating layers, it is also

enhancing the material properties. Within the scope of this study, the performance of the modified and unmodified road pavement under load in different periods has been analyzed based on KTŞ-2013 and AASHTO standards. In numerical analyzes based on the displacement approach, the finite element software Abaqus was used. Within the scope of the current situation analysis, the stress and deformation relations of the road pavement (coating, base and sub-base layers) containing three different thicknesses of unmodified hot mixture asphalt and additive modified stone mastic asphalt were examined. In this study, vertical-horizontal stresses and deformations between the coating layer, base, subbase and subgrade layers that form the road layers for each model were taken as basis. Based on this study, the ideal approximation model was determined by comparing the performance characteristics; and the behavior of the hot mixture asphalt and stone mastic asphalt under the traffic and environmental conditions was determined in different thicknesses. The numerical analysis behavior was compared with the laboratory test results and predictions were made for numerical analysis. It was observed that the numerical analysis results were appropriate with the laboratory test results.

February 2021, 125 pages.

Keywords: Road superstructure, Finite element method, Stone mastic asphalt, Hot mixture asphalt, Environmental conditions, Deformation

1. GİRİŞ

1.1 KONU

İnsan yaşamında iletişim yollarının ve araçlarının önemi açık olup uygarlığın gelişmesi ve mükemmelliği doğrudan yollarla ilişkilidir. Her bölgenin kültürel düzeyinin ve gelişme düzeyinin göstergesi, yollara olan uzaklığına veya yakınlığına göre belirlenebilir. Başka bir anlatımla yollar; kitle iletişiminde en önemli role sahip olduğundan insan entelektüel ve kültürel başarılarının birbirlerine aktarılmasında önemli paya sahiptir.

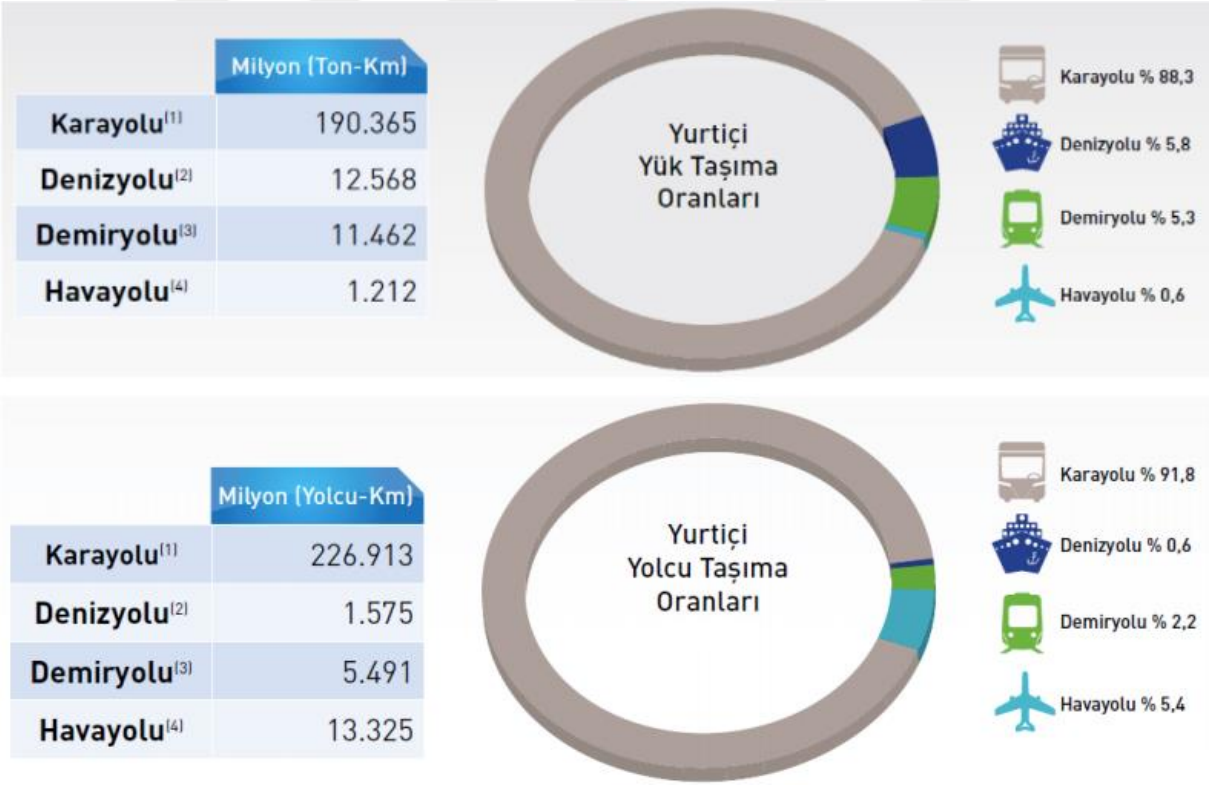
İnsanoğlunun yaşamı, eylem ve toplu etkileşimleri ile sonuçlanmaktadır. Her bölgedeki insanların deneyim ve becerilerinin diğerlerine aktarılması, kültürlerin ve medeniyetlerin ortaya çıkmasının temeli, her zaman ulaşım araçlarıyla olmuştur. İnsanlar arasındaki bu ilişkiler, iletişim araçları yani yollar inşa edilmedikçe var olmayacaktı. Bu nedenle eski çağlardan beri çeşitli iletişim motifleri ile oluşturulan yolların insan hayatında çok önemli olduğunu görmekteyiz. Yollar, ülkedeki ekonomik durumunu her zaman etkileyen önemli bir yapıdır. Bu nedenle geçmişten günümüze insanoğlu ihtiyaçlarını karşılamak için çeşitli ulaşım yolları kullanmaktadır.

Yıllar boyunca mühendisler, yol üstyapısını analiz etmek ve tasarlamak için çeşitli kriterler ve yöntemler geliştirdiler ve sonuç olarak günümüzde taşıtlar için en yaygın kaplama türlerinden biri olan asfalt kaplamasını dizayn ettiler. Asfaltlar, agrega ve bitümün karıştırılmasıyla oluşturulur. Asfalt karışımı üretiminde kullanılan bitüm çeşidi, agregalar arasındaki bağlayıcı özelliğini sağlamak, asfalt karışımının performansında ve dayanıklılığında önemli rol oynamaktadır.

Yol uygulamalarında yol üstyapısı olarak rijit ve esnek yol kaplamaları genellikle kullanılmaktadır. Yol üstyapısının konumlandığı doğal zemin, genellikle ağır araçların dingil yüklerini dayanacak kadar yeterli dirence sahip değildir ve bu tür zeminlerin yüklenmesi halinde, zeminde kayma ve deformasyona neden olmaktadır, bu sebeple yol üstyapısı farklı katmanlardan oluşmaktadır, bu katmanlar yüzeyden tabana kadar sırasıyla; kaplama, temel ve alttemel tabakasından olmak üzere üç tabakadan oluşmaktadır. Dolayısıyla, her tabaka önemli bir rol oynamaktadır, yükler üstten alta doğru yayılmaktadır, en fazla yüke üst tabaka (kaplama) maruz kalmaktadır. Örneğin, kaplama tabakası ağır trafik yükü altında maruz kaldığında ve

gerilmeler meydana gelir, dolayısıyla alt tabakalar ise gerilme dağılımı yapıp böylece transfer gerilimi miktarı yeterince azalır ve oluşacak olan bozulmaları engellemektedir. Kaplamanın başka bir görevi ise, yol kullanıcıları için yeterince güvenli, konfor, düz ve pürüzsüz bir yüzey oluşturmaktır. Yol üstyapısı, araçların ağırlığına dayanabilecek ve her türlü iklim koşulunda kullanılabilecek şekilde tasarlanmalı ve inşa edilmelidir. Trafik yükün sebep olduğu, yol tabakalarında oluşacak olan deformasyon ve gerilmeler ve yüzey kaplamada oluşan, şişme, otuma, tekerlek izi ve çatlaklar gibi problemlerin çözümü ve esnek üst yapı tasarımı ile ilgili 1960 yıllardan bu yana AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) çalışmalar yapmaktadır.

Türkiye'de Karayolları Genel Müdürlüğünün hazırlanmış olduğu Karayolları Teknik Şartnamesine (KTŞ 2013) göre yolların dizayn çalışmaları yürütülmektedir. Ekonomik faaliyetlerin gelişmesi sonucunda mal ve hizmet talebini karşılayabilmek için çeşitli ulaşım talebi de artış göstermektedir. Sonuç olarak artan ulaşım talebi karşısında karayollarında büyük sorunlar yaşanmaktadır. Türkiye'de ulaşım yöntemlerine göre dağılımı yapılan yük ve yolcu taşımacılığının Şekil 1.1'de gösterilmektedir.



Şekil 1.1: Türkiye'deki yük ve yolcu taşımacılığının dağılımı (Beyhan, 2019).

Şekil 1.1'den de görüleceği üzere ulaşım araçları içerisindeki %90 seviyede, yük ve yolcu taşımacılığı olarak yer almaktadır. Bu nedenle yol kaplamalar yoğun trafik yükü altında performansı hızla düşmektedir. Çevre koşullarında zamanla yorulmalara maruz kalarak ilk zamanların dayanımlarını kaybetmektedir. Üstyapı için beklenen hizmet süresinden çok daha kısa sürede, yol üst yapısında bozulmalar meydana gelmektedir, bu da karayolların temel sorunlardan biridir, (UBAK, 2015).

Yapılmış olan çalışmalarda üstyapı performansını artırmak için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bu sorunlara karşı, kullanılacak olan malzemelere farklı katkı malzemeler ekleyerek (polimerler, lifler, gibi katkı malzemeleri) güçlendirilmesi ve performansın artırılması çalışmalarda incelenen en önemli konulardan biridir.

Türkiye'de yol üstyapılarının %65'i taşıma gücü asfalt betonu kaplamaya göre daha düşük olan yol kaplamaları kullanılmaktadır, bu yüzden yolların bakım ve onarım ihtiyaçları artmakta, maliyetleri de yükselmektedir (KGM, 2016).

Yeniden inşa edilen yol üstyapılar veya inşa edilecek olan yollarda, taşıma kapasitesi yüksek olan BSK veya beton (rijit) kaplamaların kullanılması, yol üstyapısında kısa sürede meydana gelen bozulmaları engelleyerek hizmet süresini daha da uzatacaktır. Üstelik, ağır trafik yükü altında kalan esnek üstyapı sorunlarının halledilmesi için asfalt betonu kaplamaları veya beton kaplamalı yollar yaygın olarak tercih edilmelidir. Fakat Türkiye'de karayolu sektöründe BSK kaplama tekniği daha elverişli olduğundan dolayı beton kaplama pek tercih edilmemektedir. Yapım, onarım ve bakım maliyeti düşük ama performansı yüksek yollar tercih edilmesi ekonomik alanında önem taşımaktadır. Bu maksatla, yolların daha iyi performans sergilemesi için çeşitli katkı malzemeler ile modifiye edilmiş taş mastik asfalt (TMA) ve modifiyesiz beton kaplamalı BSK malzemelerin mekanik ve kalıcılık özelliklerini iyileştirmesi ve yolların yorulmalara karşı performansını artırmada ayrıca daha az bakım gerektirip servis ömrünü yükseltmede tercih edilmektedir.

1.2 ÇALIŞMANIN AMACI VE KAPSAMI

Bu çalışmada katkılı TMA ve katkısı BSK'ların yol üstyapısı ampirik deney sonuçlarının nümerik yöntemler kullanarak desteklenmesi neticesinde ileriye yönelik tahminlerin yapılmasına sağlamasıdır. Bu çalışma, asfalt yol üstyapısının çevresel koşullar ve trafik yükü altında, daha üzün ömürlü ve daha iyi bir performans sergilenmesi amacıyla polimer katkı kullanımını değişik periyotlardaki davranışını tespit etmek ve katkısı BSK ile karşılaştırmasını yapmak için gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, asfalt tabakalarında ve kaplamada, gerilmelerin neden olduğu çatlaklar ve deformasyonların azaltılarak oluşacak olan yer değiştirmelerin limit değerlerin altında olması hedeflenmiştir. Söz konusu çalışmada, İstanbul'daki çevresel koşullar dikkate alınmıştır.

Çalışmada, İstanbul Cebeci taş ocağından temin edilen agrega ve Gebze bölgesinden temin edilen SBS polimer katkı esas alınmış, bu malzemelerle dizayn edilen asfalt esas alınmıştır. Nümerik analiz aşamasında sonlu elemanlar yönteminin kullanıldığı Abaqus CAE yazılımı kullanılarak üç boyutlu model oluşturulmuştur. Yol üstyapısının zati yükü, lastik basıncı ve tekrarlanan trafik yükün altında kalan kaplama, temel ve alttemel tabakanın sergilediği davranış ve performansı incelenmiştir. Üç farklı kaplama kalınlığına sahip, üç tabakadan (kaplama, temel, alt temel) oluşan üç ayrı yol üst yapısı modeli hazırlanmıştır. Yol üstyapısının her tabakası için ampirik sonuçlardan elde edilen malzeme özellikleri esas alınarak model hazırlanmıştır. Her tabaka için ayrı esneklik modülü ve poisson oranı daha önce yapılan laboratuvar test sonuçlarından temin edilmiştir. Modelde kullanılan malzemeler homojen olarak tanımlanmış ve uygulanan tekerlek yükleri ile malzeme davranışı lineer elastik kabulü yapılmıştır. Yüklemeler statik olarak uygulanmıştır. Yüklemelerde Eşdeğer Standart Dingil Yükleri (ESDY) dikkate alınmış, örnek Yıllık Ortalama Günlük Trafik (YOGT) varsayımı yapılmıştır. Sınır koşulları alttemel tabaka tabanını kapsayacak şekilde model dizaynı gerçekleştirmiştir. Isı etkisi ve sürtünme dikkate alınmamış olup tüm katmanların malzeme özellikleri doğrusal elastik-izotropik kabul edilmiştir. Analizler neticesinde gerilme, gerinim ve deformasyon değerlerinin elde edilmesi hedeflenmiştir. Bu çalışmanın diğer amaçlarından biri, alt tabakalarda ve kaplamada gerilmelerin neden olduğu çatlaklar ve deformasyonları azaltmak ya da engellenmek ve oluşacak olan yer değiştirmeleri belirlenen sınır şartların içinde tutmaktır. Alt katmanlarda trafik (dingil) yükün oluşturduğu gerilmeleri sonlu elemanlar yöntemiyle ve Abaqus bilgisayar destekli yazılımı kullanılacaktır. TMA ve BSK kaplamaların tasarımında ve çeşitli nedenlerle (trafik yükleri, taban zemin sorunları, iklim etkiler vs.) oluşan bozulmaların

değerlendirilmesinde de çalışma kapsamında ele alınacaktır. Yol üstyapısının, trafik yükü altında modifiyesiz ve modifiyeli olarak farklı periyotlarda ve kalınlıklarda gerilme-deformasyon davranışlarını çalışma kapsamında hedeflenmiştir.

SBS katkılı asfalt karışımların mekanik özelliklerinin zaman içerisindeki değişimini araştıran çalışmalar sınırlıdır. Sunulan çalışmanın amacı, 12 ay süreyle trafik yüklerine ve çevresel etkilere maruz kalan modifiyesiz bitümlü sıcak karışımlar ve selülozik elyaf ve SBS modifiyeli taş mastik asfaltlardan oluşan asfalt betonu kaplama yolun mekanik özelliklerindeki değişimi deneysel ve nümerik olarak araştırmaktır. Nümerik analiz aşamasında, Abaqus CAE yazılımıyla, üç modele farklı kaplama kalınlığına ait analizler yapıldı, malzemenin sünek (elastik) davranışı göz önüne alınarak Von-Mises gerilmeleri elde edilmiş ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Çalışmada son olarak, regresyon analiz, eğri uydurma yöntemi (curve fitting method) kapsamında, her üç modelin gerilme ve deformasyon ilişkileri belirlenmiştir.

1.3 LİTERATÜR

Taş mastik asfalt konusunda literatürde yer alan çalışmalar incelenmiştir.

Saedi (2019), taş mastik asfalt kaplamalarda katkı maddesi olarak kullanılan viatop premium elyaf, SBS (Stiren-Butadien-Stiren) ve ve FRP (Fiber Rainforce Polimer) maddelerini kullanarak, bu maddelerin asfalt karışımının mekanik özelliklere olan etkilerini araştırmıştır. Yaptığı karışımlarda farklı oranlarda elyaf, SBS ve FRP kullanarak çıkan değerleri kıyaslamıştır. Çalışmanın sonucunda farklı katkıların farklı deneylerde birbirine üstünlük sağladığı ancak FRP katkı kullanımının olumlu sonuçlar doğuracağını belirtmiştir.

Ghasemi ve Marandi (2010), yaptıkları çalışmada TMA karışımlara %5 SBS katkısı kullanarak Marshall stabilite değerinde %70 artış olduğunu ve aynı zamanda esneklik modülünde de %127' lik bir iyileşme olduğunu göstermişlerdir.

Park vd. (2009) bitümlü sıcak karışımlarda, SBS ve hidrokarbon katkılarını kullanmışlardır. Yaptıkları çalışma sonucunda bu katkıların, yorulmaya karşı gösterilen direnci arttırdığını görmüşlerdir. Ayrıca oluşturdukları bu karışımın köprülerde kullanılması önerisinde bulunmuşlardır.

Zhi vd. (2012) TMA karışımları içerisinde gilsonit, poliprolin, asbest fiber, lastik kırıntısı, selülozik elyaf kullanarak performans üzerine etkilerini araştırmışlardır. Bu nedenle yorulma deneyi ile su hasarı deneyleri yaparak gilsonit katkısının en etkili özelliğe sahip olduğunu belirtmişlerdir.

Chelovian ve Shafabakhsh (2016) taş mastik asfalt karışımına, %0.3, %0.6, %0.9 ve %1.2 oranlarında Nano Al2O3 eklemişlerdir. Bununla beraber TMA karışımlarında katkı maddesi olarak kullanılan selülozik elyafı tercih etmişlerdir. Yapılan deneyler sonucunda (tekerlek izi, dinamik sünme, indirekt çekme dayanım deneyi) Nano Al2O3' ün önemli ölçüde taş mastik asfaltın performansına etki ettiğini dile getirmiş ve tüm sıcaklık ve basınçlarda, optimum yüzde olarak (% 0.6 - 0.9 - 1.2 Al_2O_3) olduğunu belirtmişlerdir.

Behbahani vd. (2009) yaptıkları çalışmada kullandıkları mineral elyaf (taş yünü) ve selülozik elyafın, taş mastik asfalt üzerine etkilerini araştırmışlardır. Bu kapsamda Marshall stabilite ve indirekt çekme dayanımı yapmışlardır. Sonuç olarak mineral elyaflı TMA karışımlarının, selüloz içerenlerden daha az bağlayıcı içeriğine ve VMA'ya sahip olduğunu ortaya

koymuşlardır. Ayrıca bu iki elyaf türünün dayanıma olan etkilerinin diğer fiberlerden daha fazla olduğunu belirtmişlerdir.

Polimerin asfalt kombinasyonlarında kullanımı 1980'lerde başlamış ve dünyanın birçok ülkesinde test edilmiştir. Öğütülmüş ve öğütülmemiş SBS polimer modifiye ile hazırlanan BSK'lar karşılaştırıldığında, öğütülmüş olanlarda daha iyi sonuçlar elde edilmektedir; laboratuar test sonuçlarına göre, gerilmeye karşı dayanıklılıkta artışlar, yoğunlukta düşüşler, hava boşluğu ve agrega hacminde hafif artışlar vardır (Behbahani vd., 2008).

Ampirik ve sayısal çalışmalar yapıp, bir yıl boyunca BSK'larda SBS katkı maddesinin kullanımını incelemiştir. Sayısal analiz aşamasında sonlu elemanlar programı Abaqus CAE yazılımında kullanıp, Von-Mises gerilmelerini elde ettiler. BSK'da SBS kullanıldığında, karışımların kalıcı deformasyona ve yorulma çatlaklarına karşı rijitliği ve dayanıklılığının bir yıllık sürede arttığı; ancak bu durum materyallerde kırılmalara neden olmuştur. Ayrıca BSK'da SBS katkısının kullanılmasıyla, dayanıklılık özellikleri açısından katkısız BSK'lara göre daha iyi sonuçlar verilmiş olup, sayısal çalışmaların deneysel çalışmaları desteklediği de gözlenmiştir (Karakaş vd., 2016).

Asfalt tabakalarında tekerlek izi derinliğini tahmin etmek için Abaqus ve Ansys programları kullanılarak doğrusal olmayan visko-plastik sonlu elemanlar analizi ile sayısal çalışmalar yapılmaktadır. 2 ve 3 boyutlu modeller, boyuna boyut nedeniyle genellikle modelleme amacıyla kabul edilmektedir (Fang vd., 2004; Abed vd., 2012).

Atık lastiklerden elde edilen pyrolysis carbon black (PCB) bitümde modifiye edici olarak kullanıldığını vurgulamışlardır. Bitümde PCB kullanımı, yüksek sıcaklıklarda kalıcı deformasyonlara karşı direnci artırmıştır. Ayrıca, geri dönüşüm malzemeleri olarak atık lastiklerin kullanılması, kaplamanın performansının artmasına katkıda bulunmuştur (Feng vd., 2016).

Zapién-Castillo vd. (2016) çalışmalarında, SBS/montmorillonit modifiyeli asfalt kullanımının fiziksel ve reolojik özellikler üzerindeki etkisini incelemiştir. Bu kapsamda, modifiyerlerin yüksek sıcaklıklarda segregasyon problemlerini azalttıkları, asfaltın rijitleşmesine önemli katkı sundukları belirlenmiştir

Karataş vd. (2017) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, farklı kalınlıktaki SBS modifiyeli asfalt betonu kaplamaların gerilme ve performans özelliklerini incelemiş, polimerlerin çevresel faktörler altında tekerlek izi, yorulma direnci, rijitlik modülü ve dolaylı kesme gerilmeleri gibi performans özelliklerini iyileştirdiklerini tespit etmiştir.

Huang vd. (2004) çalışmalarında, asfalt kaplamaların farklı tabakalardaki gerilme-deformasyon ilişkilerini ANSYS sonlu elemanlar yazılımı kullanarak nümerik analizler gerçekleştirilmiştir. Çalışmada sürekli deformasyon ve tekerlek izi performans özellikleri incelenmiş, orta tabakalardaki yanal deformasyon ve kesme gerilmelerine karşı bu özelliklerin etkin oldukları belirlenmiştir.

Vijapure vd. (2015) değişik trafik etkileri altındaki asfalt betonu kaplama tabakalarının performans özelliklerini ve mekanik özellik davranışlarını sonlu elemanlar metodu kullanarak belirlemiştir. Çalışmada, kaplama tabakalarında esneklik çekme modülü artışına bağlı alt temel ve temel tabakalarında gerilme dayanımlarında azalma durumunda, kaplama tabakalarında gerilmelerde artış saptanmıştır.

Caia vd. (2015) çalışmalarında, anizotropik malzeme özelliklerinin ve temel tabaka kaplamanın/ara malzemenin mekanik tepkisi üzerindeki etkisini ince film tabakaları araştırılmıştır. Nümerik analiz sonuçlarında ince film tabakalarının anizotropik yapılarının kaplama ve temel tabakaları arasındaki etkilerinin kaplama tabakalarının davranışlarına olumlu katkı sunduğu belirlenmiştir.

Esnek asfalt kaplamanın uygun bir mekanik modelinde araç yüklerin altında nasıl tepki gösterdiğini tahmin edilebilmelidir. Bununla birlikte, modelin deney yöntemleri gibi spesifikasyonları değerlendirmek için malzeme özelliklerini yansıtan malzemeler ve doğrulukları, yük direnci, yükleme tipi, tekerlekler ve kaplamanın arasındaki etkileşim ve dingil ile kaplama yüzeyi arasındaki gerçek temas gibi çeşitli faktörlere bağlı olarak gerçekleşmektedir. Bunun yanısıra kaplama tabakada gerilmeler karmaşık olduğundan, tekerlek yüklemesi genellikle statik ve tek tip basınç olarak kabul edilmektedir (Yoo vd. 2006).

Lippmann (1986) yaptığı çalışmada, tekerleğin altındaki dikey temas gerilmeleri, beklendiği gibi, üniform olmadığı durumu esas alınmıştır. Böylece düşük basıncına sahip bir tekerlekte, tekerleğin içindeki basıncın dikey bileşenleri, tekerleğin yan duvarlarını etkiler ve şişmesine neden olmaktadır. Tekerleğin dış dişleri altındaki temas gerilimini artırırken yüksek basınçlı

tekerlekler için, orta dişlerdeki temas geriliminin yan kısımlardan daha fazla olduğu belirlenmiştir.

Sebaaly vd. (1993) federal Karayolu İdaresi, tekerlek Test Programı (FHWA) tarafından laboratuvar verilerine dayanarak, farklı yükler altında tekerlek dişlerinin her birinin altındaki üniform olmayan yük gerilimlerinin dağılımı için bir diyagram paylaşılmıştır.

Tielking vd. (1987) çalışmalarında, tekerleğin altındaki gerilme dağılımının homojen olmamasının, bir dereceye kadar tekerlek yapısının eğilme sertliğine ve tekerlek tasarımına bağlı olduğunu gösterdi.

Ameri vd. (2016) nanokilin, saf ve SBS ile modifiye edilmiş asfalt bağlayıcı ve karışımının tekerlek izi ve nem hasarları üzerindeki etkisini araştırmıştır. %4 SBS, %2 nanokil ile harmanlandı ve %6 nanokil kullanıldı ve saf ve % 4 SBS ile modifiye edilmiş asfalt bağlayıcı ve karışımları ile karşılaştırarak; dönme viskozitesi, dinamik kayma reometresi, tekrarlanan sünme geri kazanımı, dolaylı gerilme mukavemeti ve dinamik sünme testleri gerçekleştirmenin sonuçları, nanokilin, saf ve modifiye asfalt bağlayıcının tekerlek izi ve nem hasarlarına karşı pozitif etkisi olduğunu gösterdiler.

Howell vd. (1985) sırt ve küf kusurlarının dikey temas gerilmesinin ölçümünü önemli ölçüde etkileyebileceğini göstermiştir.

Chen ve arkadaşları (1990) yol üstyapısı analiz programları üzerinde kapsamlı çalışmalar yürüttüler ve Abaqus yazılımının sonuçlarının diğer programların sonuçlarıyla iyi bir uyum içinde olduğunu göstermiştir.

Seong (2006) ve Anderson (2005) yaptıkları araştırmada, yol üstyapısında çatlaklar, yağmur suyunun kaplamanın altındaki katmanlara nüfuz etmesine neden olur ve üstyapısının dayanımı azalır, kaplama yüzeyinde pürüzlüğe neden olur, yükleme kapasitesini kaybeder, güvensiz ve konforsuz bir sürüşe yol açtığı kanıtlanmıştır.

Chen vd. (1990); Zheng and Xie (2003); Kuo vd. (1995), sonlu eleman yöntemiyle üç Boyutlu bilgisayar destekli programların kullanılması ve yol kaplamanın performansı hakkında temel soruları yanıtlamanın en iyi yolu olarak giderek daha fazla görülmektedir.

Roberts vd. (1996), sıcak karışım asfaltta kalıcı deformasyonları en aza indirebilmek için, daha büyük taneli agregalar, köşeli ve kaba dokulu ve ince agregalar kullanılmalı ve inşaat sırasında yeterli sıkıştırma sağlanmalıdır.

Lu ve Isacsson (2000) polimer modifiye asfalt karışımları, üstyapının hizmet ömrünü %25'e kadar (2-10 yıl daha uzun) artırabilir ve sonuç olarak, yol bakımı ve yeniden inşasının maliyetleri ve süreleri azalır. Polimer modifiye bitümlerin özellikleri, polimerin özelliklerine ve miktarına, bitüm tipine ve polimer ağındaki bağlama işlemine bağlı olduğunu değerlendirdi.

Şengöz ve Işıkyakar (2008) elastomerler gibi SBS polimerleri, bitümün esnekliksini arttırır, bu da onları bitüm modifikasyonu için en uygun polimer yapmasını sundular.

Amerikan Asfalt Enstitüsü (2001) tarafından yapılan araştırmalara göre, polimer modifiyeli asfalt karışımlarının, yaygın asfalt karışımlarına kıyasla çatlamayı % 50'ye kadar ve tekerlek izin oluşumuna % 60'a kadar azalttığını göstermiştir.

Yılmaz ve Çeloğlu'nun (2013) çalışmasına göre, SBS ve diğer doğal bitümlerle modifiye edilmiş bitümün etkinliği dikkate alınarak, SBS polimer en uygun katkı maddesi türü olarak kabul edilmiştir.

Khodary vd. (2020) Kenlayer ve Abaqus sonlu elemanlar programını kullanarak, asfalt betonu kaplamalarda trafik karakterizasyon parametrelerinin tahmini yorulma çatlama performansı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu sonuçlardan açıkça görülmektedir.

Çalışmasında Kenlayer ve Ansys sonlu elemanlar programını kullanarak, esnek üstyapıda dinamik ve statik, yük uygulanıp aşırı ağır kamyonların asfaltta ciddi bir bozulmaya neden olduğu ve dolayısıyla tasarım ömrünü kısalttığı açıkça göstermiştir. Bununla birlikte, yavaş hareket eden trafik, statik yükleme durumuna benzer ve kaldırımda nispeten ciddi bir sıkıntı yaratır. Yükleme uygulama süresinin esnek kaplama üzerinde daha fazla zararlı etkiye sahip olduğu bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar hem yorulma hem de tekerlek izi kritik gerilmelerinin araç hızındaki düşüşle arttığını ve araç hızının 20 km/s ve altına düşürüldüğünde statik yükleme koşullarına benzediğini göstermektedir.

Çalışmasında, Abaqus sonlu elemanlar yazılımı kullanarak, SBS ve selüloz lifinin taşmastik asfaltında zorlayıcı direncine olan etkisine araştırdılar. SBS modifiye karışım, tekerlek izi derinliğinde azalma ile en fazla tekerlek izine dayanıklı karışım olduğunu gösterdiler. Bunun

yanı sıra statik yükleme, döngüsel yüklemeden daha fazla tekerlek izi derinliğine neden olmuştur.

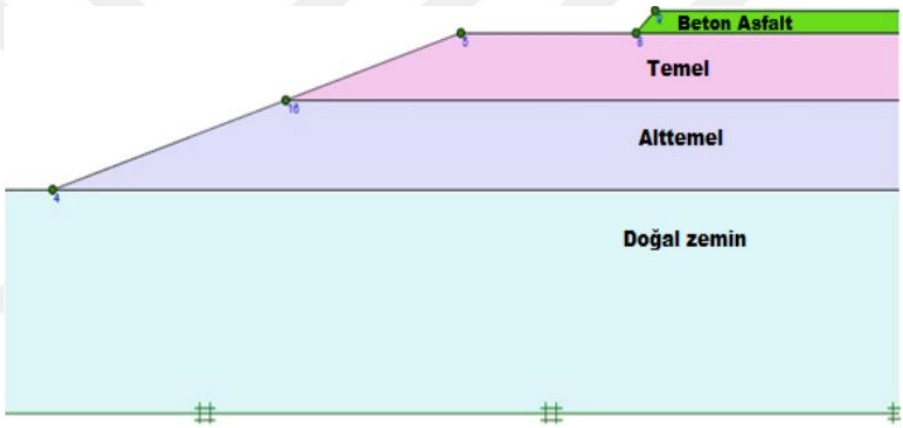
Diğer çalışmalarda ise bitümlü sıcak karışımlarda (BSK) düşük ve yüksek sıcaklık etkisinde oluşabilecek çatlaklar, SBS modifiye ile hazırlanmış BSK kullanılarak azalmakta, tekerlek izi direnci ve yorulma dayanımlarının arttığı tespit edilmiştir.

Yukarıda belirtilen çalışmalar kapsamında literatürde farklı periyottaki TMA yol üstyapı performansının değerlendirilmesi ve irdelenmesi gerektiği anlaşılmıştır.

2. GENEL KISIMLAR

2.1 YOL ÜST YAPISI

Yol üstyapısı, doğal zemin veya dolgu üzerine (taban zemini) üzerine, taşıt yüklerini dağıtma amacıyla yapılan işlenmiş malzemelerden oluşan tabakalı bir sistemdir. Taban zemini doğal zemin veya dolgunun üst yüzeyidir (Karaşahin, 2014). Doğal zemin, hazırlanmış yol dolguları, toprak veya kesilmiş zemin kayaları, mükemmel yoğun ve iyi taneli koşullarda bile, değişen hava koşullarında otomobil tekerleklerinden gelen yüklere dayanacak yeterli dirence sahip değildir. Bu tür zeminlerin yüklenmesi neticesinde kayma dayanağı, kalıcı şekil değiştirme ve bozulmalara neden olur. Yol kaplaması, olası hasarların oluşmasını engeller ve düzgün bir yüzeyde kolay, hızlı, güvenli, emniyetli ve konforlu bir ortam sağlanır (Şekil 2.1).

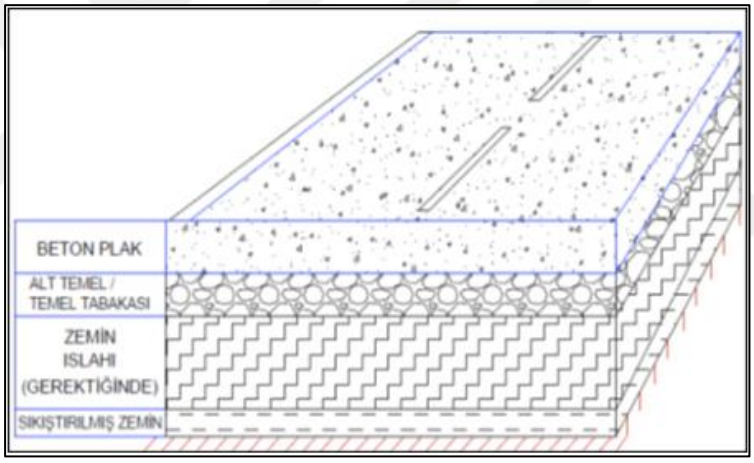


Şekil 2.1 : Tipik yol üst yapısı kesiti (Karadağ vd, 2019).

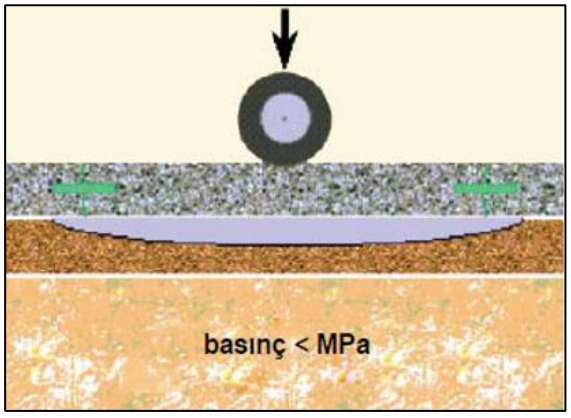
Üstyapının sağladığı fonksiyonları; i. Trafik yükünden dolayı meydana gelen gerilmeleri alt tabakalara dağıtmak ve taban (dolgu) zemine fazla yük gelmesinin önlemek, ii. Rahat ve akıcı bir yüzeyde araç sürümesini sağlamak ve iii. Yol gövdesini tabiatın zararlı etkilerine karşı korunmaktır. Özetle üstyapının amacı, tekerlek yükünün transferinden oluşan gerilme düzeyini, taban zemini taşıma gücünü geçmeyecek şekilde azaltmaktır (Karaşahin, 2014) (Şekil 2.2, Şekil 2.3). Yol üstyapısının katmanları malzemelerinin kalınlığı ve kalitesi, yolun türü ve derecelendirmesine, toprağı direnci, trafik oranı, hava koşulu, malzeme türleri, ekonomik vd. faktörlere bağlıdır. Üstyapı kendi içerisinde rijit (beton) kaplamalı üstyapısı ve esnek (asfalt) kaplamalı üstyapısı olarak iki tipe ayrılmaktadır.

2.1.1 Rijit Kaplamalı Üstyapı

Bu tip kaplamada yol yüzeyi beton ve donatılı betondan (betonarme) oluşur. Taban zemininin iyi bir mukavemete sahip, ağır veya çok ağır trafiğe maruz kalmaması durumlarda beton tabakası kullanılır. Bu durumda betonu üst tabakada veya temel ya da alt temel katmanlarına üzerinde yerleştirilebilir. Beton kaplamada basınç gerilmesi yüksek olduğundan trafik yükünün oluşturduğu deformasyona çok maruz kalmadan yüzeyde oluşan basınç ve kayma gerilmeleri alt tabakaları aktarılmaktadır. Bu tip kaplamada, beton plakası zamanla deforme olup ve alt katmanda gerilme meydana gelir. Ortaya çıkan gerilme, beton gerilme mukavemetinden yüksek ise beton çatlar ve kırılır. Bu nedenle, bu tür kaplamalar güçlendirilmiş bir şekilde tasarlanır ve uygulanır. Rijit kaplamada, beton tabakanın kalitesi ve mukavemeti yüzeyin yük taşıma kapasitesini belirler ve taban zemin mukavemetindeki değişikler daha az rol oynar. (Şekil 2.2, Şekil 2.3)



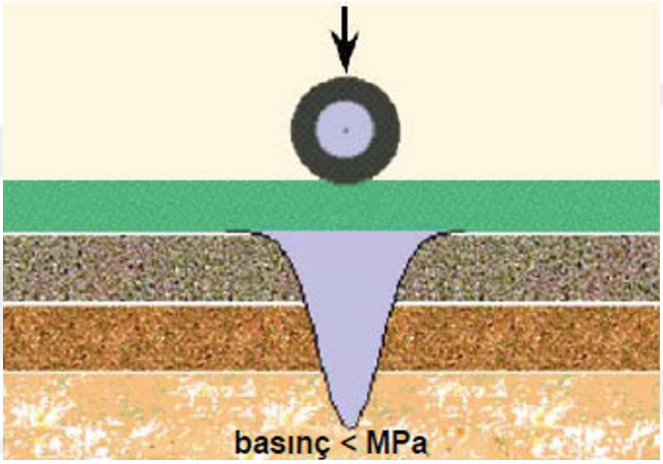
Şekil 2.2 : Rijit üstyapı veya beton kaplama (Mutyılmaz, 2014).



Şekil 2.3 : Rijit üstyapı kesiti ve yük dağılımı (Karaşahin, 2014).

2.1.2 Esnek Kaplamalı Üstyapı

Bitümlü sıcak karışımlar (BSK) yaygın olarak standartlı otoyollar ve kara yolların esnek kaplamasında kullanılmaktadır (Kuloğlu vd. 2006). Söz konusu üstyapısı kaplama (aşınma, binder ve bitümlü temel), temel, alt temel tabakası ve taban zeminden oluşmaktadır. Asfalt kaplamanın kesme dayanımı iyi olmasına karşın çekme dayanımı çok düşüktür. Asfalt kaplama üzerindeki yükler beton kaplamaya göre nispeten daha küçük ve üstyapıya daha az gerilme aktarmaktadır. Şekil 2.4 ve Şekil 2.5'te esnek üstyapı kesitleri ve gösterdiği davranışı sunulmuştur.



Şekil 2.4 : Esnek üstyapı kesiti ve yük dağılımı (Karaşahin, 2014)



Şekil 2.5 : Esnek üstyapı veya asfalt kaplama (Kara, 2012).

2.1.2.1 Taş Mastik Asfalt

Taş mastik asfalt (TMA), yoğun trafik yollarında yolların ömrünü uzatmak için kullanılan, yüksek dayanımlı sıcak asfalt karışımıdır (Şekil 2.6). Bu, asfalt çimentosu, dolgu maddesi ve selüloz elyaflarının zengin bir karışımı ile bir arada tutulan, taş üzerinde stabil bir taş iskelet sağlar, ilk olarak 1960'ların başında Almanya'da geliştirilmiştir ve birçok ülkede daha iyi iz işaretleri sağlamak için kullanılmıştır. Yollarda çivili lastiklerin neden olduğu direncin, ağır kamyon trafiğine ve aşınmaya karşı son derece etkili olduğu kanıtlanmıştır. Bazı Amerikan eyaletleri, 1990'lardan itibaren federal karayolu idaresi ile iş birliği içinde Avrupa'da TMA'yı kullanmaya ve geliştirmeye başlamıştır. O zamandan beri TMA, Avrupa, Kuzey Amerika ve Asya'da yaygın olarak kullanılmaktadır (Talati, 2014). TMA, Avrupa'da yoğun trafiğe sahip yolların, hava meydanlarının ve liman bölgelerinin yüzey kaplaması için popüler bir asfalttır.

TMA'in, geleneksel yoğun dereceli asfalta göre birçok avantajı aşağıda detaylandırılmıştır; yavaş, yoğun ve yüksek hacimli trafiğin neden olduğu bozulmalara karşı direnci artırır. Yüksek sıcaklıklarında kaplama deformasyona karşı direncini ve düşük sıcaklıklarda yorulma deformasyonuna ve çatlamaya karşı direnci artırır. Kayma direncini artırır, pürüzlülüğü azaltır, dayanıklılığı artırır, geçirgenliği ve neme karşı hassasiyeti azaltır.

Yüksek bağlayıcı içeriği (yavaş yaşlanma) nedeniyle iyi dayanıklılık, geleneksel karışımlara göre daha uzun hizmet ömrü (%20'ye kadar) ile sonuçlanır. İyi esneklik ve yorulmaya karşı direnci sahiptir. Düşük sıcaklıkta iyi performansı, iyi aşınma direnci, iyi yüzey dokusuna aittir. TMA'lar karayolu trafiğindeki ve aks yükündeki olağanüstü artış, bitümlü kaplamaların tasarım döneminden daha erken bozulmasında önemli bir etkiye sahiptir.

Hizmet ömrü boyunca, bağlayıcı malzemelerin oksidasyonu nedeniyle bağlayıcı yaşlanır ve sertleşir. Genellikle, yaşlanmış bağlayıcının sertliğini azaltmak için katkı malzemesi eklenir.

TMA kaplamalar Türkiye'de 1999'dan beri kullanılmaktadır. Karayolları Genel Müdürlüğü'nün (KGM) 1999 yılında yapmış olduğu deneme kesimleri sonucunda TMA'nın olumlu katkıları olduğu görülmüştür. İlk başlarda maliyetinin fazla olması, temin edilmedeki zorluklar, birim fiyatların tespit edilmesinde meydana gelen sorunlar nedeniyle yaygın olarak kullanılamamıştır. Daha sonra 2003 yılında İSFALT bu çalışmaları sürdürmeye devam etmiştir. TMA'nın genel yapısı; %70-80 oranlarında kaba agrega, %20-30 oranlarında ince agrega, %6-7 oranlarında bitüm ve Selülozik elyaftır.



Şekil 2.6 : Taş mastik asfalt (ISMAEL, 2020)

2.2 ESNEK YOL ÜSTYAPISI TABAKALARI

Esnek (Asfalt) yol üstyapısı tabakaları alt başlıklarda detaylandırılmıştır.

2.2.1 Kaplama

Kaplama katmanı en çok trafik yüklerini maruz kaldığından dolayı daha çok deformasyon, gerilme ve çevresel etkilere maruz kalmasına bağlı olarak, bu kaplama tabakası en yüksek esneklik modülüne sahiptir. Kaplama tabakasın esas görevi, yol üst yapısının trafik yüklerin sebep olduğu aşındırmaya karşı dayanımını artırmak, alt tabakalara daha az basınç ve kayma gerilmesi iletilmesi, yüzeyde bulunan suların alt tabakalara geçmesini önlemek, güvenli ve konfor bir sürüş sağlamak ve kalıcı şekil değiştirmeye karşı önlemektir (Umar ve Yayla 1994). Genellikle kaplama tabakası, agrega ve bitümün karışımından yapılır. Kaplama tabakası kendi içinde aşınma, binder ve bitümlü temel tabakası olmak üzere üç tabakadan oluşur. Trafik yükünün yüksek mertebede olmadığı yollarda kaplama tabakası, sathi kaplamadan kullanılır. Kaplama katmanın esas görevleri:

- Trafik yükün neden olduğu deformasyona karşı dirençli olmak
- Temel ve alt temel katmanlarına aktarılan basınç ve kayma gerilmelerini azaltmak
- Temel ve alt temel katmanlarının su geçirmesini önlemek
- Konfor ve güvenli bir sürüş temin etmek
- Kalıcı deformasyonlara karşı yola korunması
- Üstyapı katmanlarının mukavemetine katkıda bulunmak

olarak belirtilebilir. Taban zeminin mukavemet ve kalitesi asfalt kaplamanın dayanımında etkin bir role sahiptir. Şekil 2.7 ve Şekil 2.8 kaplama tabakasında asfalt betonu BSK ve TMA serme uygulamasını gösterilmektedir.



Şekil 2.7: Bitümlü sıcak karışım uygulaması (Karaşahin, 2014).



Şekil 2.8 : Taş mastik asfalt uygulaması (ISMAEL, 2020).

Esnek üst yapılar üç farklı tipte olmak üzere, Full Depth asfalt kaplama, Konvansiyonel asfalt kaplama ve Contained Rock asfalt kaplama şeklinde inşa edilir. Esnek kaplama tipleri alt başlıklarda detaylandırılmıştır.

Full Depth asfalt kaplama: Esnek asfalt kaplama türlerinden biridir. Bu tür asfalt kaplamada temel kullanılmaz, sadece asfalt tabakaları doğrudan kaplama tabakasına yerleştirilir. Bu kaplama tipi, yoğun yağış alan bölgeler veya kış donlarının meydana geldiği alanlar için uygun ve ömrü uzundur.

Konvansiyonel asfalt kaplama: Bu kaplama, alt temel, temel ve asfalt (yüzey katmanı olarak) olmak üzere üç bağımsız katman halinde yapılır. Bu tip kaplamalarda, taban zemini, kaplamanın sağlamlığında belirleyici bir role sahiptir.

Contained Rock asfalt kaplama: Bu tip kaplama dört farklı katmandan oluşur. En üstte sıcak asfalt tabakası altında ince ve kalın granüller (agrega) malzeme tabakası, bir alt tabakada iyice sıkıştırılmış taban zemin üzerinde asfalt kaplama tabakasında inşa edilir.

Yarı-Rijit Kaplama: Rijit ve esnek kaplamanın birleşimi olan kaplamaları yarı rijit kaplama olarak adlandırılır. Örneğin rijit veya beton kaplama ile tasarlanan havalimanlarının kaplamasında, beton levha genellikle bir asfalt (bitüm) tabakası üzerine yerleştirilir. Havalimanlarında ya da yollarında sert veya esnek prosedürler kullanılır. İyileştirilirken ve güçlendirilirken duruma göre ve tasarımın özel koşullarına göre sırasıyla esnek veya sert yüzeyle kaplanır. Esasında yarı rijit kaplamalar da, asfalt olmayan farklı kaplamalardan, beton kaplama veya asfalttan oluşur.

2.2.2 Temel

Alt temelin üzerinde ve kaplama katmanın altında belirli malzeme özelliklere ve kalınlığa göre inşa edilen ve kaplama tabakasına göre daha az gerilmeye maruz kalmaktır. Temel ve alt temelin esas görevleri altı maddede özetlenebilir:

- Kaplamada uygulanan yükleri zemine dağıtmak ve bu şekilde tabanda kesme ve oturma deformasyonları daha dirençli olunması
- İyi bir drenaj sağlanması
- Don etkisini azaltabilme fonksiyonları sahip bir üstyapı tabakasıdır.
- Uzun zamanlı oturmalarda esnek bir yapı oluşturulması
- Kaplama inşaatının maliyetinin azaltılması ve hızlandırılması
- Asfalt tabakasının inşası için pürüzsüz bir yüzey temin edilmesi

Karayollarında i. Granüller temel, ii. Plent-miks temel, ve iii. Çimento bağlayıcılı granüller temel olmak üzere üç tip temel tercih edilmektedir.

2.2.3 Alt Temel

Alt temel genellikle üstyapının üzerinde yer alan ilk katmandır. Bu tabakada malzemeler belirli fiziksel özelliklere ve kalınlığa sahip, üstteki katmanlara göre daha az gerilmelerin etkisinde

kaldığı için düşük kaliteli ancak yer altı suyunu uzaklaştırma kabiliyeti yüksek olan granüller malzemelerden oluşmaktadır (Şekil 2.9).



Şekil 2.9 : Yol üstyapısı temel ve alt temel tabakaları hazırlanması (Karaşahin, 2014).

2.2.4 Taban

Yol üstyapı, sıkıştırılmış dolgu yüzeyi, kazılar, mevcut tabii veya modifiye edilmiş zemin olup en alt tabakada yer almaktadır. Taban toprağının kalitesi, yük taşıma kapasitesi, iklim, çevresel ve doğal koşullara karşı duyarlılığı üstyapı katmanlarının seçiminde önemli rol oynamaktadır. Trafik yükünün tekerrür etmesinden dolayı, üstyapıda radyal çekme, basınç gerilmeleri ile düşey basınç gerilmeleri oluşur. Burada, gerilmelerin mertebesi ve şiddeti tekerleklerin tekerrür etkisine bağlıdır (Şekil 2.10).



Şekil 2.10 : Yol üstyapısı taban zemini hazırlanması (Karaşahin, 2014).

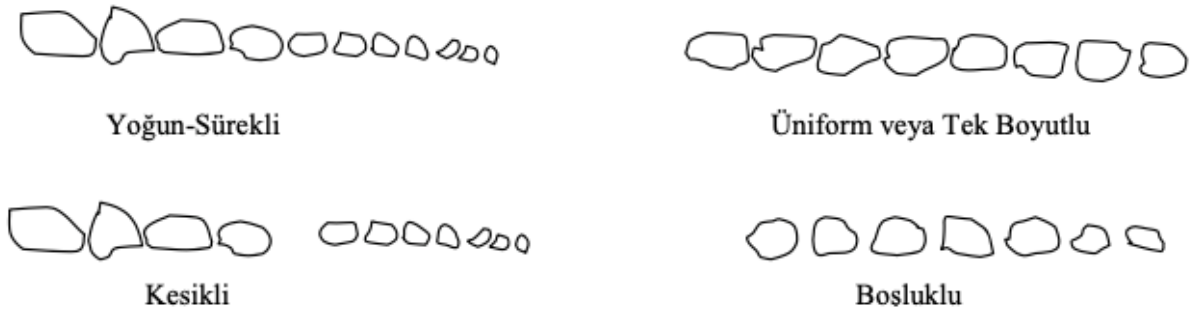
2.3 AGREGALAR

Agregalar yol yapımında ana malzemesi olarak önemli bir rol oynayıp, bağlayıcısız karışım tabakalarda veya bitümlü karışımların üretiminde kullanılabilir. Ayrıca katmanların üzerindeki trafik yüklerden dolayı oluşan gerilmeleri de taşımaktadır. Agregaların mühendislik açısından özellikleri, formu (biçim ve köşe) ve yapısı, kaplamanın genel performansını önemli ölçüde etkiler. Bazı araştırmacılar, agregaların biçiminin ve yüzey dokusunun, bitümlü karışımların mekanik özelliği üzerinde önemli bir role sahip olduğunu bildirdiler, örneğin kayma direnci, dayanıklılık, sertlik, yorulma direnci, tekerlek izi direnci, işlenebilirlik, bitüm içeriği vb. Agregalar genellikle sert malzemeler olduğu için basınç dayanımı yüksek olmasını sağlamaktadır. Belirli bir gradasyona ve kaliteye sahip kayaç parçaları, çakıl, kırmataş, kum ve benzeri mineral ile bağlayıcı (bitüm, beton, harç, makadam vb.) karışımı veya belirten malzemelerin bağlayıcısız kullanılmak üzere birleştirilmiş şekline agrega denir. Agregalar menşeine göre Doğal Agregalar (kum, çakıl ve kırma taş) ve Suni-Yapay Agregalar (yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve perlit) olmak üzere iki sınıfa ayrılır:

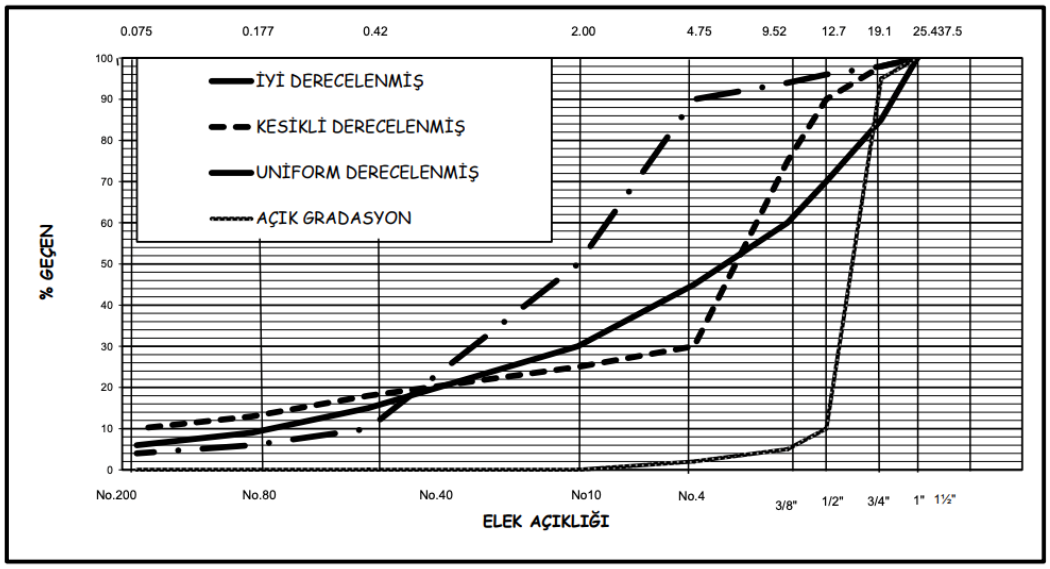
2.3.1 Agrega Gradasyonunun Belirlenmesi

Tanelerin çapının ölçülmesi ve yoğunluk oranlarının saptanması olarak tanımlanan gradasyonun (granülometri) amacı, yığında bulunan toplam malzeme miktarını ve boyutunu belirlemek ve bu oranların granülometri sınırlarında olup olmadığını belirlemektir. Numunenin içeresinde sabit hacimli ve çeşitli boyutlarda agrega tanelerin olmasından dolayı taneler

arasında, daha az boşluk oluşur. Agrega granülometrisi, elek analizi yöntemi ile belirlenmektedir. Agregalar gradasyonu dört gruba ayrılmaktadır i. Yoğun (İyi) gradasyonlu Agrega, ii. Kesikli gradasyonlu agrega, iii. Açık gradasyonlu agrega, iv. Tek boyutlu (üniform) agrega (Şekil 2.11, Şekil 2.12).



Şekil 2.11 : Gradasyonlu agrega tipleri (Tunç, 2004).



Şekil 2.12 : Gradasyonlu agrega tiplerin grafiği (Orhan, 2012).

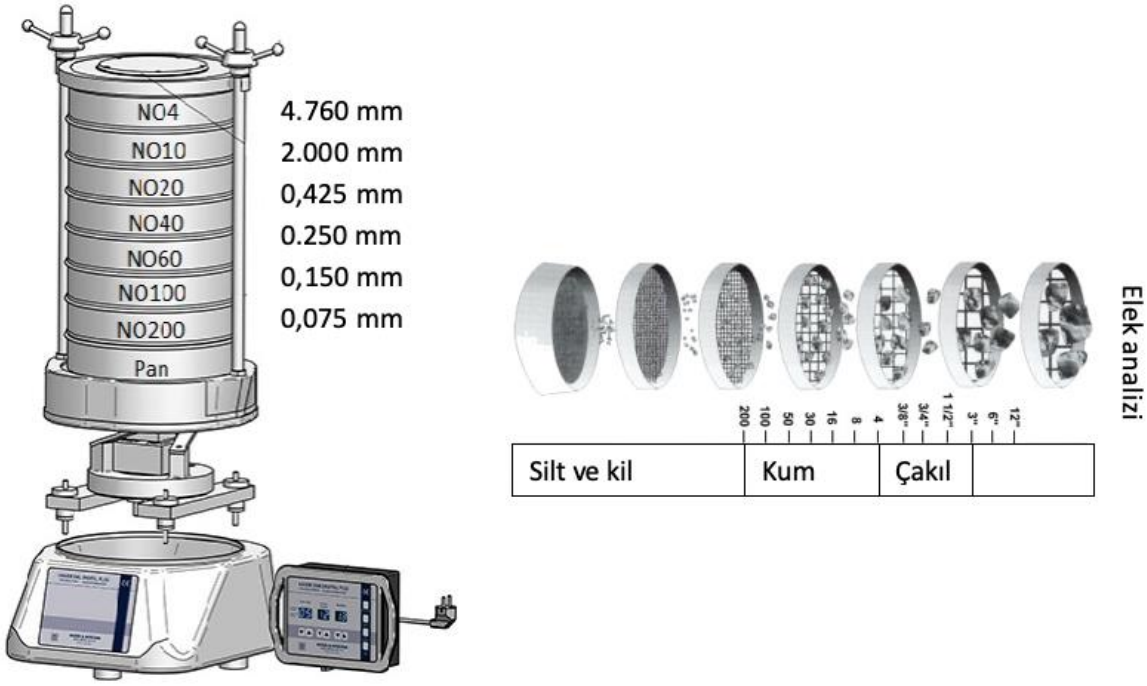
2.3.2 Elek Analizi

Varsayılan numuneleri 24 saat boyunca etüvde, (1055)°C sıcaklıkta kurutulur. Elek analizi yapabilmek için standart ölçüdeki elekleri ASTM veya TSE standartlarına ve elek setine göre büyük numaradan küçüğe doğru, yukarıdan aşağıya yeşerttirilir (Şekil 2.13). Fırından alınan kuru numuneleri farklı eleklerin üzerine dökülerek manuel (el ile sarsma) veya otomatik eleme yöntemi kullanılır. Eleme işleminden sonra, her bir elek üzerinde kalan malzeme miktarı ayrı ayrı tartılıp kayıt altına alınır ve hangi tane boyutunda ne kadar malzeme bulunduğunu

belirlemek için bir tablo oluşturulur. Agrega derecelendirmesinde kullanılan standart elek boyutları Tablo 2.1'de verilmiştir.

Tablo 2.1: Elek açıklığı ve tane boyutları (Orhan, 2012).

1 1/2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	No.4	No.10	No.40	No.80	No.200
38,100 mm	25,400 mm	19,100 mm	12,700 mm	9,520 mm	4,760 mm	2,000 mm	0,420 mm	0,177 mm	0,075 mm



Şekil 2.13 : Elek analizi aletleri (WSEA, Aralık 2020).

2.3.3 Agrega Tipleri

Kum, kırılmış veya kırılmamış çakıl, kırılmış veya toz taş ve cüruf gibi bitümlü kaplama, beton, granüller temel ve alt temel inşaatında kullanılan sert ve sağlam doğal mineral bir araya getirilmiş şekline mineral agrega denir. Mineral agrega 4.760 mm, No: 4 elek içinde kalan agregalara Kaba, 4.760mm – 0.075mm elekler içinde kalan agregalar ince ve 0.075mm elekten geçen agregalara filler denir. Agregalar boyutlarına göre üç gruba ayrılıp, kaba agrega, ince agrega ve mineral filler olarak tanımlanmaktadır (Şekil 2.14).



Şekil 2.14 : Çeşitli agrega tipleri.

2.3.4 Bitümlü Kaplamalarda Kullanılan Agregalar Özellikler

Bitümlü kaplamalarda kullanılan agregalar, yol üstyapının alt tabakalara göre daha çok çevresel ve trafik etkileri maruz kaldığı için kullanılan agregalar daha uygun ve yüksek kaliteli olmalı. Düz ve ince agrega taneciklerin sınırlandırılması, Sıcak karıştırılmış asfaltın kullanım ve inşaat sırasında ve trafik yükü altındayken agregalar kırılmaya duyarlı olmamasını sağlar ve karışımın ayrışmasını azaltır. İnce agregalardaki kil miktarının sınırlandırılması, asfalt ile agregalar arasındaki yapışkan bağı güçlendirir (Roberts vd. 1996; Asphalt Institute 2001).

Bu durumda agregaları malzemelerin imal edebilirliği, kalitesi ve maliyetini göz önünde bulundurarak, aşağıdaki özelliklerine göre belirlenmelidir.

Granülometri ve tane büyüklüğü: Agrega tane büyüklüğüne göre hangi tabakada kullanılacağı belirlenir.

Temiz oluşu: Agregalarda Toprak tozu, bitki kalıntıları ve yabancı maddeden arındırılmalıdır.

Tane şekli: Köşeli ve kırılmış agrega tipi seçilmelidir (Şekil 2.15).

Yüzey karakteri: Trafik taşıma yük kabiliyetini etkiler (Şekil 2.16).

Gözeneklilik: Absorpsiyon ve bitüm oranını etkiler (Şekil 2.17).

Dayanaklılık: Degradasyon, bitüm oranı, don ve su etkilerin ayrışmaya karşı dirençli olmalıdır.



Şekil 2.15 : Agregaların tane boyutu ve şekli (Orhan, 2012).



Şekil 2.16 : Agrega tanelerin yüzeysel yapısı (Orhan, 2012).



Şekil 2.17 : Agrega tanelerin gözeneklilik tipleri (Orhan, 2012).

2.4 BİTÜMLÜ BAĞLAYICILAR

Bitümlü bağlayıcılar asfalt yapımında kullanılan siyah, yapışkan, yüksek viskoziteli sıvı, katı veya yarı katı kıvamında bir petrol malzemesidir ve çoğunlukla petrolün oksidasyonu sonucunda elde edilir. Bitüm petrol kökenli olup, %2 oksijen, %11 hidrojen ve %87 karbon içerir, doğal veya yapay kaynaklarda bulunabilir ve zift (katran) olarak sınıflandırılır. Doğal halde bulunan asfaltlar iki ana menşei kaya ve gölden bulunur, yapay asfaltlar ise rafinasyon'da ham petrolün çökeltinden elde edilir. Bitüm, yol yapımı ve yalıtımda yaygın olarak kullanılmaktadır. Üretilen bitümün yaklaşık %90'ı yol yapımı alanında ve %10'unu da yalıtım alanında kullanılmaktadır. Bitüm bağlayıcılar iki ana gruba ayrılır, Asfaltlar ve Katranlar.

2.4.1 Bitüm Özellikleri

Bitüm oda sıcaklığında katı ve sıcaklık arttığında yavaş yavaş sıvılaşır, dolaysıyla özellikleri sıcaklıkla değişir. Veya sıcaklık artırttığında viskozitenin, sıkıştırma işlemi sırasında malzemelerin arasında yağlama sağlayarak yeterli sıkıştırmaya izin verdiği belirli bir aralık oluştur, ki düşük sıcaklıkta, agregaların hareket etmek için gerekli yoğunluğa sahip olmuyor ve hareket etmesini engeller. Ayrıca yapışkanlığında dolayı kohezyon ve adezyon özelliğini

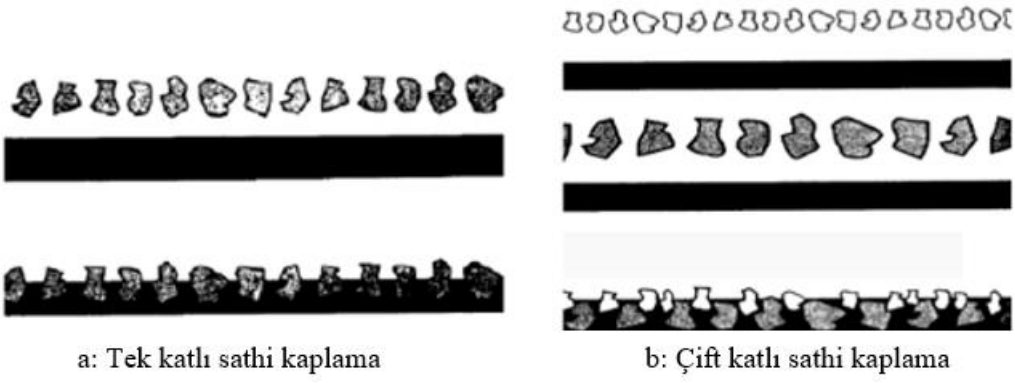
sahiptir. Kohezyon sayesinde, çatlama ve ayrılma olmadan şekil değiştirebilir ve Adezyon ise yapışma özelliğini sahiptir.

2.4.2 Bitümlü Kaplamalar

Bitümlü kaplamalar, Sathi kaplamalar ve Bitümlü karışımlar olmak üzere iki sınıfa ayrılır.

2.4.3 Sathi Kaplamalar

Sathi kaplamalarda bağlayıcı ve agrega her biri ayrı bir şekilde yolda serilip ve sıkıştırılır, bu kaplamaların kalınlığı 25 mm'den az olur, dolaysıyla iyi ve güçlü bir temel ve alt temele ihtiyacı var. Sathi kaplamanın iki tipi var (Şekil 2.18): a. Tek katlı sathi kaplama, b. Çift katlı sathi kaplama



Şekil 2.18 : Sathi kaplama uyulama tipileri (Caltrans Division of Maintenance, 2003)

2.4.3.1 Sathi Kaplamaların Kullanış Amaçları

Aşınmış ve sıyrılmış yüzey katmanları, iyileştirmek için sathi asfalt kaplama kullanılır.

Maliyeti az ve hafif trafikli yollarda kullanılır.

Su ve rutubeti alttaki katmanlara nüfuz etmesini önleyip ve su geçirmez bir katman sağlar.

Bozulmuş kaplamaların bakım ve onarımında kullanılır. Mesela yapısal veya termal çatlakları olan yollarda sathi asfalt kaplama kullanarak çatlakların büyümesini durdurur veya yavaşlatır.

Bitüm veya agregaların aşınması nedeniyle pürüzsüz ve kaygan bir yüzeye sahip olan asfalt yüzeyler, uygun sürtünmeli ve kayma karşı direncin yüksek bir yol yüzeye ulaşmak için sathi asfalt kullanılır.

2.4.4 Bitümlü Karışımlar

Bitümlü karışımlar (kaplamalar), belli bir miktarda agrega ve bitüm karışımından oluşur ve genellikle kaplama (aşınma, binder ve bitümlü temel) katmanlarında kullanılır. Kaplama tabakası trafik yükü fazla maruz kaldığından dolayı oluşan gerilme de fazladır, üstelik çevresel koşullar etkisinde de kalmaktadır, bu yüzden kaplama tabakası (bitümlü karışımlar) alt tabakalara göre daha durabil ve stabil olması gerekmektedir.

2.4.4.1 Bitümlü karışımların sınıflandırılması

İşlem sırasında kullanılan bitümün ısıtılmasına sıcak karışım ve ısıtılmamasına soğuk karışım asfalt denir.

2.4.4.1.1 Soğuk Karışım Asfalt

Soğuk Karışım Asfalt (Bitümlü Soğuk Karışım), oda sıcaklığında karıştırılan agrega ile bitüm veya bitüm emülsiyonunun karışımıdır ve aynı sıcaklıkta yayılır ve yoğunlaşır. Soğuk agrega, Bitüm ile karıştırma süresi nemli olabilir, ancak sıvı asfalt sıcaklığı agreganın nemini kurutacak kadar olması gerekmektedir. Soğuk karışım asfalt uzun mesafelere taşınabilir ve daha sonra yayılabilir veya depolanabilir ve daha sonra kullanılabilir. MC-3000 veya SC-3000 gibi bitümlerle hazırlanana soğuk asfalt karışımları, 95°C veya daha yüksek bir sıcaklıkta bitümle karıştırılır ve aynı sıcaklık aralığında yayılır ve sıkıştırılır. Türkiye'de bitümlü soğuk karışım çok yaygın değil, fakat kış mevsiminde acil tadilat yapılması gereken yerler, ekonomik olmayan veya asfalt pletinin olmadığı durumlarda soğuk asfalt karışımı az miktarda küçük alanlarda kullanılır. Soğuk asfaltlar i. Asfalt hazırlama ve uygulama yöntemi, ve ii. Soğuk asfalt granülasyonuna göre sınıflandırılabilir:

2.4.4.1.2 Sıcak Karışım Asfalt

Sıcak karışım asfalt (Bitümlü Sıcak Karışım), bir plentte agregalar beli gradasyon limitlerle ısıtılıp ve belirli sıcaklıkta ısıtılan asfalt bağlayıcı karışımından bitümlü sıcak karışım meydana gelir. Aynı sıcaklıkta temel, alt temel, beton kaplamalar gibi istenilen tabakaların üzerinde ve yüzeylerde kullanılır. Otobanlar, Karayolları ve havalimanılar 'da yapılan esnek kaplamaların üst katmanında BSK kullanılır. Sıcak karışım asfaltta kalıcı deformasyonları en aza indirebilmek için, daha büyük taneli agregalar, köşeli ve kaba dokulu ve ince agregalar kullanılmalı ve inşaat sırasında yeterli sıkıştırma sağlanmalıdır (Robert vd. 1996).

Bitümlü sıcak karışımların agrega tane boyutuna göre sınıflandırılır (Şekil 2.19):

i. Açık Gradasyonlu Karışımlar
ii. Kesikli Gradasyonlu Karışımlar
iii. Yoğun Gradasyonlu Karışımlar
iv. Harç Tipi Karışımlar



Şekil 2.19 : Gradasyonlu karışım tipleri (Austrodus, 2000).

Açık gradasyonlu karışımlar: İnce agrega oranı az, boşluk oranı %12'den fazladır. Örneği: Makadam türü kaplamalar.

Kesikli gradasyonlu karışımlar: Eleğin bazı yerlerinde malzeme oranı az ama bazı yerlerde ise malzeme oranı fazladır. Boşluk oranı %(8–12) arasındadır ve yapıldıktan sonra pürüzlü bir yüzeye sahiptir.

Yoğun gradasyonlu karışımlar: Agrega tane boyutları düşük boşluk verecek şekilde süreklilik gösterir. Boşluk oranı %8'den daha azdır. Örneği: bitümlü temel tabakası ve asfalt betonu.

Harç tipi karışımlar: İnce agrega ve mineral fillerin oranı oldukça yüksektir. Boşluk oranı çok azdır, yüksek bitüm yüzesi fazla olduğundan dolayı düşük penetrasyonlu asfalt kullanılır.

2.4.4.1.3 Sıcak ve Soğuk Karışım Asfaltın Karşılaştırılması

- Sıcak asfalt, agrega ve bitüm asfalt plenti'de ısıtılıp ve karıştırılıyor, soğuk asfalt ise agregaların oda sıcaklığında çözülebilir bitüm ile karıştırılıp kullanılır.
- Sıcak asfalt, fabrikada üretilen hemen hemen aynı sıcaklıkta yüzeylere döşenir ve uygulanır, ancak soğuk asfalt, oda sıcaklığında veya sıcaklığın etkisi altında kurutulup kullanılmalıdır.
- Sıcak asfaltın kullanımı için zaman ve yer sınırı vardır, ancak soğuk asfalt, uzun mesafelere taşınabilir ve yayılabilir veya depolanabilir ve gerektiğinde kullanılabilir.

2.4.4.2 Bitümlü Kaplamaların Fiziksel ve Mekanik Özellikler

Bitümlü karışım kaplamalarda istenilen süre içinde bozulmadan beklenen sonucu verilmesi için beli özellikleri sahip olması gerekmektedir. Bu özellikler Teknik Şartnamesine uygun olmalıdır. Dizayn sırasında dikkat edilmesi gereken özellikler: i. Stabilite, ii. Durabilite (Dayanıklılık), iii. Geçirimsizlik, iv. İşlenebilirlik, v. Esneklik, vi. Yorulmaya karşı direnç, vii. Kaymaya karşı direnç olarak alt başlıklarda detaylandırılmıştır.

2.4.4.2.1 Stabilite

Trafik yüklerin altında oluşan deformasyonlara karşı gösterdiği dirençtir. Stabilite değeri bitümlü karışımlarda ne yüksek ne düşük olmalı, trafik yükü karşılayacak kadar yüksek olmalıdır. Stabilite değeri yüksek olduğu zaman bitümlü karışım çok sert olur, esneklik azalır, kırılgan davranış sergiler ve çatlaklar oluşur. Stabilite değeri düşük olduğu zaman ise bitümlü sıcak karışımlar düşük mukavemet değeri sergilemektedir.

2.4.4.2.2 Durabilite

Esnek üstyapının, oksidasyona ve karışımdaki agregaların parçalanmaya karşı direncini durabilite (dayanıklılık) denir. Veya bitümlü karışımda trafik yükü ve çevresel koşullun oluşturduğu aşındırmaya karşı dirençtir. Asfalt özelliklerin değişimi, agregaların kırılması ve asfalttın agrega yüzeyinden soyulmasına karşı gösterdiği mukavemettir (Şekil 2.20). Bitümlü karışımda bağlayıcı oranı artırılsa, durabilite de artırılır böylece hava boşlukları azalır ve kaplamadan su ve hava girmez.



Şekil 2.20 : Esnek üstyapıda soyulmanın genel görünümü (Karaşahin, 2014).

2.4.4.2.3 Geçirimsizlik

Kaplamada hava ve suya karşı sergileyen direnci, geçirimsizlik denir ve karışımda hava yüzdesi ile belirlenir. Geçirimsizlikte boşluk oranından ziyade boşlukların karakterleri (boşlukların boyutu, birbirleri ile bağlantı seviyesi) daha önemli rol oynamaktadır. Geçirimsizlik yüzdesi yükseldikçe, kaplamadaki boşluklar suyla dolar ve sonra dönme ve çözünmeyi neden olur, taneler arasında bozulma oluşup ve kaplama da olumsuz etkiler meydana gelir.

2.4.4.2.4 İşlenebilirlik

Karşımda hazırlama, sergileme ve sıkıştırmada gösterilen kalaylıktır veya karışımda agregaların yer değiştirmesini karşı gösterdiği dirençtir. Karışımda iri taneli agregaların oranı fazla ise pürüzlü bir yüzey oluşur, sıkıştırma ve sergilemesi zorlaşır dolaysıyla işlenebilirlik azalıyor. Karışımda filler yüzdesi yüksekse, karışım kuru görünür durabilite olmaz ve işlenmesi zorlaşır, bu durumda da işlenebilirlik azalır.

2.4.4.2.5 Esneklik

Alt tabakalarda meydana gelen oturmalar (çökmeler) çatlamadan, deformasyona karşı koyabilmesine esneklik denir. Yetersiz esneklik yolda çatlamalara neden olur. Bitüm ve gradasyon oranı esnek davranışta olumlu etkilere sahiptir.

2.4.4.2.6 Yorulmaya Karşı Direnç

Kaplamada tekrarlanan eğilmelere (deformasyon) karşı koyabilen dirençtir. Karışımda boşluk oranı fazlaysa, yetersiz sıkışma varsa veya asfalt sert ve yaşlandıysa, yorulmaya karşı

mukavemeti azalır. Bu nedene bağlı olarak boşluk oranı ve asfaltın viskozitesi yorulma mukavemetinde anlamlı mertebede etkilidir.

2.4.4.2.7 Kaymaya Karşı Direnç

Bu parametre, farklı iklim koşullarında, özellikle yağışlı havada araçların güvenli bir fren mesafesi ve araç tekerleğin kaymamasını sağlayan bir direnç olarak tanımlanmaktadır. Başka bir ifadeyle, kaplama yüzeyinde yeterli miktarda sürtünme sağlanmalıdır. Yollarda yüksek kayma direnci elde edebilmek için karışımda, agrega daneleri sert ve pürüzlü olmalı, ayrıca gradasyonda orta malzeme miktarı yüksek olmalıdır. Bitüm oranı fazla ve yoğun gradasyona sahip karışımda, kusma meydana gelerek kayma direnci düşmesine yol açar.

2.4.5 Marshall Metodu ile Bitümlü Sıcak Karışım Dizaynı

Marshall Metodu, kolaylığı nedeniyle Türkiye ve dünyada en çok kullanılan karıştırma yöntemidir. Bu yöntemde, sıcak karışım asfalt, bir plentte agregaların belli gradasyon limitlerinde ısıtılıp ve belirli sıcaklıkta ısıtılan asfalt bağlayıcı karışımından bitümlü sıcak karışım meydana getirilmektedir.

2.4.5.1 Marshall Deneyinin Amacı

Deneyin amacı, basınç dayanımı belirlenmesi ve bitüm oranı ile yoğunluk, özgül ağırlık ve boşluk oranın arasındaki ilişkileri grafik ile belirlenmesidir.

2.4.5.2 Marshall Metodu ile Karışım Dizayn Aşamaları

Marshall Metodu ile Karışım Dizayn Aşamaları sırasıyla, i. Agrega seçimi, ii. Asfalt bitümünün seçimi, iii. Asfalt karışımı numunelerinin (briketlerinin) hazırlanması, iv. Sıkıştırılmış numuneler (briketler) testi, v. Asfalt karışımlarının sıkıştırılması, vi. Sıkıştırılmış numuneler (briketler) testi, vii. Numunelerin (briketlerin) hacimsel özelliklerinin hesaplanması, viii. Karışımın dizayn kriterleri, ix. Optimum bitüm miktarının belirlenmesi olarak alt başlıklarda detaylandırılmıştır.

2.4.5.2.1 Agrega Seçimi

Kullanılan agreganın tane boyutu (aşınma direnci, kırılma yüzdesi vb.) özellikleri içermelidir.

2.4.5.2.2 Asfalt Bitümünün Seçimi

Kullanılan bitüm, AASHTO’da belirtilen kriterleri ve özellikleri karşılamalıdır.

2.4.5.2.3 Asfalt Karışımı Numunelerinin Hazırlanması

Her agrega ve bitüm kombinasyonlarından en az üç adet briket numune hazırlanır. Her üçlü seri için yine şartname değerlerine göre artış gösteren 6 farklı bitüm oranı kullanılmıştır.

2.4.5.2.4 Asfalt Karışımlarının Sıkıştırılması

Asfalt karışımı, 101,6 mm çapındaki silindirik bir kalıpta 4,5 kg ağırlığındaki Marshall çekiçle sıkıştırılır ve numunenin her tarafına belirli sayıda darbe için 475 mm yükseklikten düşürülür. Sıkıştırılmış numune 101.6 mm çapında ve yaklaşık 63.5 mm yüksekliğindedir. Her taraf için kullanılan vuruş sayısı başına, tasarlanan hafif orta veya ağır trafik koşullarını yansıtmak için 35, 50 ve 75'tir. Karışımın sıkıştırılması, bitümün kinematik viskozitesinin 20±280 cm olduğu bir sıcaklıkta gerçekleştirilir.

2.4.5.2.5 Sıkıştırılmış Numune Testi

Marshall briket numuneleri üzerinde, özgül ağırlığın belirlenmesi, stabilite ve akma değerlerin belirlenme deneyi yapılmaktadır.

2.4.5.2.6 Numunelerin Hacimsel Özelliklerinin Hesaplanması

Briketlerin zahiri hacim özgül ağırlığını kullanılarak, karışımın maksimum özgül ağırlığı ve malzemelerin hacım özgül ağırlığı ve agregaların boşluk oranı (VMA) belirlenir. Numunenin hacım özgül ağırlığı, denklem (3.1) ile belirlenir. Burada, D_p numunenin hacim özgül ağırlığı, A numunenin havada ağırlığı, V ise numunenin hacmini göstermektedir.

$$D_p = A/V \tag{3.1}$$

Numunenin teorik özgül ağırlığı denklem (3.2) ile belirlenir. Burada, D_t Karışımın maksimum teorik özgül ağırlığı, W_a Agreganın ağırlığın % olarak bitüm, G_b Bitüm özgül ağırlık ve G_{ef} Agrega efektif özgül ağırlıktır.

$$D_t = \frac{100+W_a}{\frac{100}{G_{ef}}-\frac{W_a}{G_b}} \tag{3.2}$$

Agregalar arası boşluk yüzdesi denklem (3.3) ile belirlenir. Burada, D_p numunenin hacim özgül ağırlığı, Wa agreganın ağırlığın % olarak bitüm ve G_{sb} Karışımda agrega hacim özgül ağırlığını ifade etmektedir.

$$VMA = 100 - \frac{D_p \times 100}{G_{sb}(100+W_a)} \times 100 \quad (3.3)$$

2.4.5.2.7 Karışımın Dizayn Kriterleri

Bir karışımın tasarımını sağlamak için aşağıdaki beş kriteri dikkate alınır:

i. Maksimum stabilite; ii. Akma; iii. Hava boşluğu (V_h), iv. Asfaltla dolu boşluk (V_{fa}), v. Agregalar arası boşluk oranı (VMA)

Karışımdaki hava boşluğu yüzdesi Dnk.3.4 ile belirlenir. Burada, D_p numunen hacim özgül ağırlığı ve D_t numunen teorik özgül ağırlığıdır.

$$V_h = \frac{D_t - D_p}{D_t} \times 100 \quad (3.4)$$

Asfaltla dolu boşluk yüzdesi Dnk.3.5 ile belirlenir. Burada, VMA agregalar arası boşluk yüzdesi ve V_h karışımdaki hava boşluğu yüzdesidir.

$$V_{fa} = \frac{(VMA - V_h) \times 100}{VMA} \quad (3.5)$$

2.4.5.2.8 Optimum Bitüm Miktarının Belirlenmesi

Optimum bitüm miktarının belirlenmesini kolaylaştırmak için aşağıdaki altı grafik bitüm yüzdesine göre çizilir; grafiklerden elde edilen bitüm yüzdesi değerlerin ortalaması alınarak, optimum bitüm miktarı belirlenir.

- Hacmin birim ağırlığı (özgül ağırlığı)
- Boşluk oranı
- Stabilitesi
- Akması
- Agregalar arasında boşluk oranı
- Asfaltla dolu boşluk oranı

2.4.6 Polimer Modifiye Bitümler

Polimerler, kaplamadaki karışımın katkı maddelerinden biridir. Asfalta, plastik özellikleri sahip malzemeler eklenerek, karışımı sertleştiriliyor ve taşıma tekerlekleri altında, büyük sathi deformasyonları önlemektedir. Günümüzde, dünya çapında bitümün özelliklerini değiştirmek, sıcak asfalt yapımında yeni bir konudur. Bitüm modifikasyonu, asfaltın hizmet ömrünü önemli

ölçüde artırabilir. Polimer modifiye asfalt karışımları, üstyapının hizmet ömrünü %25'e kadar (2-10 yıl daha uzun) artırabilir ve sonuç olarak, yol bakımı ve yeniden inşasının maliyetleri ve süreleri azalır. Polimer modifiye bitümlerin özellikleri, polimerin özelliklerine ve miktarına, bitüm tipine ve polimer ağındaki bağlama işlemine bağlıdır (Lou vd. 2000).

Polimer, bitümlerin penetrasyon derecesi, yumuşaklık derecesi, viskozite, kırılma noktası ve süneklik gibi özelliklerini iyileştirmektedir. Ağır vasıtalar başta olmak üzere araç trafiğine bağlı ısı, sıcaklık değişiklikleri, yağış ve basınç gibi kullanım koşulları bitümün tahrip olmasına neden olur ve bakım ve onarım maliyeti de yüksektir. Polimer bitüm veya polimer modifiye bitüm, özellikle yol yapımı alanında bitümün performansını ve dayanıklılığını artırmak için esas seçenek olarak bilinir. Bu katkı maddelerinin eklenmesi iki farklı uygulama ile yapılabilmektedir:

- Bu malzemeler çok küçük parçalanıp, filler gibi %3 oranında malzemelere eklenir.
- Bitüm hazırlanırken, %75 bitümü, %25 polimerler katkı madde ve %80 bitümün, %20 polimerler katkı maddelerinin ilave edilir.

2.4.6.1 Polimer Modifiye Bitüm Özellikleri

İki veya daha fazla polimerin karıştırılmasıyla, birincil polimerin özelliklerine sahip olmanın yanı sıra zayıf yönlerinin de ortadan kaldırıldığı bir polimer karışımı elde edilebileceği ve prensip olarak, bu polimerin özelliklerini, istenen özelliklere sahip bir polimer kullanarak ve onu başka bir polimer ile karıştırarak iyileştirmek mümkündür. Bitüm özelliklerini iyileştirilebilecek amacıyla, bitüme bazı polimerlerin belirli yüzdelerinin eklenmesiyle, bitüm özelliklerini geliştirmek için aynı yöntem kullanılmıştır. 40°C ve 50°C'lik bir sıcaklıkta dinamik sünme testini kullanarak farklı miktarlarda SBS içeren modifiye edilmiş bitümlerle yapılan asfalt karışımlarının tekerlek izi performansını değerlendirdi. %4 ve %6'ya kıyasla SBS'de %5, karışımın Tekerlek izi oluşumuna karşı direnç özelliklerini iyileştirmede en büyük etkiye sahiptir, (Khodaii ve Mehrara 2009).

Polimer modifiye bitümlere katkı maddesi olarak eklenen polimerler, penetrasyon, daktülite (süneklik), parlama noktası, özgül ağırlığı, poisson oranı, yumuşama noktası, yorulma vb. gibi özellikleri geliştirebilir. Bitüme modifiye edici olarak eklenen polimerlerin bazıları termoplastik polimerler olan polietilen, polipropilen, polistiren ve polivinil klorürdür.

2.4.6.2 Polimer Modifiye Bitümlerde Kullanılan Katkılar

Polimer modifiye bitümlerde kullanılan katkı malzemeler, inşa edilecek yola, bölgenin iklim koşullarına, trafik yükünün yoğunluğuna ve geometrik profiline göre seçilmelidir. Elastomerler gibi SBS polimerleri, bitümün esnekliğini arttırır, bu da onları bitüm modifikasyonu için en uygun polimer yapar (Şengöz vd. 2008). Tablo 2.2'de Polimer modifiye bitümlerde kullanılan katkıların sınıflandırılması gösterilmiştir.

Tablo 2.2 : Modifiye bitümlerde kullanılan ana kimyasal katkılar (Orhan, 2012).

Elastomerik termoplastik polimer	Plastomerik termoplastik polimer
(SBS) Styrene Butadiene Styrene	(EVA) Ethylene Vinyl Acetate
(SIS) Styrene Isoprene Styrene	(EMA) Ethylene Methyl Acrylate
(SB) Styrene Butadiene	(EBA) Ethylene Butyl Acrylate
(SBR) Styrene Butadiene Rubber	(PIB) Polyisobutene

Bitüm modifikasyonu için en yaygın olarak kullanılan polimerler sırasıyla Styrene Butadiene Styrene (SBS), Styrene Butadiene Rubber (SBR), Ethylene Vinyl Acetate (EVA) ve polietilen gibi polimerlerdir (Airey 2004). (HVS) Araç yük simülatörü test cihazı kullanılarak ağır trafikte, SBS ile modifiye edilmiş asfalt karışımlarının tekerlek izi oluşturma performansı değerlendirdiler (Sirin vd. 2008).

2.4.6.2.1 SBS Polimer ile Modifiye Edilmiş Bitüm

Bu polimerler elastomerik termoplastik sınıfındandır ve tüm sıcaklık aralıklarında bitümün özelliklerini iyileştirir. SBS, asfalt bağlayıcının asfalt bağlayıcıyla karışarak modifiye edilmesini sağlayan yüksek moleküler polimerli yaygın bir modifiye edicidir (Wen vd. 2002). Bu polimerin bitümde kullanılmasıyla ilgili olarak, bitümün özelliklerinin, yalnızca SBS bitüm içinde dağılmış bir fazda olması durumunda bitümün özelliklerini iyileştireceği unutulmamalıdır. Yapılan çalışmalarda, yumuşama noktası, penetrasyon derecesi ve viskozite testlerinin sonuçları, SBS polimerinin bitüme yükseltilmesinin, bitümün ısıl hassasiyetini düşürmek ve yumuşama noktasını ve geçirgenlik indisini artırmak ve penetrasyonu azaltmak dahil olmak üzere bitümün reolojik özelliklerini iyileştirdiğini göstermiştir. İlaveten, saf ve modifiye bitümün SBS ile yaşlandırılmasından sonra sonuçların karşılaştırılması, SBS ile modifiye edilmiş bitümün, saf bitümden daha iyi reolojik özelliklere sahip olacağını göstermektedir. Ancak her iki durumda da yaşlanma yumuşaklığı ve viskoziteyi artırmış ve penetrasyon derecesini azaltmıştır. Ancak genel olarak, SBS polimer modifiye bitümlerin yaşlanma oranı saf bitümden daha azdı.

Yazları sıcak ve kışları soğuk olan bölgelerde veya gece ile gündüz arasındaki sıcaklık farkının yüksek olduğu bölgelerde SBS ile modifiye edilmiş bitüm içeren asfalt kullanılması tercih edilir. Sıcak havalarda bitümün penetrasyonunu ve viskozitesizliğini azaltarak karışımın yüksek dayanımı ile birlikte bir tekerlek izi oluşturmadan yüke dayanmayı mümkün kılar. SBS ile modifiye edilmiş asfalt, asfalt kaplamanın yüksek sıcaklıkta tekerlek izi direncini, düşük sıcaklıkta çatlama direncini ve yorulma önleyici performansını artırabilir (Park, Cho 2002). Bitümün elastik özellikleri ile asfalt karışımının daha fazla hacim ve akış katsayısı ile birlikte mükemmel çekme dayanımı, karışımın büzülme nedeniyle yüzeylerin çatlaklara maruz kaldığı soğuk havalarda kullanılabilmesi ve dirençli olması için iyi bir esneklik sağlar. Son olarak, SBS modifiyeli bitümün asfaltta kullanılması, üretimindeki daha yüksek başlangıç maliyetlerine rağmen, dayanıklılığı artırarak kaplama ömrünün artması ve çeşitli bakım ve onarım maliyetlerinde dolaylı tasarruflar nedeniyle, ekonomikleşme potansiyeli görülmektedir. Bitüme polimer eklenmesi penetrasyon derecesini azaltır ve yumuşama noktasını artırır. Teorik olarak yumuşama noktasındaki artış, bitümün yüksek sıcaklıklarda elastikiyetini ve akışkanlığını artıran uzun polimer zincirlerinin oluşumundan sonra bitüm ortamında üç boyutlu ağların oluşmasından kaynaklanmaktadır. Bu durum bitümün, yüksek sıcaklıklarda daha iyi performans sergilemesine yol açar. Bunun yanı sıra, polimerin artmasıyla bitümün geçirgenlik indeksi artar, bu da bitümün sıcaklık hassasiyetinin azaltılması ve sıcaklık farklılığı yüksek olan bölgelerde optimum performansı gösterir.

SBS polimer bitüm ile yapılan BSK'ları daha yüksek Marshall stabilite ve akma direncine sahiptir, bu da yüksek polimer oranında daha belirgindir. Sonuçlar göstermiştir ki, SBS modifiyeli asfalt karışımları ile yapılan kaplama bölümlerinin performansının, yaygın asfalt karışımları ile yapılan bölümlerden önemli ölçüde daha iyi olduğunu göstermiştir (Şekil 2.21). Polimer modifiyeli asfalt karışımına sahip parçaların tekerlek iz bırakma mekanizması yalnızca sıkıştırmadan kaynaklanıyordu.



Şekil 2.21 : Stiren butadien stiren (SBS) bitüm katkı maddesi (Çeloğlu, 2014).

2.4.6.2.2 Selülozik Elyaf

Açık ve yarı açık karışımlarda TMA bitümü destekleyen ve stabiliteyi arttıran yüksek performanslı selülozik elyaftır. TMA uygulamasında bitüm miktarı daha fazla olduğu için bitüm süzülmesi de sorun olmaktadır. Selülozik Elyaf, süzülmeyi önler ve kaplamadaki kusmayı engeller. Bunun yanında asfaltın mekanik mukavemetinin arttırılması, bitümün agregadan soyulmasının azaltılması ve diğer olumlu özellikleri karışıma kazandırmak için kullanılır. TMA asfalt uygulamasında selülozik elyaf (fiber) kullanılmasının avantajları; Asfalt karışımındaki bitüm süzülmesini önler, pelet halinde üretildiğinden dozajlama esnasında tozumaz, çatlama direncini yükseltir, tekerlek izini azaltır, stabiliteyi arttırır, yorulma çatlamalarını geciktirir, yansıma çatlaklarını azaltır, asfalt içinde üç boyutlu donatı oluşturur, esneklik modülünü yükseltir, bitüm içermediği için depolama süresinde peletler birbirine yapışmaz ve düşük toz oranı dolayısıyla daha fazla elyaf içerir.

Selülozik elyaf, kaplamanın kalınlığına, agreganın gradasyonuna ve bitümün modifiyeli olup olmamasına bağlı olarak agrega ağırlığının %(0.25 -0.35) arasında kullanılır.

2.4.6.3 Polimer Modifiye Bitümlerde Uygulanan Deneyler

Dizayn sırasında uygulaması gereken deneyler; i. Penetrasyon, ii. Yumuşama noktası, iii. Duktilite (süneklik), iv. Özgül ağırlık, v. Parlama noktası, vi. RTFOT (dönmeli ince film etüvü testi), vii. Viskozite, viii. (PAV) Basınçlı yaşlandırma kabı, ix. Çözünürlük, x. Fraass kırılma noktası, xi. Stabilite (Marshall) olarak alt başlıklarda detaylandırılmıştır.

2.4.6.3.1 Penetrasyon

Bitüm penetrasyonu, 25°C sıcaklıkta standart bir iğnenin, 100 grama eşdeğer bir dikey kuvvetin etkisi altında beş saniye boyunca kaldıktan sonra ölçülür ve penetrasyon değeri olarak

tanımlanır. Testin amacı, bitümün sertlik ve kıvamlık derecesini belirler. Kıvamlık arttıkça sert bitüm ve penetrasyon arttıkça yumuşak bitüm elde edilir.

2.4.6.3.2 Yumuşama Noktası

Yumuşama noktası, bilye ve halka yöntemine göre elde edilir. Yumuşama noktası, halkadaki bitümün yumuşadığı ve bilya halkadan geçip ve 25 mm mesafeden alt pirinç yüzeyine ulaştığı sıcaklık olarak tanımlanır.

2.4.6.3.3 Süneklik

Süneklik (düktilite), kopma noktasına kadar gerilen ve uzatılan bir bitüm numunesinin (santimetre cinsinden) uzunluk miktarıdır. İyi süneklik özelliklerine sahip bitüm, sıcaklık değişikliklerine karşı genleşmeyecek veya büzülmeyecektir. Süneklik özellikleri, bitümün sertlik derecesine bağlıdır ve düşük süneklik özelliğine sahip bitüm, sert ve kırılgan olacaktır. Bitümün, süneklik özellikleri iyiyse, kış mevsiminde üzerinde nadiren çatlaklar oluşur.

ASTM standarda göre 15°C sıcaklıkta numune su banyosu içeresinde, dakikada 1cm hızla çekilir ama standart yöntemine göre 25°C sıcaklıkta numune su banyosu içeresinde, dakikada 5cm'lik hızla çekilir.

2.4.6.3.4 Özgül Ağırlık

Bitümün birim hacim ağırlığı, bitüm özgül ağırlığı olarak ta bilinmektedir. Özgül ağırlığın belirlenmesi deneyinde, piknometre temizlenip tartılır. Bitümü piknometreye döküp ve hava kabarcıklarının çıkmasını beklemeliyiz. Daha sonra bitüm içeren piknometre tartılıyor; Boş ve dolu piknometrenin ağırlığı arasındaki farktan da bitümün ağırlığı belirlenmektedir. Su için de aynı adımları uygulayarak suyun ağırlığı alınmaktadır. Özgül ağırlık Denklem (3.6) ile belirlenir. Burada, ρ öz kütle iken, g yerçekimi ivmesidir.

$$\gamma = \rho \times g \tag{3.6}$$

2.4.6.3.5 Parlama Noktası

Saf bitüm, katran ve bu bağlayıcıların karışımlarının yanıcı olması nedeniyle yüksek sıcaklıklarda onlarla çalışmak tehlikelidir. Bu nedenle parlama noktası test yöntemi ile bitüm yanma noktasını ve parlama noktası belirlenir veya bitüm ateşle temasta bulunduğu an, kısa

süreli parlamasını, ancak yanmaya devam etmediği minimum sıcaklığı denir. Bitüm parlama deneyi iki farklı cihazla, Cleveland açık kabı ve Tagliabue kapalı kabı ile yapılmaktadır.

2.4.6.3.6 RTFOT Testi

RTFOT (dönmeli ince film etüvü testi), bitümün kısa süreli yaşlanma koşullarını simüle eder. Aslında, RTFOT, asfalt yapma ve yayma, sıkıştırma işlemi sırasında bitümün yaşlanma koşullarını simüle etmektedir. RTFOT testi ayrıca bitümün yaşlanma sürecindeki, oksidasyon ve buharlaşmadan kaynaklanan değişiklikleri, kütle kaybı miktarını gösterir. RTFOT, TFOT (ince film halinde ısıtma) testin gelişmiş halıdır. Bu test, sıcak karışım asfalt üretim tesisinde olduğu gibi, hava varlığında ısı ve oksidasyonun etkisine bağlı olarak bitümün yaşlanma ve sertleşme direncini ölçmektedir. RTFOT testinde, bir dizi cam kap dikey bir düzlemde döner, böylece bitüm yüzeyi sürekli havaya maruz kalır. Bu maruz kalma (163ºC'de) 75 dk. devam ettirilir ve bitümün yüzeyine tek bir nozülden kontrollü bir şekilde hava üflenir. Test sonunda kütle, viskozite, yumuşama noktası ve penetrasyondaki değişim, gereksinimler açısından değerlendirilir (Şekil 2.22).



Şekil 2.22 : RTFO testi (Çeloğlu, 2014).

2.4.6.3.7 PAV Testi

Kaplamanın hizmet süresi boyunca bitümün uzun dönemli yaşlanmasını (bitüm özelliklerindeki değişiklikleri) simüle etmek için PAV (basınçlı yaşlandırma kabı) deneyi uygulanır (Şekil 2.23). Deneyde RTFOT'dan elde edilen bitüm numuneler, yaşlanma sürecini hızlandırmak için 20 saat süreyle yüksek basınçlı hava ve (90-110°C) sıcaklığa maruz bırakılır. Bu testte bitümün yumuşama noktası ve penetrasyon değeri deneyden öncesi ve sonrası ölçülerek değişiklikleri kaydedilir.



Şekil 2.23 : PAV deney aletleri (Çeloğlu, 2014).

2.4.6.3.8 Viskozite

Belirli bir bitüm hacminin akış oranını belirlemek için veya akmaya karşı direncini ölçmek için viskozimetre kullanılır. Viskozite değeri düşükse yaz sıcağında bitümün yumuşamasını ve trafik yükü altında asfaltın şişmesine neden olur ve böylece kaplamada deformasyonlar ortaya çıkar. Ayrıca bitüm viskozite değeri yüksekse, kış mevsiminde asfaltta çatlamalar meydana gelir. Dikkate alınması gereken bir diğer noktada, bitüm viskozitesi doğrudan asfalt stabilitesi ve sıcaklık değişiklikleri bağlıdır.

Bitümü yaklaşık 138°C kadar ısıtılıp ve fazlalıkları gidermek için 200 nolu elekten geçirilir. Ardından bitümü C-bolt-forl makinesinin tankına döküldükten sonra nozül üzerindeki çubuğu kaldırılır ve nozülün altındaki cam kabın 60 cm^3 bitümle dolduğu süre saniye cinsinden hesaplanır, bulunan süre viskozitenin değeridir.

3.7.6.3.9 Çözünürlük

Bitümde çözünürlük testi ile karbon sülfür veya karbon tetraklorür yardımı ile saf bitüm yüzdesi elde edilebilir, karbon tetraklorür yanıcı madde olmadığı için kullanılması daha uygundur. Bitüm karbon tetraklorür içinde %99 erimelidir.

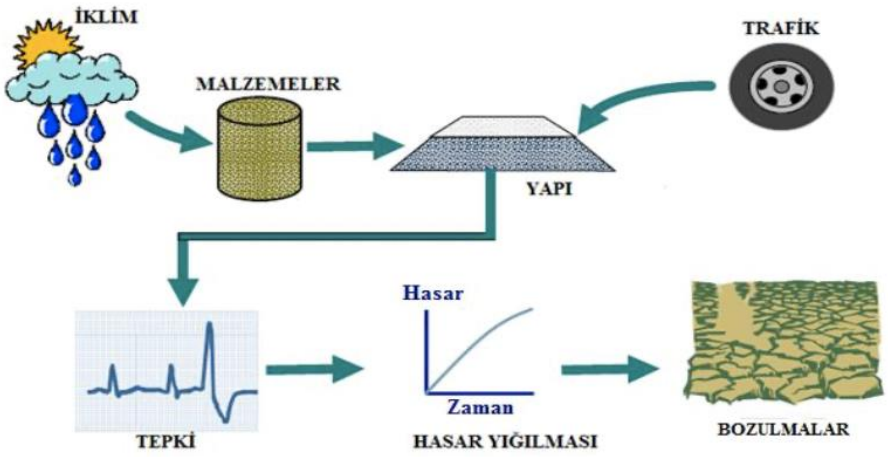
2.4.6.3.10 Fraass Kırılma Noktası

Fraass kırılma noktası testi, bitümün çok düşük sıcaklıklarda (-30°C'nin altında) reolojik davranışını belirler. Bitümün kritik bir sertliğe ulaştığı ve kırıldığı sıcaklığı belirlemek için kullanılır. 0,5 mm bitüm ile kaplanmış 41×20 mm boyutlarındaki çelik levhada yavaşça bükülerek serbest bırakılır. Bitüm kritik bir sertliğe ulaşana ve çatlayana kadar sıcaklık 1°C'ye düşer, numunenin çatladığı sıcaklığa kırılma noktası denir.

2.5 ÇEVRESEL KOŞULLAR VE TRAFİK

Trafikteki yük etkisi ve iklim gibi çevresel koşullar; yol üstyapısının performans düşüşüne neden olan etkenlerden biridir. Asfalt bir yol tabakasında gerilmeleri oluşturan veya artmasına neden olan faktörlerden en önemlileri, çevre koşulları (iklim şartları), trafik (tekerlek) yükü ve taban zemini olarak bilinmektedir. Bu parametreler, yolun performans seviyesinin belirlenmesinde etkin rol oynamaktadır (Şekil 2.24). Asfalt kaplama; hizmet ömrü boyunca sıcaklık, hava ve çevre koşulların etkisinde sertleşmeye uğradığı, zamanla asfalt çimentosunun viskozitesinde artış oluşturan ve oksidasyon sonucu değişmenin yaşlanma sertleşmesi olarak adlandırıldığı, yaşlanma sertleşmesine uğrayan asfalt karışımın daha düşük penetrasyon ve daha yüksek viskozite gösterdiği, yaşlanma sertleşmesinin gevrek kırılma ile daha düşük adezyon ortaya koyduğu ifade edilmektedir (Noureldin, 1995).

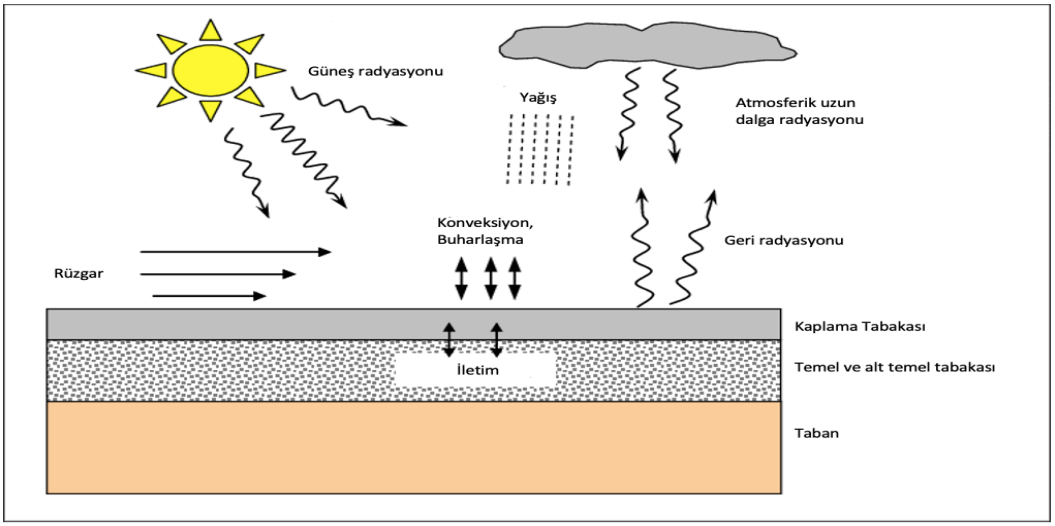
Yol performansını etki eden en önemli faktörler arasında çevresel etkenler yer alır. Trafik akışında ve trafik kazalarında etkili olan şiddetli yağmur, kar, yoğun sis ve kuvvetli rüzgarlar, hava koşulları ile mücadele yöntemlerinin ele alınmasını gerektirmektedir. Örneğin, drenaj konusu yıllar için en önemli problemlerin oluşturmaktadır. Çok fazla nemli ve gevşek zeminler üzerinde inşa edilen en dayanıklı kaplama cinslerinden olan çimento beton ve asfalt betonu kaplamaların bile trafik ve yüksek yeraltı suyu nedeniyle pompaj veya dön etkileri sonucu zamanla geçit vermeyecek derecede bozulduğu görülmüştür. Diğer bir önemli faktör, don ve buzlanma etkisidir. Bahar öncesi yolda oluşan yapısal hasarlar büyük bakım masraflarına yolların kapatılmasına ağır yüklenmenin yasaklanmasına sebebiyet verir. Yolların kapatılması ise büyük oranda ekonomik kayıplara neden olmaktadır. Bu zararlı etkilerin en aza indirilmesi için en uygun çözüm yollarının yol tasarım ve yapım aşamasında uygulanması, bakım ve onarım çalışmalarının periyodik bir şekilde yapılması ve ileriye dönük teknoloji yöntemlerin de dikkate alınması gerekmektedir (Ozgen, 1960).



Şekil 2.24 : Mekanistik-Ampirik dizayn işleyiş diyagramı (Bal, 2013)

2.5.1 İklim Koşulları

Hava koşulları asfalt kaplamaların performansı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Yağış, sıcaklık, donma ve erime döngüleri gibi dış çevresel faktörler yol kaplamaları olumsuz etkiler. Kaplamalar, farklı iklim bölgelerinde aynı performansa sahip değiller, sıcaklık, rutubet, erime ve donma döngülerinin farklı iklim bölgelerde, çeşitli olumsuz etkiler göstermektedir. Tüm iklim bölgelerinde asfalt tabakası kalınlığındaki ve transit trafiğindeki değişikliklere karşı hasara duyarlılık derecesi diğer faktörlere göre daha yüksek, ince taneli toprakların dona duyarlılığı ve çözülme mevsimi boyunca şişmesi nedeniyle uzun erime ve donma dönemleri olan bölgeler için taban toprağının uygun belirlenmesi önemlidir. Yol üstyapı tasarımında dikkate alınması gereken en önemli iklim etkenler; su (nem), yağış, aşırı sıcaklık, don ve buzlanma, şiddetli rüzgarlar vs. faktörlerdir (Şekil 2.25).



Şekil 2.25 : Yol üstyapısında etken iklim faktörleri (Herb, vd., 2009).

2.5.2 Trafik Koşulları

Trafik, kaplama tasarımında en önemli parametrelerden biridir. Trafik artış eğilimlerine, istatistiklerine ve bilgilerine dayalı olarak, mevcut yollarda ulaşım çalışmaları yapılarak yeni yollar tasarlanır. Tasarlanan yol hattından geçen araçların akslarının tipleri, sayısı ve ağırlıkları tahmin edilmelidir. Trafik yükler yol üst yapının katmanlarında çekme ve basınç gerilmeler oluşturmaktadır. Trafik yükler altında kaplama deforme olup ve asfalttaki agregaların kırılması ve yüzeyde soyulmasını neden olur. Ağır trafiğe maruz kalan yollarda, dingil yüklerin bıraktığı hasarlardan biri tekerlek izidir, Şekil 2.26'te hasarın bir örneği görüntülemektedir. Asfalt kaplama tasarımında dikkat edilmesi gereken trafik etkenler; tekerlek yükü, lastik basıncı, dingil sayısı, yük tekrarlanma frekansı gibi çeşitli faktörleri içerir.



Şekil 2.26 : Esnek üstyapılarda tekerlek izi oluşumu (Karaşahin, 2014).

2.5.3 Kaplama Bozulmaları

Kaplamada görülen bozulmalar genellikle üç tipte oluşmaktadır; i. deformasyon, ii. Ayrışma, iii. Çatlamalar, bozulmalara ise genellikle tasarım, yapım ve işletme sırasında meydana gelmektedir. Bu bozulmaları neden olan faktörler, kötü malzeme seçimi, asfalt betonu oranı kusurları ve asfalt kaplama uygulama hatalarıdır. Esnek kaplamalarda meydana gelen bozulma nedenleri; i. altyapı yetersizliği, sıkışma, taşıma gücü yetersizliği, yeraltı su seviyenin yüksekliği vs. ii. aşırı trafik yükü, iii. İklim şartları ve iv. asfalt malzeme özellikleri, karışım oranı, imalatı ve uygulanmasından kaynaklı bozulmalardır (Tunç, 2004, 2001)

Yol üst yapısının servis ömründe farklı tabakalarında çeşitli sorunlar gözlenmektedir. Bu sorunlar ise kaplama altındaki tabakalarda gerilme, gerinim ve deformasyonu neden olmaktadır, bu üç faktörü sebep olan durumlar, çoğunlukla çevresel koşullar ve asfalt karışım yapımıyla doğrudan bağlıdır. İklim koşulları, uygunsuz asfalt karışımın oranları, yol yapım sırasında yapılan hatalar ve trafik yükün tekerrürü kaplama yüzeyinde çatlaklar, oturmalar, şişmeler vb. reaksiyonları neden olmaktadır (Şekil 2.27). Özellikle yol üstyapısı trafiğe açıldıktan belli bir süreden soran kaplamada çatlakların oluşumunu görmekteyiz, bunun en önemli nedenlerinden biri zamanla genleşme ve büzülme etkisi ile oluşur (Karaşahin, 2014). Söz konusu problemleri azaltmak ve yol üst yapısının daha iyi performans göstermesi için bitümlü sıcak karışımlara belirli polimerler eklenmektedir. Asfalt kaplamalar çatlamaya çok meyillidir ve çatlakların görülmediği bir asfalt kaplama bulmak nadirdir. Çatlaklar yol üstyapısının önemli ve farklı reaksiyonları meydana getirebilir. Çatlakların etki derecesi, geometrik özelliklerinden, genişlemelerinden ve tiplerinden etkilenebilir. Çatlakların etki derecesi, geometrik özelliklerinden, genişlemelerinden ve tiplerinden etkilenebilir. Genel olarak, trafik yükü, çevresel koşullar (iklim) ve alt tabakaların oturma ve çökmesi gibi bu üç faktör kaplamadaki çatlakların başlangıcı veya yaymasını neden olmaktadır (Abdel-Motaleb 2007). Trafik yükü, esnek üstyapılarda kalıcı deformasyonuna en büyük etki faktördür. Kalıcı deformasyon gelişimini etkileyen en önemli trafik özellikleri şunları içerir: trafik yükü, tekerlek temas alanı, lastik basıncı, trafik miktarı vs. Sabit bir yolla sınırlı trafik, belirli bir konumda yük yoğunluğuna neden olur ve bu da aşırı tekerlek izine yol açar. Geniş şeritler, yük konsantrasyonunu azaltır, dolayısıyla asfalt tabakasında tekerlek izini azaltır (Huang, 2004).

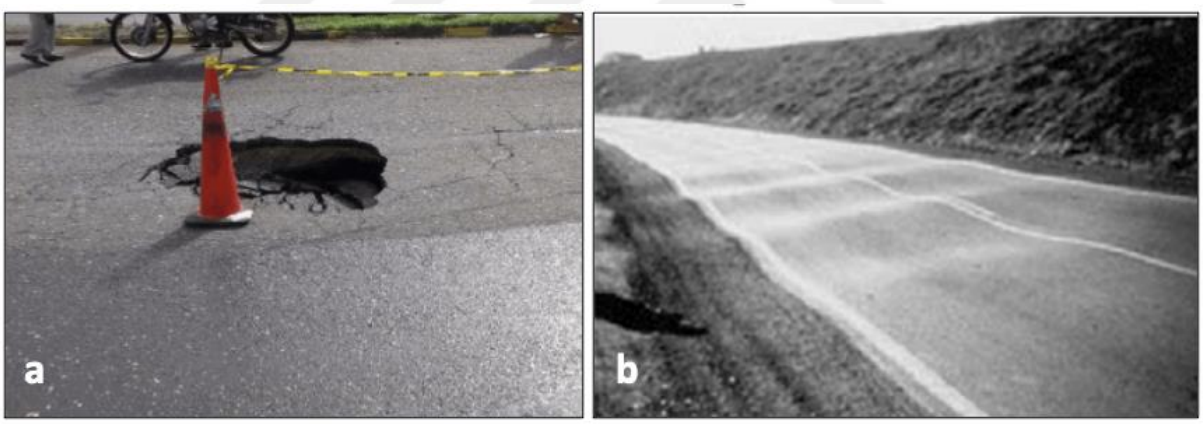


Şekil 2.27 : Esnek yol üstyapıda oluşan çatlaklar (Karaşahin, 2014)

2.5.3.1 Deformasyon

Deformasyonlar, asfalt betonu imalatından bir süre sonra meydana gelen yapısal bozulmalardır. Bu bozulmalar kalıcı olup yolun bir kısmı, tümü veya bölgesel şeklinde görülebilmektedir. Sürüş emniyeti ve konforunu azalmakta olup, düşük hizmet servisinden dolayı bakım ve onarıma ihtiyaç duyulmaktadır. Deformasyonların kaynağı genellikle düşük stabiliteli BSK'ların imalatıdır. Bunun yanı sıra kaplama katmanların yetersiz sıkıştırılması, tabaka kalınlıkları, drenaj ve üstyapıda aşırı hacim değişikliği, kusurlu malzeme oranı gibi deformasyon oluşunda önemli faktörlerdir.

Deformasyondan kaynaklanan kusurlar asfalt tabakasını oluşturan agregaların yer değiştirme dirençlerinin az olması, asfalt tabakalarının kayma direncinin ve karışım viskozluğunun az olmasından oluşmaktadır (Karakaş, 2014). Deformasyonlar asfalt kaplamalarda ve tabanda, tekerlek izi oluşumu, lastik deseni oluşumu, çökme ve kabarma, yığılma, ondülasyon ve oturma şeklinde çeşitli formlarda ortaya çıkmaktadır (Tunç, 2004, 2001) (Şekil 2.28).

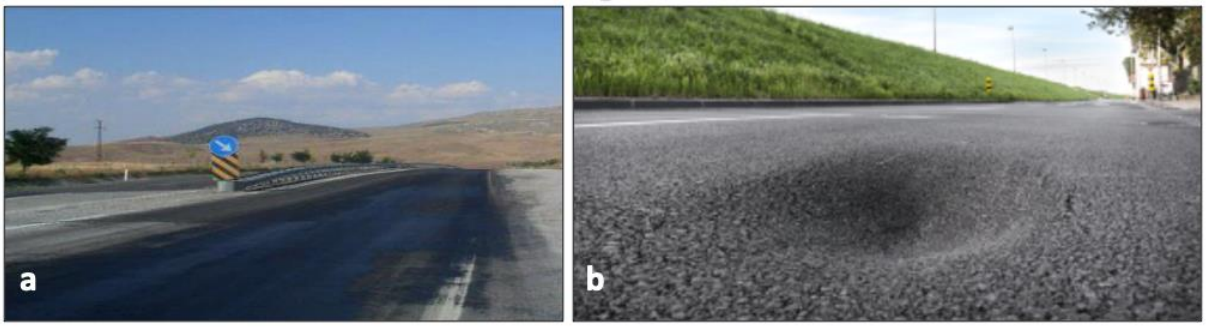


Şekil 2.28 : a: bölgesel çökme, b: Ondülasyon (Bağdatlı vd., 2017)

2.5.3.2 Ayrışma

Aşınma tabakasındaki agrega danelerinin iklim, trafik gibi çevre ve hava koşullarının yol açtığı mekanik etkiler nedeniyle kopma ve parçalanma seklinde kaplama tabakasından ayrılmasıyla ayrışma kusurları oluşmaktadır. Ayrışmalar oluşumunda tez zamanda önlem alınması gereken bozulmalardır, aksı takdirde üstyapı hizmet servisi azalmakta olup sürüş konfor ve emniyeti açısından sakıncalıdır. Ayrışmalar genel olarak yapım ve uygulama hataları, düşül Yapım hataları, düşük kaliteli malzeme, serim sırasında segregasyon, homojen olmayan karışım, yetersiz ve yüksek penetrasyonlu asfalt gibi nedenlerden kaynaklanmaktadır. Ayrışmalar;

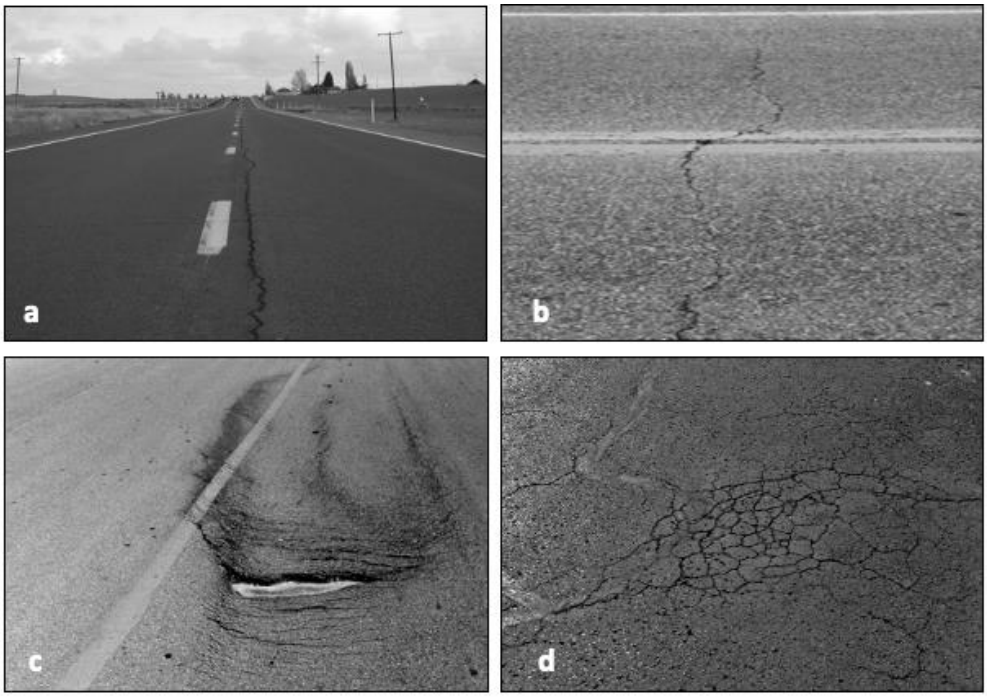
oyuklar (çukur), sökülmeler, soyulma, kayganlık, cilalanma ve kusma gibi türlerden oluşmaktadır (Tunç 2004, 2001) (Şekil 2.29).



Şekil 2.29 : a: Asfalt kusması, b: asfalt kaplamada oluşan oyuklar (çukur) (karakaş, 2014).

2.5.3.3 Çatlamalar

Çatlamalar asfalt kaplamlar yüzeyinde, çevre, iklim ve trafik gibi nedenlerden dolayı çok çeşitli şekillerde, genişlikte ve derinlikte meydana gelen kusurlardır. Çatlaklar genellikle stabilite çatlakları, yorulma çatlakları, yansıma çatlakları, timsah sırtı çatlakları, kenar çatlakları, derz çatlakları, enine çatlakları ve yüzey kayması çatlakları, düşük sıcaklık çatlakları olarak sınıflandırılır (Şekil 2.30).



Şekil 2.30 : a: Boyuna derz, b: Enine, c: Kayma, d: Timsah sırtı çatlağı (Karakaş, 2014)

Bozulma türleri ve nedenleri şekil 2.31'de detaylandırılmıştır.

Tablo 2.3 : Asfalt kaplama türleri ve nedenleri (Karakaş, 2014)

Kusurlar	Yapısal Bozulmalar	Karışım Kompozisyonu	Isı veya Rutubet Değişimi	Yapım Hataları
Timsah sırtı çatlak	✓			
Kenar çatlağı	✓		✓	✓
Yansıma çatlağı			✓	
Büzülme çatlağı		✓		
Ötelenme çatlağı				✓
Teker izi	✓	✓		✓
Ondülasyon	✓ ✓	✓		✓ ✓
Çökme				✓
Kabarma/şişme			✓	
Çukur	✓	✓	✓	✓
Sökülme/Parçalanma		✓		✓
Terleme/Kusma		✓		✓
Agrega cilalanması		✓		
Agrega kaybı		✓		✓

2.6 SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ

Sonlu Elemanlar Yöntemi, kısmi diferansiyel denklemler ve integral denklemleri çözmek için sayısal bir yöntemdir. İki veya üç boyutlu problemlerin çözümünde uygulanır. Geometrik karmaşıklık, maddenin karmaşık davranışı ve gerçek problemlerde sınır koşulları, kesin çözüme elde etmek zorlaştırır. Sonlu bir zamanda elde edilen yaklaşık çözümlerin kullanılması kaçınılmaz olup ve yöntem bu seçeneklerden biridir. Yöntem, davranışı bir diferansiyel denklemle ifade edilen birçok fiziksel ve mühendislik problemine yaklaşık çözümler elde etmek için sayısal bir yöntemdir. Bu yöntemde, davranışı bilinmeyen sürekli fonksiyonlara, davranışı bilinen küçük parçalı sürekli fonksiyonlara bölünmektedir ve istenilen bilinmeyen miktarı yaklaşık olarak tahmin etmek için kullanılır (Öztorun, 2015).

2.6.1 Yöntemin Temel Amacı

Karmaşık bir probleme daha basit bir modelle değiştirilerek çözüm bulmaktır. Yöntemde çözüm bölgesi, birbirine bağlı, küçük parçacıkların (elemanların) bölünmüş, alt bölgeler kümesidir, elemanlar veya sonlu elemanlar olarak kabul edilir. Daha sonra, her bir parça veya eleman için uygun bir yaklaşık çözüm varsayılır. Bu bileşenleri monte ederek, sistemin genel denge koşulları (yapılar gibi) çıkarılır. Bu koşullar yerine getirilerek, istenen miktar (yer değiştirme) için yaklaşık bir cevap elde edilir.

2.6.2 Yöntemin Kullanım Alanları

Yöntem, ilk olarak karışık yapıların, gerilme analizi için kullanıldı. Daha sonra otomotive, uçak, köprü, bina vs. alanların şekil değiştirme ve gerilme çözümü için de kullanmayı başladılar. Farklı mühendislik alanlarda, ısı analizi, akışkan analizi, piezoelektrik analizi, elektrik analizi gibi analizlerde kullanılırmıştır. Bunun yanını sıra mühendislik alan dışında, tıp dalın bazı alanlarında da, sonlu elemanlar yöntemi kullanılmaktadır.

2.6.3 Sonlu Elemanlar Tipleri

Eleman tipleri; i. Çerçeve eleman (frame), ii. Yay eleman (spring), iii. Kabuk eleman (shell), iv. Düzlem gerilim eleman (plan stress), v. Kafes kiriş eleman (turss), vi. Plak eleman (plate), Vb. örnekler mevcuttur (Öztorun, 2015).

2.6.4 Yönteminde Kullanılan Bilgisayar yazılımları

Sonlu elemanlar yöntemi yardımıyla farklı bilgisayar programlar ile yapının, statik ve dinamik gerilmeleri ve deformasyonları analiz edilmektedir. Analiz yaparken iki veya üç boyutlu bilgisayar programlar ANSYS, ABAQUS, COSMOS, PLAXIS, vb. kullanılabilir. Bu çalışmada simülasyon için sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi ile üç boyutlu bilgisayar destekli programların kullanılması ve yol kaplamanın performansı hakkında temel soruları yanıtlamanın en iyi yolu olarak giderek daha fazla görülmektedir. (Zheng vd. 2003).

2.6.5 Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Yapının Modellemesi

Yapıda bölünen küçük parçalar, temel elemanlara ayrılır, bu işlemi mesh denir (Şekil 2.32). Sonlu elemanları birleştiren noktalara (düğüm) nüde denir, elemanın her köşesinde nüdeler (düğümler) mevcut, bilgisayar ortamında bu düğümleri göre hesaplamalar yapılır. Veya basit dilde, sistemi düzgün ve uygun bir şekilde elemanlara bölünmesi ve düğüm noktaların konumlandırmasını, sonlu eleman modelleme olarak adlandırılır (Şekil 2.32). Her düğüm noktası üzerinde matris denklemi oluşur (Öztorun, 2015). Sonlu elemanlar yöntemiyle kuvvet vektörü denklem (4.1) ile belirlenir. Burada, u yer değiştirme vektörü, K sertlik, rijitliktir.

$$[f]=[K]\bullet[u] \qquad (4.1)$$

(K) Rijitlik denklemin açılması:

$$K = \begin{bmatrix} K & -K \\ -K & K \end{bmatrix} \quad (4.1.1)$$

$$\mathrm{K} = \frac{EA}{L}\begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.1.2)$$

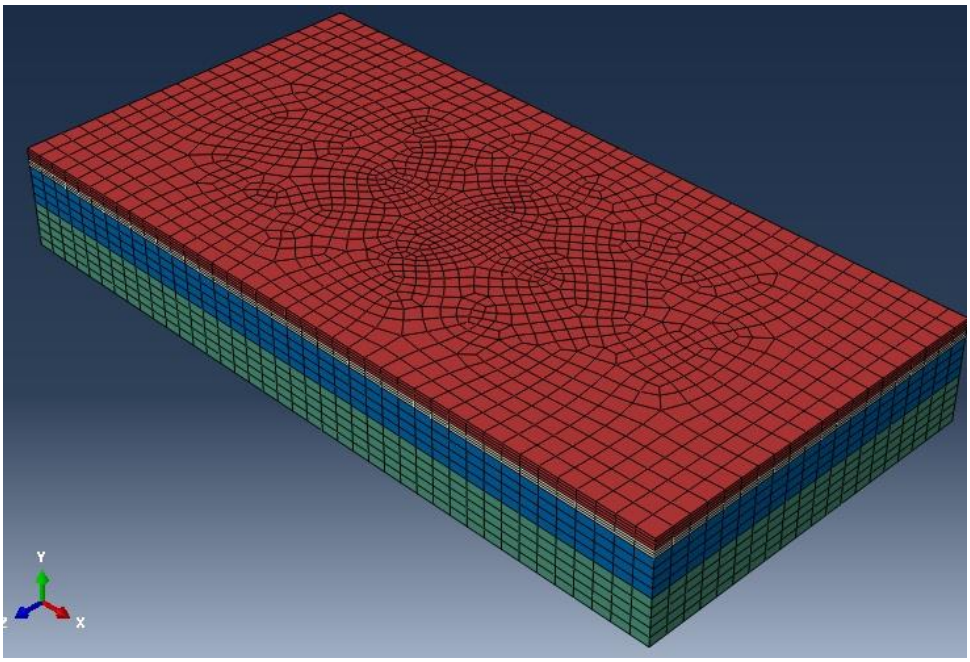
$$K = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & -\frac{EA}{L} \\ -\frac{EA}{L} & \frac{EA}{L} \end{bmatrix} \quad (4.1.3)$$

$$\begin{bmatrix} f_i \\ f_j \end{bmatrix} = \frac{EA}{L}\begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_i \\ u_j \end{bmatrix} \quad (4.1.4)$$

Burada, E esneklik modülü, A kesit alanı ve L uzunluktur.

Yapının modellemesi için yapılması gereken aşamalar bunlardır:

- Yapıyı küçük parçalara bölünmesi
- Malzeme özellikleri sisteme girilmesi
- Yapı denklemin çözümü için, tüm malzeme düğüm noktası ile birleştirilir
- Düğüm nokta (node) denklemleri çözülür
- İstenilen değerler (gerilmeler, şekil değiştirme ve yer değiştirmeler) elde edilir.



Şekil 2.31 : Sonlu elemanlar yöntemiyle modelleme ve meshlenme.

2.6.6 Abaqus

Abaqus, basit bir doğrusal analizden, en karmaşık ve doğrusal olmayan modellemeye kadar sorunları çözme yeteneğine sahiptir. Bu yazılım, her tür geometrinin modellenebileceği çok geniş bir öğe yelpazesine sahiptir. Abaqus genel ve kapsamlı bir modelleme aracı olduğundan, kullanımı katı mekaniği problemlerinin (gerilme-şekil değiştirme) analizi ile sınırlı değildir. Bu yazılımı kullanarak ısı transferi, kütle transferi, elektrik bileşenlerinin termal analizi, akustik, sızıntı ve piezoelektrik gibi çeşitli konular incelenebilir (Şekil 2.32). Abaqus CAE yazılımında yol üstyapısını modellenip, statik yükleme uygulanarak ve lastikler ile asfalt arasındaki farklı temas alanına göz önünde bulundurarak yol üst yapısının üzerindeki yükü arttırmanın etkisini araştırdılar. Sonuç olarak, lastik ile kaplama arasındaki gerçek temas yüzeyi dikkate alındığında, asfalt tabakasının altındaki gerinim ve gerilmenin arttığını göstermektedir. Üstelik, yük altındaki elemanların sayısı arttıkça, asfalt tabakasının altındaki gerilme ve gerinme neredeyse doğrusal olarak artar, bu da eksen ağırlığının yol üstyapısı reaksiyonu üzerindeki etkisini ve kaplamadaki aşınmayı ve tekerlek izini azaltmanın etkisini gösterir (Rahman vd. 2011). Abaqus programı yardımıyla yapılan bir analizi genellikle üç adımdan oluşur:

1- Modelleme veya ön işleme aşaması (Abaqus/CAE): Bu aşamada girdi dosyası oluşturulur.
2- Sonlu elemanlar analizi veya işleme aşaması (Abaqus Standard/Explicit): Bu aşamada çıktı görsel dosyası oluştur.
3- İşlem sonrası aşama (Abaqus/Viewer): Bu aşamada görsel işleme aşamasıdır

Abaqus'taki işlem türleri, yazıldığı gibi bir dizi dosyayla üç adımda birbirine bağlanır.



Şekil 2.32 : Abaqus programın giriş sayfası.

3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1 KATKISIZ BSK MALZEME ÖZELLİKLERİ

Bu çalışmada katkısız BSK deneysel (ampirik) laboratuvar sonuçları İstanbul Asfalt Fabrikaları Sanayi ve Ticaret A.Ş. (İSFALT)'tan temin edilmiştir. Deney çalışmada kullanılan agregalar Cebeci bölgesi taş ocağından temin edilmiş olup, bitüm malzemesi B50/70 (AC16) TÜPRAŞ rafinelerinden sağlanmıştır (Şekil 3.1). Deneyde kullanılan agregalar kumtaşıdır.



Şekil 3.1 : Cebeci taş ocağı, İstanbul (Google haritası, SBB, Aralık 2020)

3.1.1 Agrega Özellikleri

Kumtaşı agregalara ait fiziksel özellikler olarak elek analizi, özgül ağırlığı, su emme oranı, çözülme, yassılık indeksi, cilalanma ve soyulma deneyleri uygulanmıştır. İSFALT'tan temin edilen agrega fiziksel özellikleri alt başlıklarda sunulmuştur.

3.1.1.1 Elek Analizi

Kullanılan agregaların elek analizi ve fiziksel özellikleri tespit edilmiştir (Tablo 3.1). Agrega gradasyonu deney metodu (TS EN 933-1) standartlara göre uygun bir şekilde yapılmıştır.

Tablo 3.1 : Katkısız kumtaşı agregaların elek analiz sonuçları (İSFALT)

Elek Boyutu		%Geçen			
(İnç)	(mm)	12-19 mm	5-12 mm	0-5 mm	Yıkanmış
$1^{1/2}$"	38,1	-	-	-	-
1"	25,4	-	-	-	-
3/4"	19	100,0		-	-
1/2"	12,5	27,9	100,0	-	-
3/8"	9,5	5,6	91,4	100,0	100,0
No 4	4,75	3,9	16,4	94,9	98,3
No 10	2,0	2,8	9,5	65,5	61,1
No 40	0,425	2,3	7,3	38,5	19,9
No 80	0,180	2,1	6,5	28,5	10,4
No 200	0,075	1,7	5,5	20,7	6,1

3.1.1.2 Özgül Ağırlığı ve Su Emme

Agregalar daneleri su emmesiyle oluşmaktadır, bu işlemi su emme (absorbsiyon) denir. Agregalarda su emme oranı yüksekse ve daneler arasındaki sıkıştırma elverişli değilse agregalar arasında boşluk oranı da fazla olduğunu gösterir ve bu durum çevresel koşullar ve donmaya karşı daha az dayanımlı olduğunun gösterir. İnce agregaların maksimum su absorbsiyonu ASTM C128 standart Karayolları teknik şartnamesi (KTŞ) limitlerine göre ≤ %2,5 olmalıdır. Kaba agregalar ise maksimum su absorbsiyonu ASTM C127 standart şartname limitlerine göre ≤ %2,5 olmalıdır (Tablo 3.2). Özgül ağırlığı arttıkça agrega kullanım oranı da artmaktadır, dolaysıyla agregalar arasındaki boşluk oranı da azalmaktadır, yanı boşluk oranı azaldıkça özgül ağırlığı artmaktadır. Agregalar arasındaki boşluk, agregaların granülometresine bağlıdır (Tablo 3.2).

Hacim özgül ağırlığı: Tüm geçirimli ve geçirimsiz boşluklarla birlikte katı taneleri içerir

Zahiri özgül ağırlığı: Geçirimsiz boşluklarla birlikte katı taneleri içerir.

Efektif özgül ağırlığı: Asfalt emici boşluklar dışında tüm katı taneleri içerir.

Tablo 3.2 : Çalışmada kullanılan hacım özgül ağırlık ve Absobsiyon sonuçları (İSFALT)

Deney Adı	**Deney Metodu**	**Birim**	**Deney**	**Şartname**
Kaba Agregalarda Tane yoğunluğu (Hacim	TS EN 1097-6	gr/cm^3	2,680	-
Kaba Agregalarda Su emme (Absorbsiyon)	TS EN 1097-6	%	0,99	Maks. 2
İnce Agregalarda Tane yoğunluğu (Hacim özgül ağırlığı–kuru, ortalama)	TS EN 1097-6	gr/cm^3	2,648	-
İnce Agregalarda Su emme oranı (Absorbsiyon)	TS EN 1097-6	%	1,62	Maks. 2
Filler Tane Yoğunluğu Tayini	TS EN 1097-7	gr/cm^3	2,697	-

3.1.1.3 Aşınma Kaybı (Los Angeles)

Asfalt karışımında kullanılan agregalar ağır taşıt ve dingillerin ağırlığına karşı yeterli direnci sahip olmalıdır ve gerilmeyi sebep olan ağırlıklarda kırılmamalı veya ezilmemelidir. Los Angeles testi, agregaların aşınma direncini değerlendirmek için kullanılır (Tablo 3.3).

Tablo 3.3 : Parçalanma direnci deney sonucu (İSFALT)

Deney Adı	Deney	Birim	Deney	Şartname
Parçalanma Direnci (Los Angeles Aşınma Kaybı-500devir)	TS EN 1097-2	%	**18**	Maks. 20 ≤20(LA_{20})

3.1.1.4 Donma ve Çözülme

Agregaların donma (hava tesirlerini karşı dayanıklılık) ve çözülmeyi karşı dayanımını bulmak için $MgSO_4$ ve Na_2SO_4 kullanılmaktadır. Agregalar uzun süre hava tesirinde kalarak gradasyon bozulmasını neden olup ve böylece yolun bozulmasını da sebep olur, dolaysıyla donma ve çözülmeyi karşı dirençli olmalıdır (Tablo 3.3).

Tablo 3.4 : Hava tesirlerini karşı dayanaklık deney sonucu (İSFALT)

Deney Adı	Deney	Birim	Deney Sonucu	Şartname
Hava Tesirlerine Karşı Dayanıklılık (MgSO4 ile kayıp)	TS EN 1367-2	%	**10**	≤16(MS_{16})

3.1.1.5 Yassılık İndeksi

Yassılık indeksi deney yaparken, herhangi bir agrega tane kalınlığı nominal boyutunun 0.6sından küçük olmalıdır, yassı daneleri trafik yükün altında sabit değiller, kolayca kırılırlar ve karışımın dayanımı azalır (Tablo 3.5).

Tablo 3.5 : Yassılık indeksi deney sonucu (İSFALT)

Deney Adı	Deney Metodu	Birim	Deney Sonucu	Şartname
Yassılık İndeksi (5-12mm Agrega için)	TS EN 933-3 *	%	**13**	≤20 (FI_{20})
Yassılık İndeksi (12-19 mm Agrega için)	TS EN 933-3 *	%	**10**	

3.1.1.6 Cilalanma

Kaplama tabakasında trafik sürtünmesi altında maruz kalan agregaların cilalanma derecesini belirtmek için yapılan bir deneydir. Cilalanmaya karşı düşük dirençli agregalar, kayma direncini de düşmekte ve özellikle yağışlı havalarda taşıtların kaymasını neden olmaktadır. Standart şartnamesini uygun cilalanma değeri bulunmuştur (Tablo 3.6).

Tablo 3.6 : Cilalanma deney sonucu (İSFALT)

Deney Adı	Deney Metodu	Birim	Deney Sonucu	Şartname
Cilalanma Değeri, PSV	TS EN 1097-8	-	**58**	Min. 50

3.1.1.7 Soyulma

Agregaların kaplama tabakasında trafik ve iklim koşullarına karşı gösterdiği mukavemettir, bazı karışımlarda asfalt ve agrega arasındaki bağ su etkisi altında kaybolur ve kaplamada bozulmaya yol açar. Soyulma direnci düşük olan agregaları deneyler sonucunda katkı maddeler ilave edilerek, soyulmaya karşı direnci yükseltilmektedir. Soyulma (Bağlayıcının agregadan ayrılması) değeri bitümün tipi ve agregaların cinsine (bazalt, kalker, vb.) göre değişmektedir. Deney sonuçları Tablo 3.7'de verilmiştir.

Tablo 3.7 : Soyulma deney sonucu (İSFALT)

Deney Adı	Deney Metodu	Birim	Deney Sonucu	Şartname
Soyulma Mukavemeti, % Bitümle kaplanmış yüzey (24 saat 60°C suda bekletmeden sonra)	TS EN 12697-11	%	**65**	Min. 50

3.1.2 Katkısız Bitüm Özellikleri

Asfalt betonu Aşınma tabakası (**AC 16 Aşınma 50/70**) karışım dizaynı ve bitüm özelliklerinin deney sonuçları alt başlıklarda detaylandırılmıştır.

3.1.2.1 Penetrasyon

Testin amacı, bitümün sertlik ve kıvamlık derecesini belirler. Kıvamlık arttıkça sert bitüm ve penetrasyon arttıkça yumuşak bitüm elde edilir. Penetrasyon derecesi yapılan deney sonuçları standartları uygun bir şekilde bulunmuştur, Tablo 3.8'de deney sonucu verilmiştir.

Tablo 3.8 : Penetrasyon deney sonucu (İSFALT)

Deney Adı	Deney Metodu	Birim	Deney Sonucu	Şartname
Penetrasyon 25°C,100g,5s (Otomatik)	TS EN 1426 *	0,1mm	59	50-70

3.1.2.2 Bitüm Özgül Ağırlık

Bitümün birim hacım ağırlığını, bitüm özgül ağırlık denir. 25°C bitümün hacımı havadaki ağırlığının, ayni sıcaklıkta ve aynı hacımda havasız destile suyun ağırlığına oranıdır. Bitüm

özgül ağırlığı bulunmuş olduğu petrolün 25°C sıcaklıkta (0.97-1.05) değerini göre değişir. Bitüm özgül ağırlık deney sonucu Tablo 3.9'da verilmektedir.

Tablo 3.9 : Bitüm özgül ağrılık deney sonucu (İSFALT)

Deney Adı	Deney	Birim	Deney Sonucu	Şartname
Bitüm Özgül Ağırlık $d_{25/25}$	TS EN 15326	-	1,036	1,0 - 1,1
Agrega Karışımının Efektif Özgül Ağırlığı (G_{ef})	-	gr/cm^3	2,711	-
Agrega Karışımının Hacim Özgül Ağırlığı (G_{sb})	-	gr/cm^3	2,668	-

3.1.2.3 Karışımlarda Kullanılan Agrega ve Bitüm Miktarları

Aşınma tabakası Tip 1'e uygun karışım gradasyonu belirlendi. Marshall briketleri için 1000 gr kuru agrega kullanıldı, agrega karışımda %12 kaba agrega, %48 ince agrega, %8 filler malzemesi (taş tozu) ve %32 yıkanmış agrega ve Filler kapsamaktadır. Tamamı kumtaşı agrega karışımda agrega ağırlığına göre bitüm oranı sıra ile 4, 4.5, 5, 5.5, 6, 6.5 ve mineral filler asfaltit karışım setler için agrega ağırlığına göre bitüm oranı sıra ile 3, 3.5, 4, 5, 5.5, 6 olarak belirlendi. W_a : agrega ağırlığına göre kullanılan bitüm oranı, W_b : agrega karışımda bitüm ağırlıkça oranı. Örneğin: 1000gr agrega + 52 gr bitüm = 1052 gr karışım, W_b = 52 / (52+1000), W_b = % 4.94

3.1.2.4 Aşınma Tabakası Dizaynı

Dizaynda, (12mm – 19mm), (5mm – 12mm) dane boyutu agregalar ve (0 mm – 5mm) taş tozu ve yıkanmış taş tozu ve B50/70 penetrasyonlu bitüm kullanılmıştır (Şekil 3.2). Tablo 3.10'da agregaların kullanım oranlan ile dizayn gradasyonu ve tolerans limitleri verilmektedir.

Tablo 3.10 : Aşınma tabakası dizayn gradasyonu (İSFALT)

Elek Boyutu		%Geçen				TİP-1
(İnç)	(mm)	12-19 mm	5-12 mm	0-5 mm	Yıkanmış	Aşınma Şartname Limitleri
$1^{1/2}$"	38,1	-	-	-	-	-
1"	25,4	-	-	-	-	-
3/4"	19	100,0		-	-	100
1/2"	12,5	27,9	100,0	-	-	88-100
3/8"	9,5	5,6	91,4	100,0	100,0	72-90
No 4	4,75	3,9	16,4	94,9	98,3	42-52
No 10	2,0	2,8	9,5	65,5	61,1	25-35
No 40	0,425	2,3	7,3	38,5	19,9	10-20
No 80	0,180	2,1	6,5	28,5	10,4	7-14
No 200	0,075	1,7	5,5	20,7	6,1	3-8

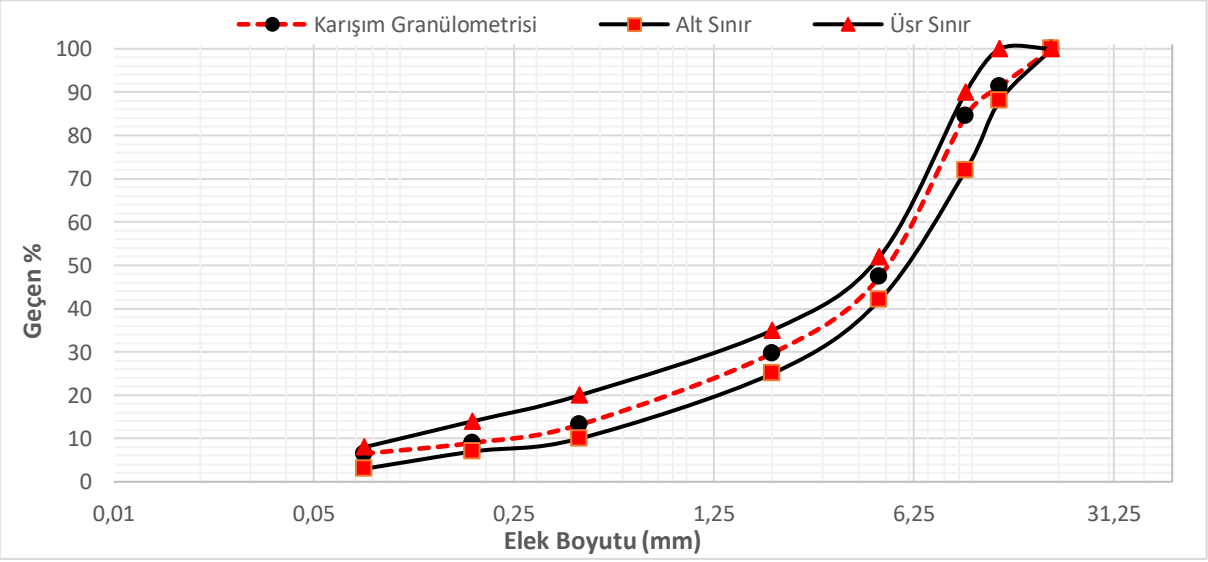
Karışım gradasyonu, bulunan karışım oranlarına göre hesaplanması (Tablo 3.11, Tablo 3.12).

Tablo 3.11 : Bulunan karışım oranlarına göre karışım gradasyonu hesaplanması.

Elek Boyutu		**%12K+%48 İ+%8F** Yıkanmamış **+%32D** Yıkanmş	**Karışım Gradasyonu**
(İnç)	**(mm)**		
3/4"	19	100 ×(0.12) +100×(0.48) +100×(0.08) +100×(0.32)	**100,0**
1/2"	12,5	27,9×(0.12) +100×(0.48) +100×(0.08) +100×(0.32)	**91,3**
3/8"	9,5	5,6×(0.12) + 91,4×(0.48) +100×(0.08) +100 ×(0.32)	**84,5**
No 4	4,75	3,9×(0.12) + 16,4×(0.48) +94,9×(0.08) +98,3×(0.32)	**47,4**
No 10	2,0	2,8×(0.12) + 9,5×(0.48) +65,5×(0.08) +61,1×(0.32)	**29,7**
No 40	0,425	2,3×(0.12) + 7,3×(0.48) +38,5×(0.08) +19,9×(0.32)	**13,2**
No 80	0,180	2,1×(0.12) + 6,5×(0.48) +28,5×(0.08) +10,4×(0.32)	**9,0**
No 200	0,075	1,7×(0.12) + 5,5×(0.48) +20,7×(0.08) +6,1×(0.32)	**6,5**

Tablo 3.12 : Agrega kullanım oranları ve karışım gradasyonu (İSFALT)

Kullanım Oranı		12 %	48 %	8%	32 %	Karışım Gradasyonu	K.T.Ş. 2013 Aşınma Tip 1 Tabakası Limitleri			
Elek Boyutu		12-19 mm	5-12 mm	0-5 mm Yıkanmamış	0-5 mm Yıkanmış		Şartname		İşyeri Karışım Formülü	
(İnç)	(mm)									
¾”	19,0	12,0	48,0	8,0	32,0	**100,0**	100		100	
½”	12,5	3,3	48,0	8,0	32,0	**91,3**	88	100	88	95
3/8”	9,5	0,7	43,9	8,0	32,0	**84,5**	72	90	81	89
No.4	4,75	0,5	7,9	7,6	31,5	**47,4**	42	52	43	51
No.10	2,00	0,3	4,6	5,2	19,6	**29,7**	25	35	27	33
No.40	0,425	0,3	3,5	3,1	6,4	**13,2**	10	20	10	16
No.80	0,180	0,3	3,1	2,3	3,3	**9,0**	7	14	7	12
No.200	0,075	0,2	2,6	1,7	2,0	**6,5**	3	8	4	8



Şekil 3.2 : Elek analizinde geçen agregaların grafiği.

Agrega kuru numune ağırlığı **1000 gr** olmaktadır (Tablo5.13).

Tablo 3.13 : Karışımda kullanılan agrega % ve KTŞ 2013 limitler (İSFALT).

Kullanım Oranı		Elekte kalan (gr)	Kalan %	Karışım Gradasyonu	K.T.Ş. 2013 Aşınma Tip 1 Tabakası Limitleri			
Elek Boyutu					Şartname		İşyeri Karışım Formülü	
(İnç)	(mm)							
¾"	19,0	**0**	0	**100,0**	100		100	
½"	12,5	**87**	8,7	**91,3**	88	100	88	95
3/8"	9,5	**155**	15,5	**84,5**	72	90	81	89
No.4	4,75	**526**	52,6	**47,4**	42	52	43	51
No.10	2,00	**703**	70,3	**29,7**	25	35	27	33
No.40	0,425	**868**	86,8	**13,2**	10	20	10	16
No.80	0,180	**910**	91	**9,0**	7	14	7	12
No.200	0,075	**935**	93,5	**6,5**	3	8	4	8

3.1.3 Karışımın Deney Sonuçları

Asfalt Institute MS-2 Marshall metoduna göre 2×75 darbeyle 135 °C'de hazırlanan numunelerle yapılan aşınma tabakası dizaynı sonucunda, optimum bitüm; kuru agregaya göre ağırlıkça **% 5,20 ± 0,2** (1000 g kuru agrega + 52,0 gr B 50/70 bitüm) olarak bulunmuştur. Optimum bitüm hesabında Marshall grafiklerinden faydalanılmış, %4 Boşluk değerine karşılık gelen bitüm değeri optimum bitüm olarak alınmıştır. Optimum bitümdeki diğer sonuçlar alt başlıklarda verilmektedir. Numunenin teorik özgül ağırlığı denklem (3.2) esas alınmıştır.

Agreganın ağırlığın % olarak bitüm W_a = %100

Bitüm özgül ağırlık G_b = 1,036 gr/cm^3

Agrega efektif özgül ağırlık G_{ef} =2,711 gr/cm^3

$$D_t=\frac{100+W_a}{\frac{100}{G_{ef}}-\frac{W_a}{G_b}}=\frac{100+0.165}{\frac{100}{2.711}-\frac{0.165}{1.036}}=$$ 2,727gr/cm^3 (Karışımın maksimum teorik özgül ağırlığı)

3.1.3.1 Pratik Özgül Ağırlık

Numunenin pratik özgül ağırlık sonucu Tablo 3.14'te verilmiştir.

Tablo 3.14 : Pratik özgül ağırlık deney sonucu (İSFALT)

Deney Adı	Deney Standardı	Birim	Sonuç	Şartname
Pratik Özgül Ağırlık	TS EN 12697-6 *	gr/cm^3	**2,428**	-

3.1.3.2 Stabilite

Kaplamada trafik yükü altında tekerlek izi oluşmama direncini denir (Tablo 3.15).

Tablo 3.15 : Stabilite deney sonucu (İSFALT)

Deney Adı	Deney Standardı	Birim	Sonuç	Şartname
Marshall Stabilitesi	TS EN 12697-34 *	Kg	**1520**	Min.900

3.1.3.3 Asfalt Dolu Boşluk

Asfalt dolu boşluk hesabi için denklem (3.5) esas alınmıştır (Tablo 3.16).

Boşluk $V_h = \%4$

Agregalar arası boşluk oranı VMA= %14,3

$$V_f = \frac{(VMA - V_h) \times 100}{VMA} = \frac{(14.3 - 4) \times 100}{14.3} = \%\mathbf{72}$$

Tablo 3.16 : Asfalt dolu boşluk sonucu (İSFALT)

Deney Adı	Deney Standardı	Birim	Sonuç	Şartname
Asfaltla (bitüm) dolu boşluk\ V_f	TS EN 12697-8	%	**72,00**	65- 75

3.1.3.4 Boşluk

Boşluk oranı genellikle, aşınma tabakası için %4 boşluk, binder tabakası için (%4-%5) boşluk ve bitümlü temel tabakası için (%5-%6) boşluk olarak şartnameye göre değerlendirilir (Tablo 3.17). Boşluk yüzdesi hesabi için denklem (3.4) esas alınmıştır.

D_T: Teorik Özgül Ağırlık, D_P : Pratik Özgül Ağırlık

$V_h=100(D_T-D_P) /D_T=100(2.529-2.428) / 2.529 =$ **%4**

Tablo 3.17 : Karışımda boşluk oranı sonucu (İSFALT)

Deney Adı	Deney Standardı	Birim	Sonuç	Şartname
Boşluk, V_h	TS EN 12697-8	%	**4,0**	3- 5

3.1.3.5 Agregalar Arası Boşluk

Agregalar arası boşluk (VMA) hesabi için denklem (3.3) esas alınmıştır (Tablo 3.18). Pratik özgül ağırlık D_p= 2,668gr/cm^3

Agrega ağırlığına göre bitüm yüzdesi W_a =%16,5

Agreganın özgül ağırlığı G_{sb} =2.668 gr/cm^3

$$VMA = 100 - (Dp \times 100 - \frac{W_a}{1+\frac{W_a}{100}} / Gsb = 100 - (2.668 \times 100 - \frac{16.5}{1+\frac{16.5}{100}} / 2.668 = \mathbf{\%14.30}$$

Tablo 3.18 : Agregalar arası boşluk oranı (VMA) sonucu (İSFALT)

Deney Adı	Deney Standardı	Birim	Sonuç	Şartname
Agregalar arası boşluk (VMA)	TS EN 12697-8	%	**14,30**	14- 16

Optimum bitümdeki diğer sonuçlar Tablo 3.19'de verilmektedir.

Tablo 3.19 : Optimum bitümdeki diğer sonuçları.

Deney Adı	Deney Standardı	Birim	Sonuç	Şartname
Filler /Bitüm Oranı	-	-	**1,2**	Maks. 1,5
Bitüm % 'si (ağırlıkça,100'e)	TS EN 12697-1	-	**5,20 ± 0,2**	4,0 -7,0
Akma	TS EN 12697-34 *	mm	**3,6**	2- 4

3.1.3.6 Optimum Bitüm Yüzdesinin Belirlenmesi

Gereken analizler yapıldıktan sonra, (D_p , V_f , V_h , stabilite) - W_a grafiklerden elde edilen bitüm oranın ortalaması ile dizayn optimum bitüm değeri **% 5,20 ± 0,2** (1000 g kuru agrega + 52,0 gr B 50/70 bitüm) olarak bulunmuştur.

3.2 KATKILI TMA MALZEME ÖZELLİKLERİ

3.2.1 Katkılı TMA'da Agrega Özellikleri

İstanbul ili Cebeci bölgesindeki Cebeci Su-Taş Ocağı'ndaki kumtaşı agregalar kullanılmış, agregalara ait fiziksel özellikler Tablo 3.20-Tablo 3.28'de sunulmuştur.

Tablo 3.20 : Agregalara uygulanan deneyler

Deney Adı	Birimi	Sonuç	K.T.Ş (2013)
Los Angeles, Aşınma Kaybı	%	**20,60**	Maks. %25
Na_2SO_4 ile Dayanıklılık, Kayıp	%	**1,00**	Maks. %8
Yassılık İndeksi	%	**14,1**	Maks. %25
Cilalanma Değeri	-	**62**	Min-50
Soyulma Mukavemeti	%	**50-60**	Min %60
Kil Topakları ve Ufalanabilir Daneler	%	**Yok**	-

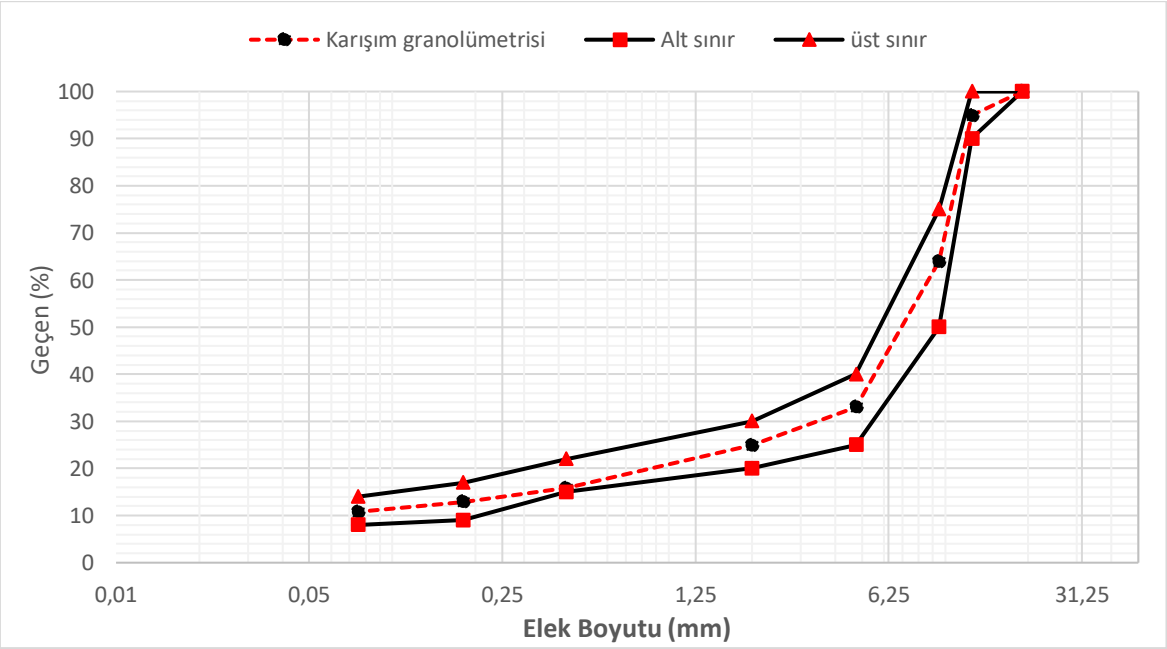
3.2.2 Elek Analizi

Dizaynda, Cebeci Su-Taş ocağından üretilen (12mm–19mm), (5mm–12mm) dane boyutu agregalar ve (0–5mm) taş tozu kullanılmıştır. Tablo 3.21'de agregaların kullanım oranlan ile dizayn gradasyonu ve tolerans limitleri verilmiştir. Şekil 3.3'te görüldüğü üzere karışım gradasyonu üst ve alt sınır şartnamesinde yer aşmaktadır.

Tablo 3.21 : TMA karışımın gradasyonu.

Kullanım Oranı		**11%**	**57,0%**	**24,0%**	**8%**	**Karışım Gradasyonu**	**K.T.Ş. 2013 TMA Tip 1 Limitleri**			
Elek Boyutu		**12-19 mm**	**5-12 mm**	**0-5 mm**	**Filler**		**Şartname**		**Tolerans Limitleri**	
(İnç)	**(mm)**									
¾"	19	100	100	100	100	**100**	100		100	
½"	12,5	53,7	100	100	100	**94,9**	90	100	90,9	98,9
3/8"	9,5	5	55	100	100	**63,9**	50	75	59,9	67,9
No.4	4,75	0,9	2,1	98,9	100	**33**	25	40	30	36
No.10	2	0	0,9	68,2	100	**24,9**	20	30	17	27,9
No.40	0,425	0	0	32,5	100	**15,8**	15	22	12,8	18,8
No.80	0,18	0	0	20,6	100	**12,9**	9	17	9,9	15,9
No.200	0,075	0	0	12,3	98	**10,8**	8	14	8,8	12,8

Şekil 3.3'te de görüleceği üzere arışım gradasyonu sınır koşulları sağlanmıştır.



Şekil 3.3 : Karışım granolümetresi grafiği

3.2.3 Agrega Özgül Ağırlıkları

Dizayn gradasyonu uygun olarak hazırlanan agregaların özgül ağırlığı ve su absorbsiyonu Tablo 3.22'de verilmiştir.

Tablo 3.22 : Agregaların özgül ağırlığı ve su absorbsiyonu.

Deney Adı	Birimi	Kaba Agrega	İnce Agrega	Filler
Zahiri Özgül Ağırlık	gr/cm^3	2,75	2,767	2,78
Hacim Özgül Ağırlık	gr/cm^3	2,705	2,705	-
Su Absorbsiyonu	%	0,55	1,13	-

3.2.4 TMA'da Kullanılan Bitüm Özellikleri

Aşınma tabakası TMA-Tip1 (0/19) olarak seçilmiştir. TMA yapımında, TÜPRAŞ-İzmit kaynaklı AC 50/70, SBS polimeri (PMB 70/16) ve %0.35 selülozik elyaf ile modifiyeli bitüm kullanılmıştır. Bitümün süzülmesini önlemek için karşımda Selülozik Fiber elyaf kullanılmıştır. Deney sonuçlarına göre %4,5 SBS bağlayıcı ile hazırlanan karışım şartnameye göre ideal sonuç verildiği tespit edilmiştir. Tablo 3.23'te modifiyeli bitüm deney sonuçları verilmiştir.

Tablo 3.23 : Modifiyeli bitüm özelliklerin deney sonuçları.

Deney Adı	Birimi	Deney Standardı	%4,5 SBS+%0,35 Selülozik Fiber elyaf Modifiye Bitüm Sonuçları
Penetrasyon, (25°C, 100 gr, 5 s)	0,1 mm	TS EN 1426	**38,8**
Yumuşama Noktası (min.)	°C	TS EN 1427	**62,1**
Kuvvet ölçümlü Düktilite (min.)	J	TS EN 13589	**100+**
Elastik Geri Dönme (min.)	%	TS EN 13398	**75,3**
Parlama Noktası (min.)	°C	TS EN 2592	**310**
Özgül Ağırlık	gr/cm^3	TS EN 5326	**1,025**
Depolama Stabilitesi			
Yumuşama Noktası Farkı (maks.)	°C	TS EN13399	**1,5**
Penetrasyon Farkı (maks.)	0,1 mm		**1,7**
Dinamik Kesme Reometresi (DSR) (min.)	°C	TS EN 4770 AASHTO T315	**74,3**
Dönmeli İnce Film Etüvü Deneyi			
Kütle Kaybı (maks.)	%	TS EN 12607-1	**0**
Yumuşama Noktası (min.)	°C		**62,1**
Yumuşama Noktasındaki Değişiklik			
Artma (maks.)	°C	TS EN 1427	**0**
Azalma (maks.)	°C		**0**
Kalıcı Penetrasyon (min.)	%	TS EN 1426	**92,5**
Dinamik Kesme Reometresi (DSR)	°C	TS EN 14770 AASHTO T315	**70,6**
(RTFOT+PAV) yaşlandırılmış modifiye bitüm deneyleri			
DSR (maks.)	°C	TS EN 14770 AASHTO T315	**21**
Kiriş Eğme Reometresi (BBR) (maks.)	°C	TS EN 14771- AASHTO T313	**-6**

3.2.5 Marshal Karışım Dizaynı

Karışım aygırlığının %0,35 oranında Selülozik Fiber elyaf ve bitüm miktarının %4,5 oranında SBS modifiyeli polimer kullanılmıştır. Marshall metoduna göre 2x50 darbeyle hazırlanan numunelerle TMA tabakası dizaynı sonucunda, optimum bitüm miktarları, kuru agregaya göre ağırlıkça kumtaşı %6,5 olarak bulunmuştur. Optimum bitüm tespit edildikten sonra Marshall dizayn değerleri Tablo 3.24'te verilmektedir.

Tablo 3.24 : Marshal karışım dizayn sonuçları.

Marshal Karışım Dizaynı Özellikleri	Birim	Sonuç	Şartname
Bitüm % 'si (ağırlıkça,100'e)	%	**6,5**	±0,3
Elyaf Miktarı	%	**0,35**	-
Scheelenberg Bitüm Süzülme Deneyi	%	**0,03**	Maks. 0,03
Pratik Özgül Ağırlık	gr/cm^3	**2,404**	
Marshall Stabilitesi	Kg	**894**	-
Boşluk	%	**3,01**	2-4
Asfaltla (bitüm) dolu boşluk	%	**82**	-
Agregalar arası boşluk (VMA)	%	**16,7**	Min 16
Akma	mm	**3,04**	-
Sıkışma Kontrolü			
D_p arazı	gr/cm^3	**2,356**	-
Dp IKF	gr/cm^3	**2,388**	-
D_T IKF	gr/cm^3	**2,479**	-
Sıkışma	%	**98,7**	Min 97
Bitüm Süzülme	%	**0,19**	Maks. 0,3

3.2.6 Tekerlek İzinde Oturma

TMA numunelerinin üzerinde, Fransız trafik simülatör cihazı kullanılarak tekerlek izinde oturma deneyleri yapılıp, performansı bakılmıştır (Tablo 3.25).

Tablo 3.25 : Tekerlek izni deney sonuçları.

Devir sayısı	Birim	TİO Derinliği	Deney Standardı
1000	%	**0,46**	TS EN 12697-22
3000	%	**1,04**	
5000	%	**1,2**	
10000	%	**1,32**	
30000	%	**1,45**	
50000	%	**1,66**	

3.2.7 İndirekt Çekme Mukavemeti

BSK'lar, sudan kaynaklanan bozulmalara karşı direncinin incelenmesi için numuneler üzerinde koşullu ve koşulsuz şartlar altında, indirekt çekmek mukavemeti deneyi uygulamıştır (Tablo 2.26).

Tablo 3.26 : İndirekt çekmek mukavemeti deney sonuçları.

Deney Adı	Birim	Sonuç	Şartname
Koşullu indirekt çekmek mukavemeti	Kg/cm^2	**9,2**	-
Koşulsuz indirekt çekmek mukavemeti	Kg/cm^2	**10,5**	-
İndirekt çekmek mukavemeti oranı	%	**87,6**	min %80

3.3 TABAKALARIN ESNEKLİK MODÜLÜ

Karışımlardaki, bağlayıcının özelliklerini ve denklemleri kullanılarak, esneklik modülü belirlemiştir (Alhadidy, Tan, 2009). Esneklik modülü belirlenmek için aşağıda detaylandırılmış denklemler kullanılmaktadır (Denklem 3.1-3.5).

$$E_b=1.157\times10^{-7}\times t^{-0.368}\times2.718^{-I.P.}\ (T_{yn}-T_{asf})^5 \quad (3.1)$$

$E_b > 5$ Mpa ; E_b: bitüm bağlayıcının elastik modülü (MPa); t: yükleme süresi ($0.01sn < t < 0.1sn$)

IP: penetrasyon indeksi ($-1 < PI < 1$); T_{yn}: yumuşama noktası (°C) **;** T_{asf}: Asfalt sıcaklığı

$20°C < (T_{R\&B}-T_{asf}) < 60°C$

$$PI=(20-500A)/(1+50A) \quad (3.2)$$

$$A=[\log800-\log P_{25}]/(T_{yn}-25) \quad (3.3)$$

P_{25}: 25°C-Penetrasyon

$$E_m= E_b\ [1+(257.5-2.5VMA)/(n*(VMA-3))]^n \quad (3.4)$$

$$n=0.83\log[4\times10^4/\ E_b] \quad (3.5)$$

E_m: Asfalt karışımın elastik modülü (MPa); VMA: Agregalar arası boşluk ($\%12 < VMA < \%30$)

Tablo 3.27'de modifiyeli TMA ve modifiyesiz BSK'nın esneklik modülü ve denklemlerde kullanılan parametreleri verilmiştir. Katkısız BSK'nın yumuşama noktası 51.7°C seçilmiştir (Karakaş, 2014).

Tablo 3.27 : Asfalt karışımların esneklik modülleri

	Penetrasyon	T_{yn} (°C)	t (sn)	PI	E_b (Mpa)	VMA (%)	E_m (Mpa)
Katkılı TMA	38.8	62.1	0.1	0.8255	15.64	16.7	3208
Katkısız BSK	59	51.7	0.1	-0.3846	5.386	14.3	2933

3.4 TEMEL VE ALTTEMEL TABAKASINDA KULLANILAN AGREGA

Tablo 3.28'deki elek analizi sonuçları granüler temel tabakasında kullanılan kırmataş agregaların tip A gradasyonu şartname limitlerin ortalamasına göre belirlenip kullanılmıştır.

Tablo 3.28 : Granüler temel tabakası gradasyonu.

Elek Boyutu		Elek analizi % geçen	K.T.Ş. Temel Tabakası Şartname Limitleri		
(İnç)	(mm)		A	B	C
2	50	**100**	100	--	-
1 1/2"	37,5	**90**	80-100	100	-
1"	25	**75**	60-90	70-100	100
3/4"	19	**63**	45-80	60-92	75-100
3/8"	9,5	**45**	30-70	40-75	50-85
No 4	4,75	**40**	25-55	30-60	35-65
No 10	2	**28**	15-40	20-45	25-50
No 40	0,425	**14**	8-20	10-25	12-30
No 200	0,075	**5**	2-8	0-12	0-12

Alttemel tabakası yapımında yoğun kalker kullanılan agrega Tip-A gradasyon şartname limitlerin ortalamasına göre belirlenmiştir (Tablo 3.29).

Tablo 3.29 : Alttemel malzemesi gradasyonu.

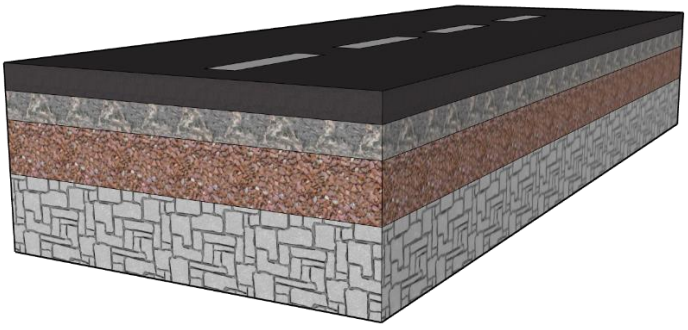
Elek Boyutu		Elek analizi % geçen	K.T.Ş. Alttemel Tabakası Şartname Limitleri	
(İnç)	(mm)		Tip-A	Tip-B
3	75	**100**	100	-
2	50	-	-	100
1 1/2"	37,5	**93**	85-100	80-100
1"	25	-	-	60-90
3/4"	19	**85**	70-100	45-80
3/8"	9,5	**65**	45-80	30-70
No 4	4,75	**53**	30-75	25-55
No 10	2	-	-	15-40
No 40	0,425	**18**	10-25	10-20
No 200	0,075	**6**	0-12	0-12

3.5 YÖNTEM

Sonlu elemanlar yöntemi kullanarak karmaşık bir probleme daha basit bir modelle değiştirilerek çözüm bulmaktır. Yöntemde çözüm bölgesi, birbirine bağlı, küçük parçacıkların (elemanların) bölünmüş, alt bölgeler kümesidir, elemanlar veya sonlu elemanlar olarak kabul edilir. Daha sonra, her bir parça veya eleman için uygun bir yaklaşık çözüm varsayılır. Bu bileşenleri monte ederek, sistemin genel denge koşulları çıkarılır ve Sınır değer probleminin bu formülasyonu sonucu bir cebirsel denklem sistemi elde edilir. Abaqus'ta yapılan yol üstyapısı modellemesi sonlu elemanlar yöntemiyle alt başlıklarda detaylandırılmıştır.

3.5.1 Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Yol Üstyapı Tabakaların Modellemesi

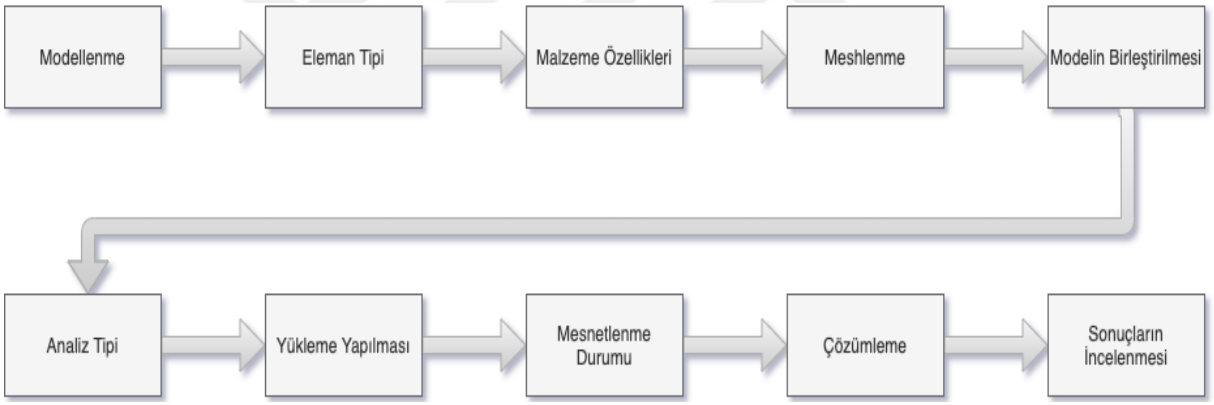
Çalışmada farklı kalınlık ve özelliklerdeki BSK karışımların yol üstyapılarında trafiksiz ve trafikteki arasında tekrarlanan yükler altında değişik çevre koşuları (iklim) davranışları belirlenmiştir. Bu çalışmada üç boyutlu bir yol üstyapısı modellenip, statik ve dinamik analizleri yapılmıştır. Abaqus bilgisayar destekli program kullanılarak üç katmanlı bir yol tasarlanmıştır. Modellenen yol tabakaları sırasıyla, Kaplama tabakası, Temel Tabakası ve Alt temel tabası olarak tasarlanmıştır (Şekil 3.4). Yol katmanların hepsinde elastik izotropik özelliği kabul edilip tasarlanmıştır. Yükleme (tekerlek temas) alanına göre dizayn üstyapısı dikdörtgen olarak varsayılmıştır. Dikdörtgen, dairesel ve eliptik yüzeyler dahil olmak üzere tekerlek ve asfalt arasındaki temas yüzeyini modellemek için farklı şekiller vardır. Geçmiş çalışmalara göre dikdörtgen bir yüzey alanı kullanmak için kabul edilebilir sonuçlar göstermektedir. Ayrıca, eliptik yüzeyleri modelleme ve meshlemenin zorluğundan dolayı, bu çalışmada basitleştirmek için temas yüzey alanı dikdörtgen olarak dikkate alınmıştır (Sun, Duan 2013; Yanjing vd. 2011). Bu maksatla ileriye yönelik tahminlerde deneyleri destekleyen Abaqus sonlu elemanlar programı kullanılmıştır. Bu bağlamda yol üstyapısının yük altındaki davranışları belirlenmiştir.



Şekil 3.4 : 3 Boyutlu yol üstyapısı en kesiti.

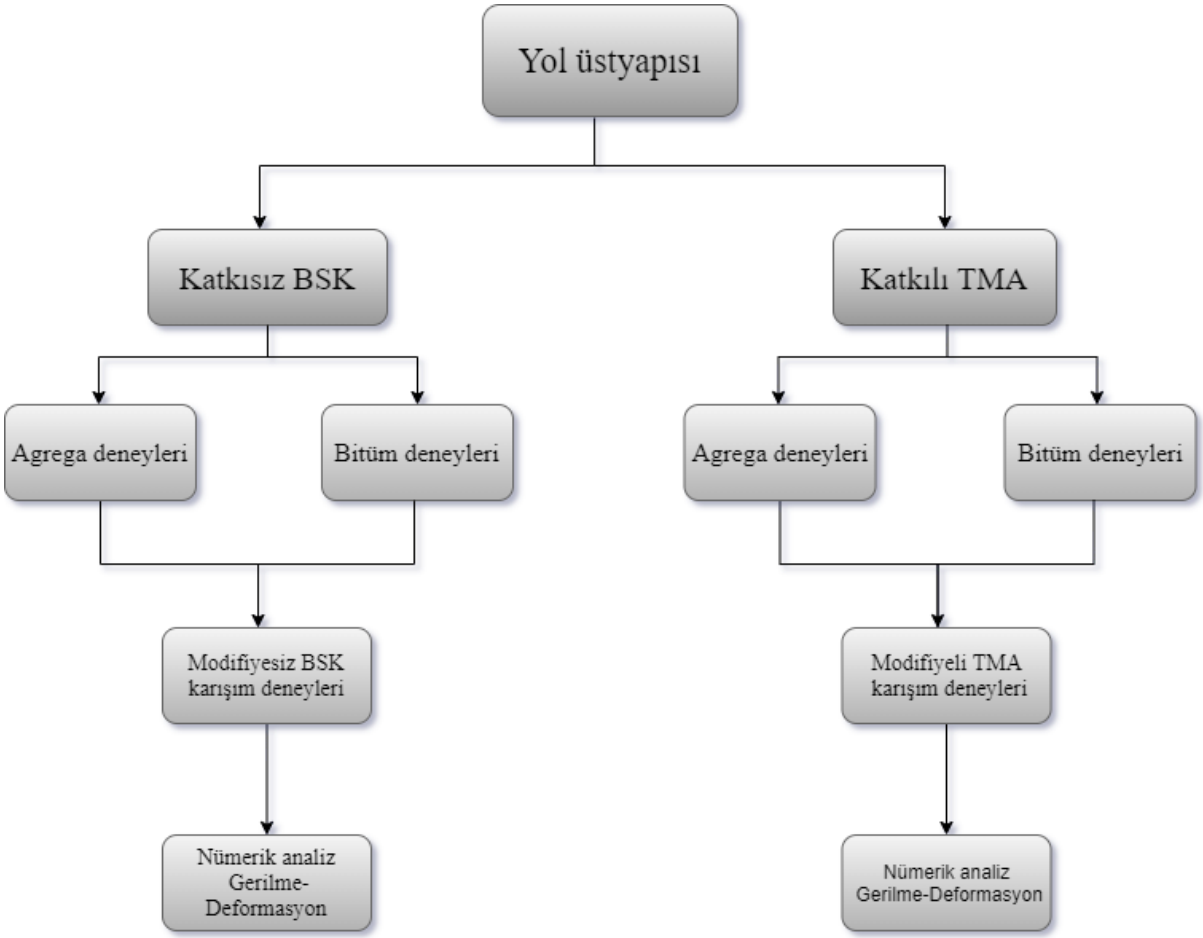
Gerilme, Gerinim ve Deformasyon, kullanılan sonlu eleman yazılımından (Abaqus CAE) beklenen sonuçlardır. İlk aşamada yapılacak simülasyon modellerinin mekanik özellikleri atanarak yol tabakaları tasarlanır. Abaqus CAE Yazılımda kullanılan tüm malzeme özellikleri ampirik sonuçlardan elde edilmiş olup, bu bağlamda malzemeye ait elastik modülleri ve poisson oranları, özgül ağırlıkları ve dizayn koşulları içermektedir. Simülasyonda yer alan, yol üst yapısını oluşturan tabakalar ve zemin etkileşimi ile çevresel koşullar (iklim ve trafik yükü) dikkate alınarak yapısal analiz yapılmıştır. 3 Boyutlu modellerin farklı tabakalarında homojen malzemeler, elastik, eksene simetrik olarak uygulanan tekerlek yükleri ve doğrusal olmayan malzemeler uygulanacaktır. Tüm model bileşenleri sağlam bir şekilde sabitlenirken katmanlar arasında sürtünme ihmal edilmiştir (Şekil 3.5).

Abaqus CAE yazılımında simülasyonunu yapmak için modelin sınır koşulları, gerçek bir yol üstyapısı koşullarını göre tanımlanmalıdır. Modelin yanlarının dikey olarak hareket etmesine izin verilir veya modelin taban zemini hareketsiz olarak tanımlanmalıdır (Sun ve Duan 2013).



Şekil 3.5 : Abaqus programın işleyiş diyagramı.

Şekil 3.6'te görüldüğü üzere yapılacak olan yol üstyapısının karşılaştırma ve nümerik analizin çalışma şemasına göre uygulanmıştır.



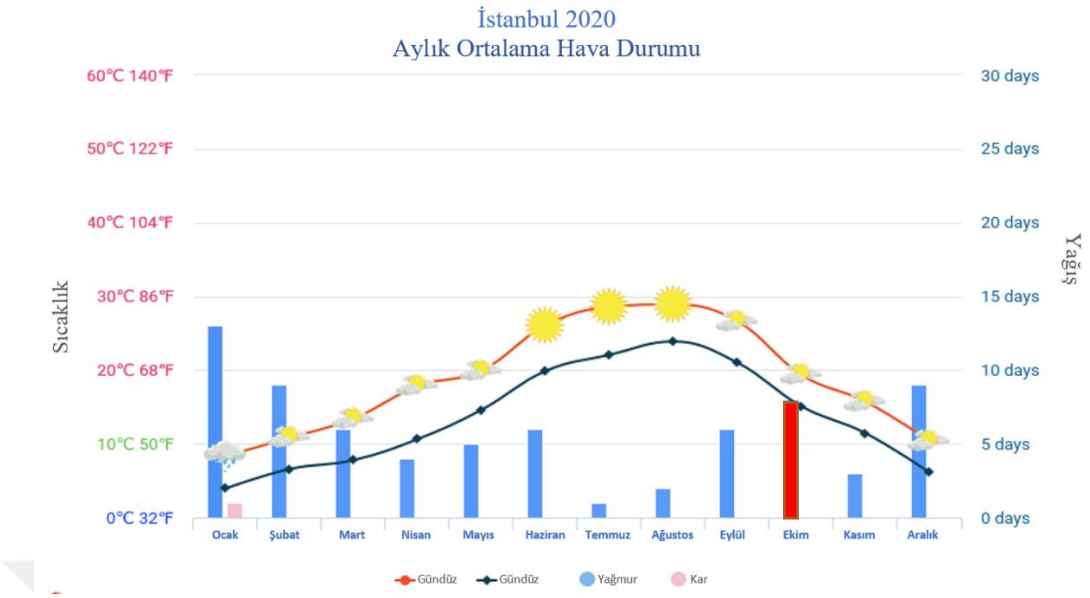
Şekil 3.6 : Yol üstyapısının çalışma şeması

4. BULGULAR

Bu çalışmada, İstanbul şehir içi yolcu trafiğinde Avcılar İlçesi sınırları içerisinde yer alan Kınalı-Avcılar arası TEM otoyolunda, yapılacak yol güzergahı üzerindeki esnek yol kaplaması baz alınmıştır. Uygulama alanında aynı güzergâh üzerinde ve aynı trafik yükü altındaki modifiyeli TMA ve modifiyesiz BSK ile hazırlanan asfalt betonu kaplamasının özellikleri karşılaştırılmıştır (Şekil4.1). Yapılan ampirik deneyleri ve nümerik analizler İstanbul'daki trafik ve iklim gibi çevresel koşulları dikkate alınmıştır (Şekil 4.2). Çalışmada, bir yıllık periyotla, 1. Ay ve 12. Ay olmak üzere değişik kalınlıklarda (4, 6, 8 cm) modeller hazırlanıp, nümerik analizi yapılmış olup ve mevcut yol ağının hizmete açılmanın ilk ve 12 ayın trafik ve iklim gibi çevre koşulları altında sergilediği performansı incelenmiştir. Laboratuvar deney sonuçlarına göre bir yıllık periyotta, asfalt karışımı esneklik modülü başlangıca göre 12. ayda modifiyesiz BSK 2,8 kat ve modifiyeli TMA 3,1 kat artış göstermiştir bunun yanı sıra 12. Ayda tekrarlanan yük sayısı 3091 ton varsayılmıştır (Karakaş, Ortes 2017). Çalışmada başlangıç ve 12. Ayın deneysel malzeme özellikleri Tablo 4.1 ve Tablo 4.2'de yer almaktadır, benzer trafik ve iklim koşullar etkisinde 12. ayda kaplamadaki esneklik modülünde benzer şekilde artış olduğu varsayılmıştır. Yapılan asfalt karışım sermesi Ekim aynında yapılıp, esneklik modülü de Ekim ayın sıcaklığını göre hesaplanmıştır.



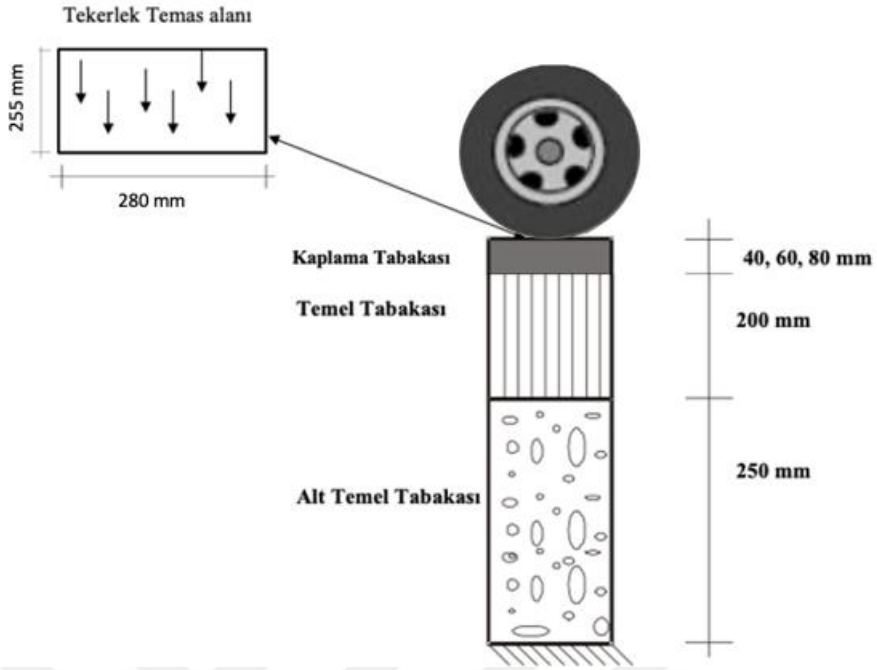
Şekil 4.1: TEM Otoyolu, Avcılar-Kınalı istikameti (Arsalan, 2014).



Şekil 4.2: İstanbul'un 2019-2020 yılına ait ortalama yağış ve sıcaklık grafiği (hikb, 2020)

4.1 MODELLEME

Abaqus yazılımında toplam üç model hazırlanmıştır. Kaplama tabakası 4, 6 ve 8 cm olmak üzere üç faklı kalınlığa sahiptir. Temel ve alt temel tabakaları sırasıyla, 20 cm ve 25 cm olarak seçilmiştir. 689KPa tekerlek basıncı tekrarlanan yük sayısını içinde olduğu varsayılmıştır. Çeşitli standart tekerlek temas alanların ortalaması olarak (25.5×28) cm^2 dörtgen olarak varsayılan temas alanına uygulanmıştır (Şekil 4.3). Modifiyeli ve modifiyesiz BSK-TMA ve agreganın 1. Ay (başlangıç) ve 12. Ay'a ait tabakaların malzeme özellikleri Tablo 4.1 ve Tablo 4.2'de verilmiştir. Temel tabakasında kullanılan Cebeci kaynaklı agreganın özgül ağırlığı 2690 Kg/m^3 olarak seçilmiştir (Akyüncü vd. 2014). Alttemel tabakasında yoğun kalker seçilip, 2700 Kg/m^3 özgül ağırlığına sahiptir (İMO, Ocak 2021). Kaplama tabakası modifiyesiz BSK'nın toplam ağırlıkça %5,2 optimum bitüm ve modifiyeli TMA toplam ağırlıkça %6,5 (%4,5 SBS+0,35 Elyaf) optimum bitüm içeriği ile nominal maksimum agrega boyutu 19,0 mm olan bir asfalt beton karışımından oluşmaktadır. Yapılan analizlerde İstanbul'daki çevresel koşullar dikkate alınmıştır. Başlangıç ayda 689 KPa basınç yükü ve 12. Ayda 424542 KPa (3091 Ton) tekrarlanan yük sayısı eşdeğer dingil baz alınarak uygulanmıştır. Temel ve alttemel tabakasının esneklik modülleri sırasıyla 150 MPa ve 100 MPa seçilmiştir (Karakaş, Ortes 2017). Çalışmada SI (mm) birimler sistemi esas alınmıştır.



Şekil 4.3: Yol üstyapısı tabakaların kalınlığı

Tablo 4.1: Modifiyesiz BSK yol üstyapısının malzeme özellikleri

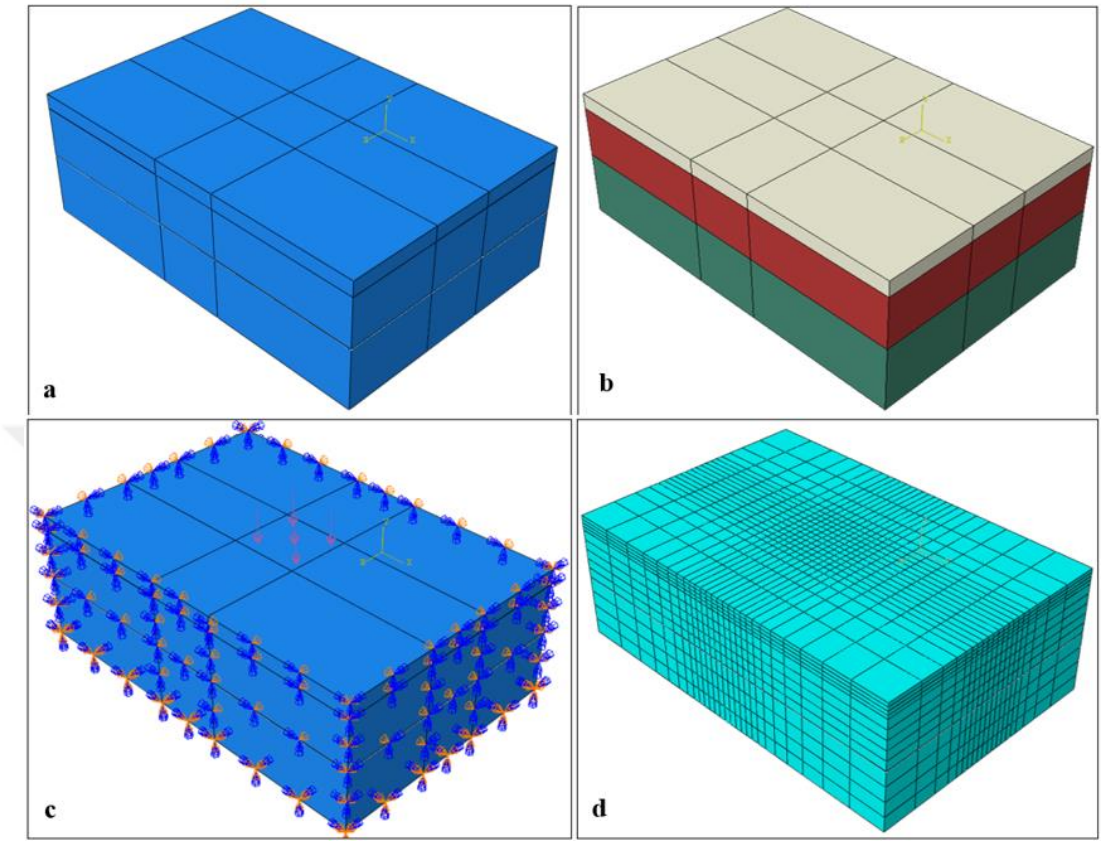
Tabakalar	Kalınlık (cm)	Esneklik Modülü (MPa)		Yoğunluk (Kg/m^3)	Poisson oranı	Eşdeğer Aks yükü (KP)	
		1.Ay	12.Ay			1.Ay	12.Ay
Kaplama	4, 6 ve 8	2933	8212	2404	0.35	689	424542
Temel	20	150	150	2690	0.40		
Alt Temel	25	100	100	2700	0.45		

Tablo 4.2: Modifiyeli TMA yol üstyapısının malzeme özellikleri.

Tabakalar	Kalınlık (cm)	Esneklik Modülü (MPa)		Yoğunluk (Kg/m^3)	Poisson Oranı	Eşdeğer Aks Yükü (KPa)	
		1.Ay	12.Ay			1.Ay	12.Ay
Kaplama	4, 6 ve 8	3208	9945	2356	0.35	689	424542
Temel	20	150	150	2690	0.40		
Alt Temel	25	100	100	2700	0.45		

Abaqus yazılımında simülasyon yapmak için sırayla; modelin eleman tipleri ve boyutları tanımlanacak, (Şekil 4.3'te görüldüğü gibi eleman tipi Solid ve 3 boyutlu formatı seçilmiştir), malzeme özellikleri atanacak (Şekil 4.3), yükleme, mesnetlenme işlemleri yapılacak, modelin

boyutuna göre meshlenme yapılacak (Şekil 4.4) ve son aşamada analiz işlemi gerçekleştirecektir.



Şekil 4.4: a: Modelleme, b: özellikleri atanması, c: yükleme-mesnetlenme, d: Meshlenme

4.2 1. AY ABAQUS NÜMERİK ANALİZ SONUÇLARI

Farklı kaplama kalınlıklarına sahip yol üstyapısı sonlu eleman modelleri hazırlanıp, modellerin tümünde elastik-izotropik kabuller göz önünde alınarak yüklemeler uygulanmıştır. Modele C3D20 ya da ikinci dereceden altı yüzlü (Quadratic Hexahedral) eleman tipi atandı. Modellerin tümünde hassas sonuç elde etmek için tekerlek basınç alanına doğru mesh aralığı küçük alınmıştr. Her tabakanın temas yüzeylerin sürtünmesi ihmal edilmiştir. Modeller kalınlıklarına göre farklı elemanlara ve düğüm noktalara sahiptir, bu sebeple yaklaşık bir sonuç gösterilmesi sağlanmıştır. Sonlu elemanlar yönteminde modelleri için gerekli sınır koşulları gerçek çalışma koşullarına göre atanmıştır. Başlangıç (1. Ay) değişik kaplama kalınlığa sahip yol üstyapısında tekrarlı yük olmadan, 689KPa lastik basınç yükü yüklenip mevcut durum analiz değerlendirmesi yapıldı. Daha sonra 12. Ayda 424542 KPa tekrarlanan eşdeğer aks yükü modellere yüklenip, analiz edilmiştir. Modellerin mesh özellikleri Tablo 4.3'te verilmiştir.

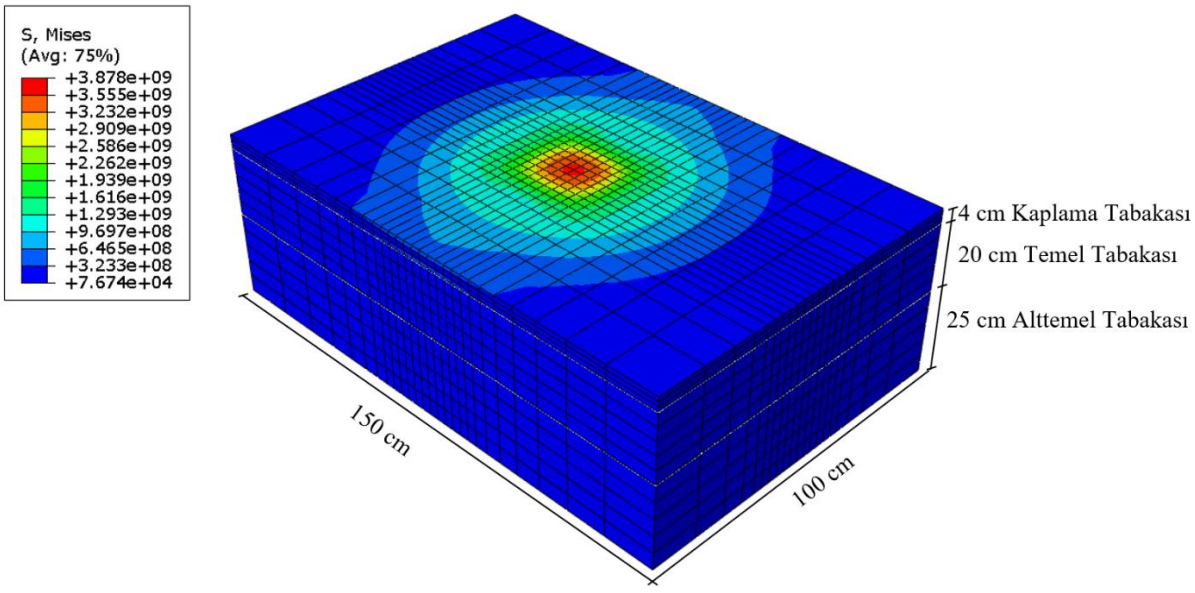
Tablo 4.3 : Modellerin mesh özellikleri.

Modeller	Eleman Sayısı	Düğüm Nokta Sayısı	Eleman tipi
Model 1 (4 cm Kaplama yol üstyapısı)	6760	33819	C3D20
Model 2 (6 cm Kaplama yol üstyapısı)	6760	33819	C3D20
Model 3 (8 cm Kaplama yol üstyapısı)	7280	36039	C3D20

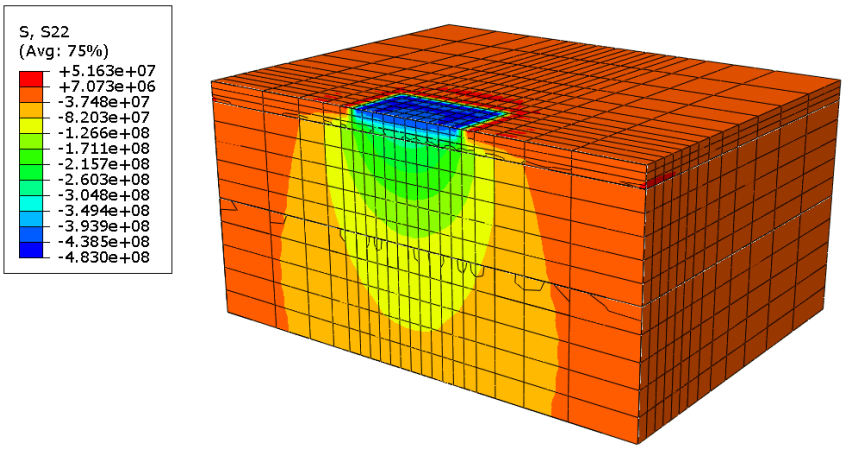
C3D20: Tuğla şeklindeki ikinci mertebeden 3boyutlu eleman olan C3D20, simülasyonlar yapıda meydana gelen bükülme için en iyi sonuçları vermektedir.

4.2.1 Model 1

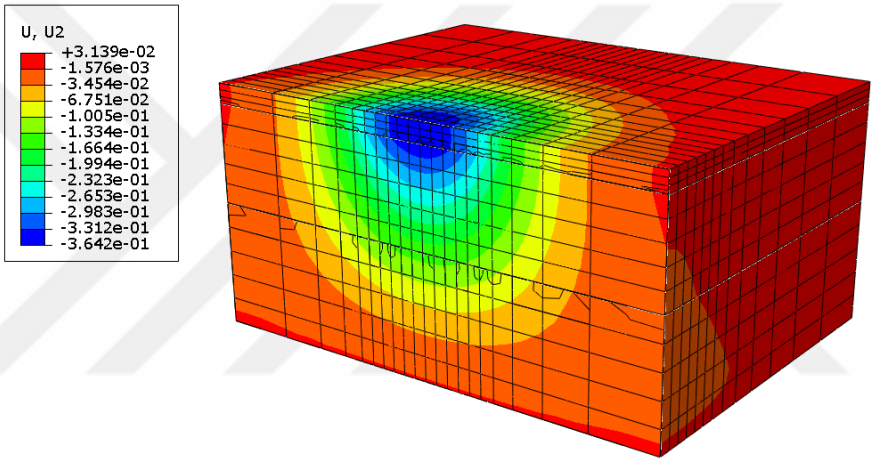
Çalışmada üç katmanlı yol sistemi üç boyutlu olarak modellenmiştir. Sonlu elemanlar modelinde kullanılan her tabakanın malzeme özellikleri Tablo 4.1 ve Tablo 4.2'de verilmiştir, model 1 kaplama tabakasının kalınlığı 4 cm olarak seçilmiş olup, katkılı TMA ve katkısız BSK yol üstyapısı için iki ayrı model oluşturulmuştur. Yapılan modellemelerde yol üstyapısı 100 cm genişliğinde, 150 cm uzunluğunda ve 49 cm derinliğinde, Abaqus'te sonlu elemanlar yöntemiyle tasarlanıp simüle edilmiştir (Şekil 4.1). Modifiyeli ve modifiyesiz üstyapı tabakaları sırasıyla, kaplama tabakası 4 cm kalınlığında modfiyesiz asfalt betonu BSK ve modifiyeli TMA serilmiştir, temel tabakasına 20 cm kırmataşı ve alt tabakası 25 cm yoğun kalker agregası ile yol üstyapısı dizayn kabul edilmiştir. 1. Ayda sadece 689 KPa, ve 12. Ayda 424542 KPa tekrarlanan eşdeğer aks yükü modellere yüklenip, analiz edilmiştir. Şekil 4.5, Şekil 4.6 ve Şekil 4.7'de görüldüğü üzere model 1'in (katkılı TMA) Abaqus yazılımı ile nümerik analizde tekerlek basınç altında oluşan deformasyon ve gerilmeler tahmin edilmiştir.



Şekil 4.5 : Model 1 Von Mises gerilmesi.



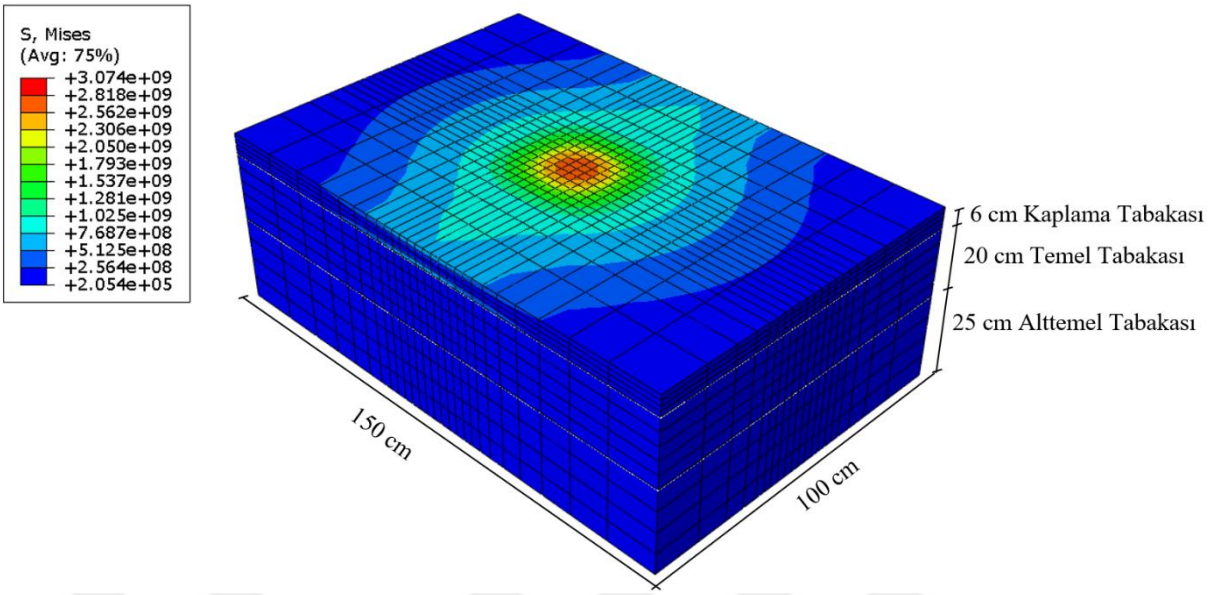
Şekil 4.6 : Model 1 Düşey gerilmesi (en kesiti).



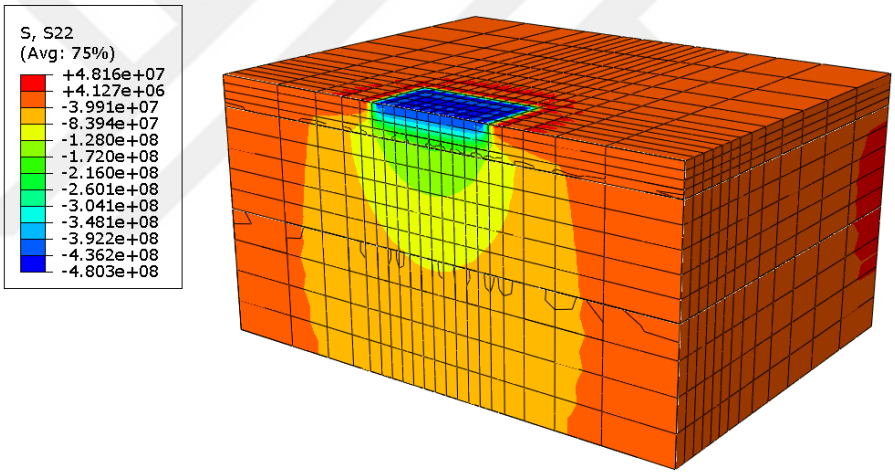
Şekil 4.7 : Model 1 Deformasyonu (en kesiti).

4.2.2 Model 2

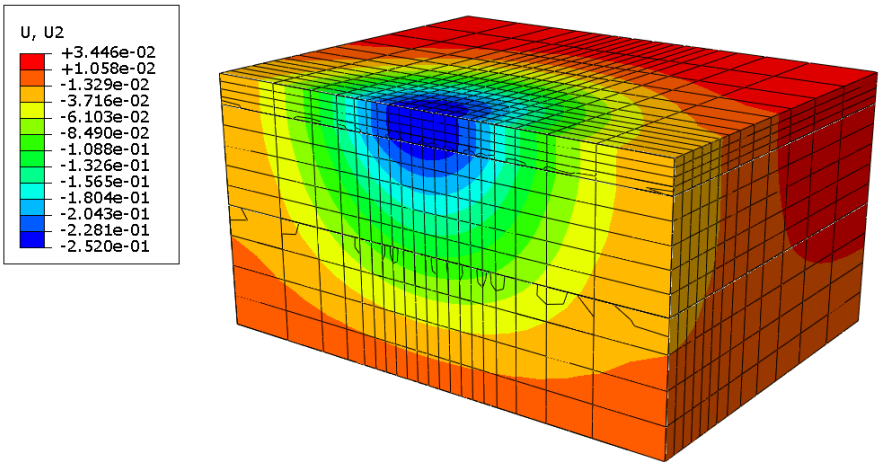
Model 2'nin (katkılı ve katkısız) tüm malzeme özellikleri model 1 ile aynı olup, ancak kaplama tabakanın kalınlığı 6 cm olarak seçilmiştir, diğer malzeme özellikleri Tablo 4.1 ve Tablo 4.2'de verilmiştir. Model 2 (katkılı TMA) için Abaqus yazılımı ile nümerik analizi gerçekleştirilmiş olup, eşdeğer aks yükü altında tabakalar arasında meydana gelen gerilme ve deformasyon Şekil 4.8 ve Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'da görülmektedir.



Şekil 4.8 : Model 2 Von Mises gerilmesi.



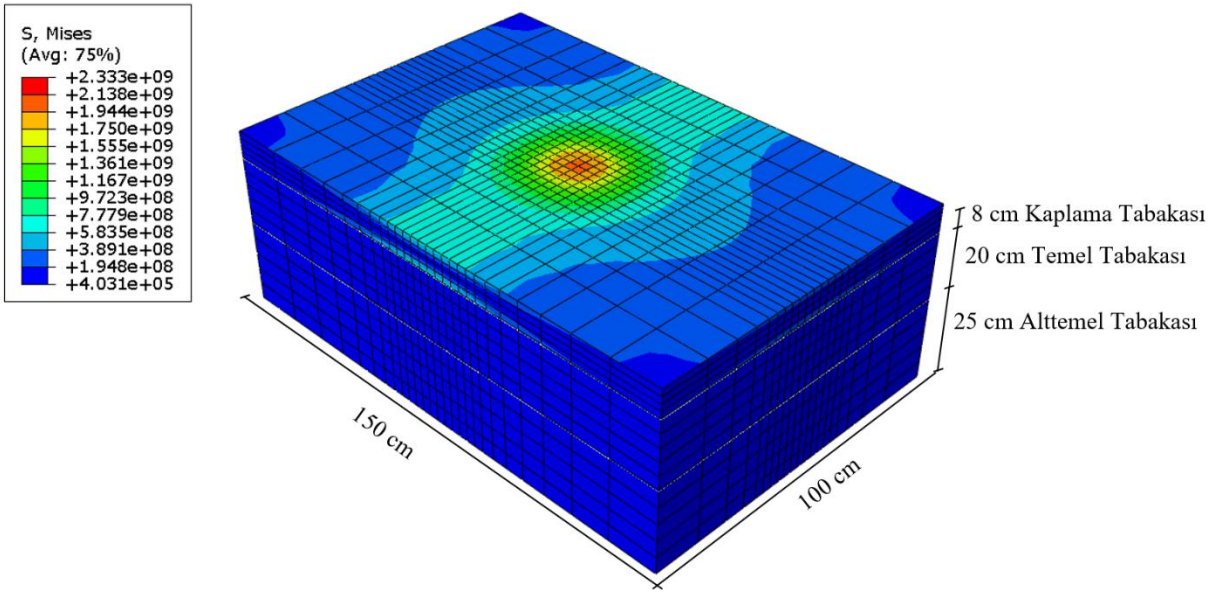
Şekil 4.9 : Model 2 Düşey gerilmesi (en kesiti).



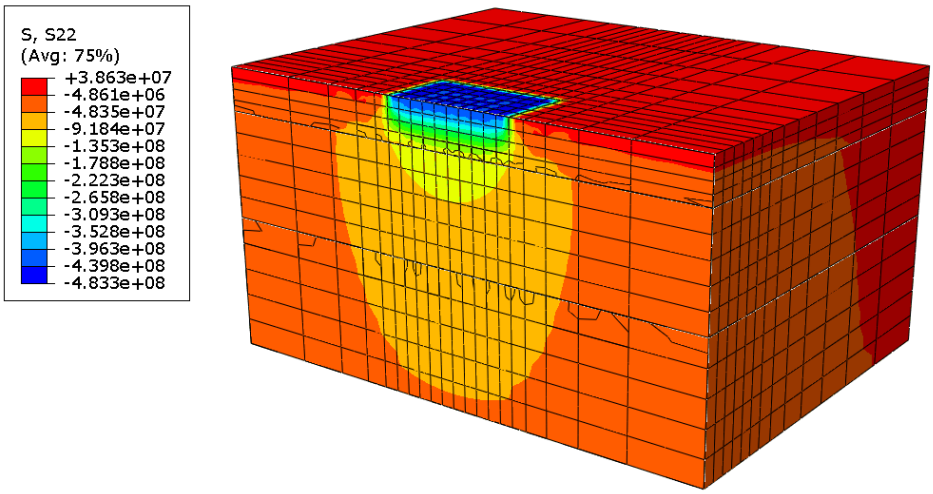
Şekil 4.10 : Model 2 Deformasyonu (en kesiti).

4.2.3 Model 3

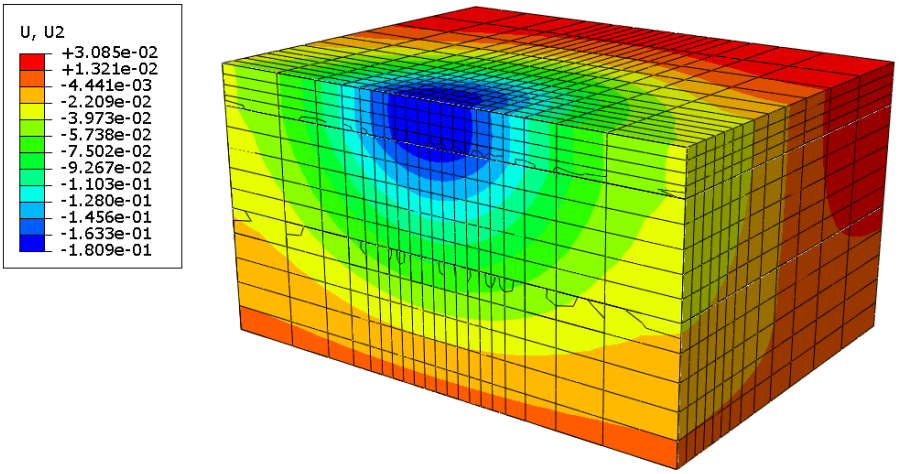
Model 3'ün (katkılı ve katkısız) tüm malzeme özellikleri model 1 ve model 2 ile benzer şeklindedir, fakat kaplama tabakanın kalınlığı 8 cm olarak seçilmiştir. Diğer malzeme özellikleri Tablo 4.1 ve Tablo 4.2'de verilmiştir. Model 3'te (katkılı TMA) eşdeğer aks yükü altında, katmanlar arasında oluşan yaklaşık gerilme ve deformasyon sunulmuştur.



Şekil 4.11 : Model 3 Von Mises gerilmesi.



Şekil 4.12 : Model 3 Düşey gerilmesi (en kesiti).



Şekil 4.13 : Model 3 Deformasyonu (en kesiti).

4.3 1. AY MODELLERIN SONUÇ KARŞILAŞTIRMASI

4.3.1 Von-Mises Gerilmelerin Karşılaştırması

Yol üstyapısı hizmet servisi açılınca, başlangıçta hiç araç geçmeden ve tekerrürlü yük olmadan sadece 689KPa lastik basınç yükü yüklenip analiz edilmiştir. Katkısız BSK ve katkılı TMA modellerin von mises gerilmeleri Tablo 4.4 ve Tablo 4.5'te sunulmuştur.

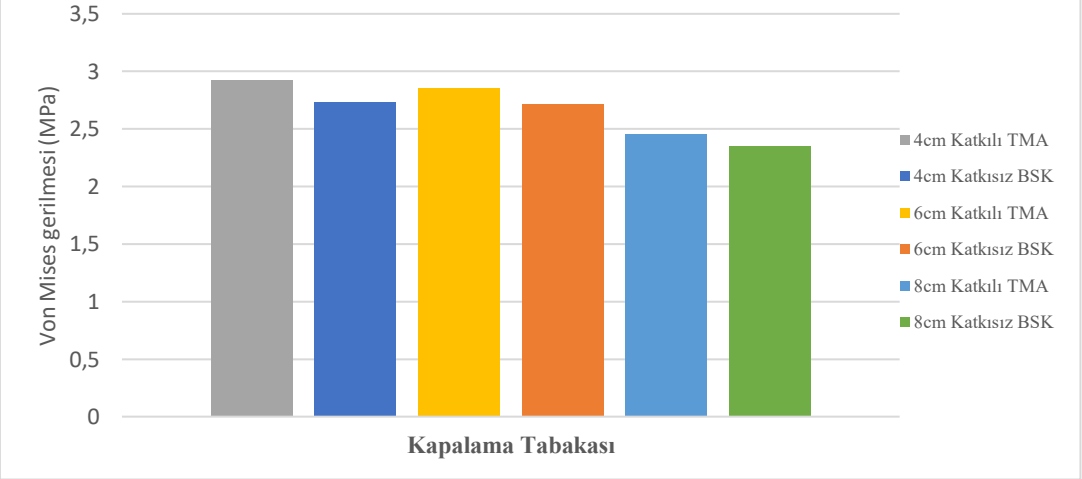
Şekil 4.14'te görüldüğü üzere katkılı TMA ve katkısız BSK modellerde kaplama ve temel tabaka arasında oluşan von mises gerilmeleri karşılaştırılmıştır. Temel ve alttemel tabakası, alttemel ve taban zemin arasında oluşan von misese gerilmeleri Şekil 4.15 ve Şekil 4.16'te karşılaştırılması yapılmıştır.

Tablo 4.4: Katkısız BSK Von-Misesi gerilmesi nümerik analiz sonuçları (1.Ay).

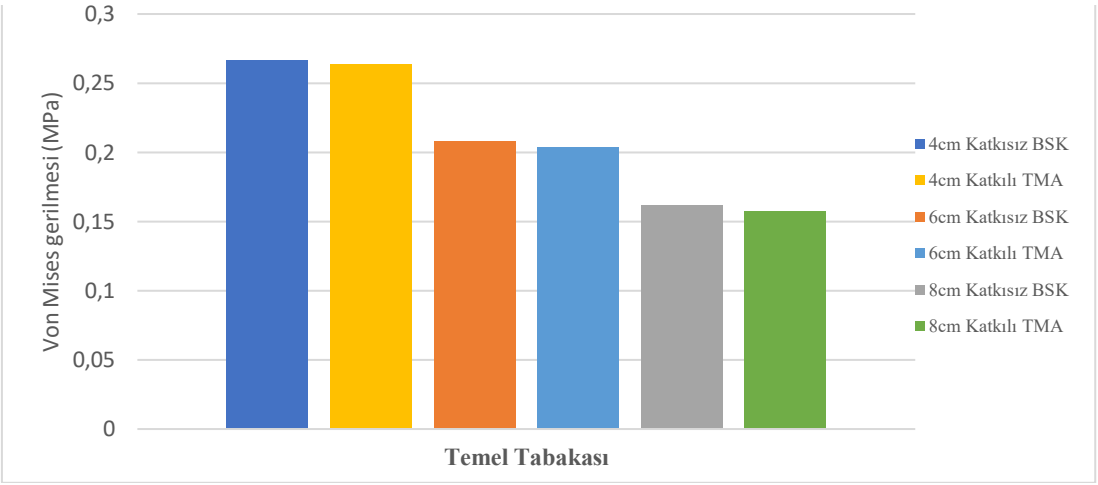
Katkısız BSK					
4cm		**6cm**		**8cm**	
Derinlik (m)	**Von Mises gerilmesi (MPa)**	**Derinlik (m)**	**Von Mises gerilmesi (MPa)**	**Derinlik (m)**	**Von Mises gerilmesi (MPa)**
0.00	2.37853	0.00	2.23761	0.00	1.82521
0.01	1.07242	0.02	0.935047	0.02	0.692545
0.02	0.201908	0.03	0.271245	0.04	0.297736
0.03	1.45976	0.05	1.46052	0.06	1.27063
0.04	**2.72949**	**0.06**	**2.71432**	**0.08**	**2.35277**
0.04	0.337717	0.06	0.288075	0.08	0.23293
0.08	0.376982	0.10	0.290181	0.12	0.222622
0.12	0.352229	0.14	0.26524	0.16	0.201555
0.16	0.311665	0.18	0.236591	0.20	0.181125
0.20	0.278382	0.22	0.214986	0.24	0.166559
0.24	**0.266514**	**0.26**	**0.207754**	**0.28**	**0.161827**
0.24	0.181016	0.26	0.140599	0.28	0.109068
0.30	0.144326	0.32	0.115143	0.34	0.091043
0.37	0.111514	0.39	0.0906177	0.41	0.0726573
0.43	0.0756239	0.45	0.0622072	0.47	0.0504643
0.49	**0.0231653**	**0.51**	**0.020326**	**0.53**	**0.0176798**

Tablo 4.5: Katkılı TMA Von-Mises gerilmesi nümerik analiz sonuçları (1.Ay).

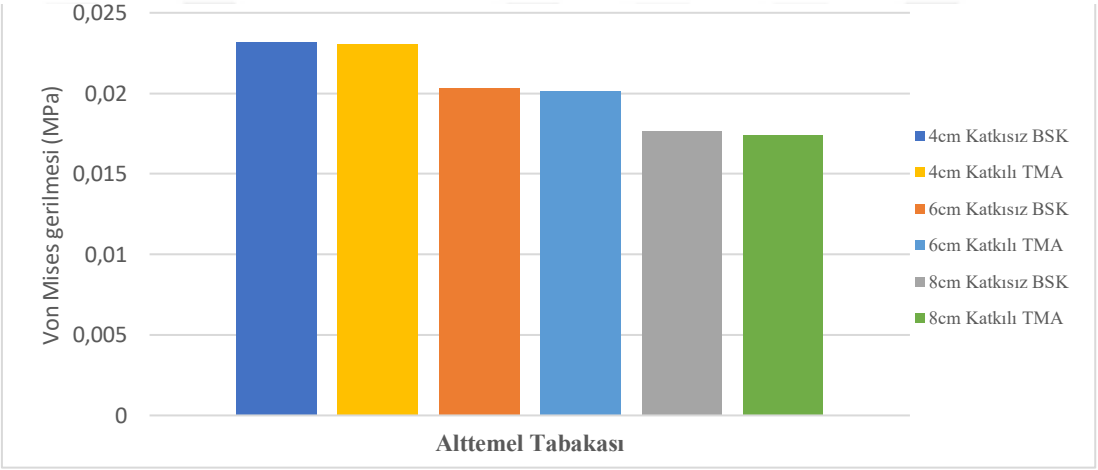
Katkılı TMA					
4cm		6cm		8cm	
Derinlik (m)	**Von Mises gerilmesi (MPa)**	**Derinlik (m)**	**Von Mises gerilmesi (MPa)**	**Derinlik (m)**	**Von Mises gerilmesi (MPa)**
0	2.57216	0	2.38036	0	1.9234
0.01	0.708177	0.02	1.00385	0.02	0.739548
0.03	1.10417	0.03	0.271142	0.04	0.296881
0.04	**2.92577**	0.05	1.52972	0.06	1.3168
0.04	0.333196	**0.06**	**2.85905**	**0.08**	**2.45252**
0.08	0.37103	0.06	0.279771	0.08	0.224015
0.12	0.346796	0.10	0.282003	0.12	0.214534
0.16	0.307323	0.14	0.258345	0.16	0.194807
0.20	0.274977	0.18	0.231073	0.20	0.175607
0.24	**0.263533**	0.22	0.210501	0.24	0.16192
0.24	0.178956	**0.26**	**0.203715**	**0.28**	**0.157554**
0.30	0.142976	0.26	0.137811	0.28	0.106125
0.37	0.110614	0.32	0.113179	0.34	0.0888578
0.43	0.0750707	0.39	0.0892353	0.41	0.0710602
0.49	**0.0230614**	0.45	0.0613351	0.47	0.0494383
		0.51	**0.0201486**	**0.53**	**0.0174553**



Şekil 4.14 : Kaplama tabakasında oluşan Von-Misesi gerilmesi (1.Ay).



Şekil 4.15 : Temel tabakasında oluşan Von-Misesi gerilmesi (1.Ay).



Şekil 4.16: Alttemel tabakasında oluşan Von-Misesi gerilmesi (1.Ay).

4.3.2 Düşey Gerilmelerin Karşılaştırması

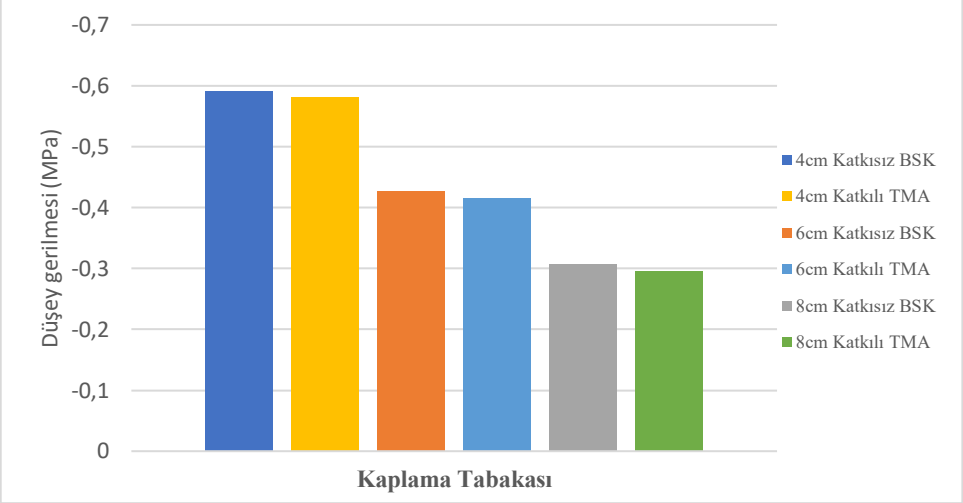
Katkılı TMA ve katkısız BSK modellerde tabakalar arasında oluşan düşey gerilmelerin sonucu Tablo 4.6 ve Tablo 4.7'de detaylı verilmiştir. Katmanlarda meydana gelen düşey gerilmelerin karşılaştırması Şekil 4.17, Şekil 4.18 ve Şekil 4.19'de yapılmıştır.

Tablo 4.6: Katkısız BSK düşey gerilmesi nümerik analiz sonuçları (1.Ay).

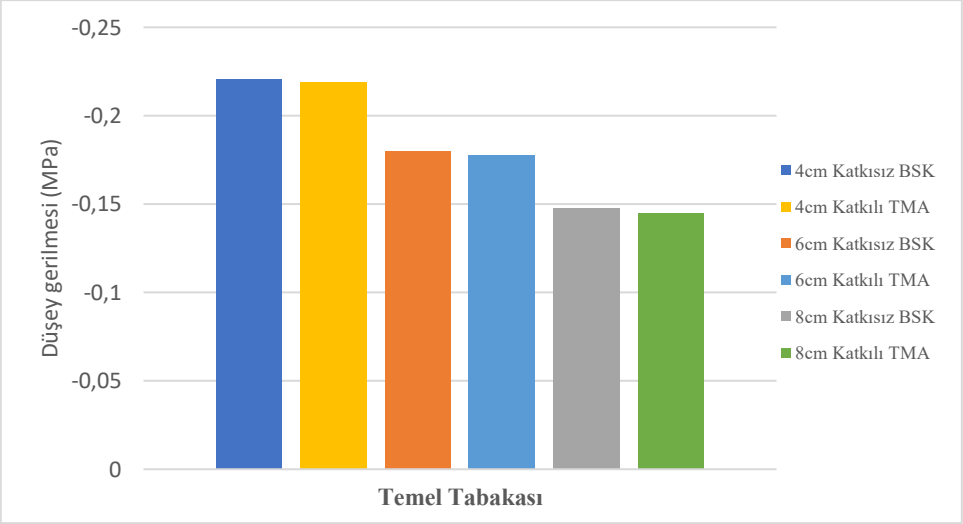
Katkısız BSK					
4cm		**6cm**		**8cm**	
Derinlik (m)	**Düşey gerilmesi (MPa)**	**Derinlik (m)**	**Düşey gerilmesi (MPa)**	**Derinlik (m)**	**Düşey gerilmesi (MPa)**
0	-0.685086	0	-0.698145	0	-0.706875
0.01	-0.676733	0.02	-0.662952	0.02	-0.651124
0.02	-0.648562	0.03	-0.575684	0.04	-0.521136
0.03	-0.6158	0.05	-0.48271	0.06	-0.384082
0.04	**-0.591451**	**0.06**	**-0.427864**	**0.08**	**-0.30804**
0.04	-0.60518	0.06	-0.446058	0.08	-0.331435
0.08	-0.512987	0.10	-0.375371	0.12	-0.279853
0.12	-0.413064	0.14	-0.307477	0.16	-0.233396
0.16	-0.329158	0.18	-0.252006	0.20	-0.195958
0.20	-0.264546	0.22	-0.209406	0.24	-0.167236
0.24	**-0.220806**	**0.26**	**-0.180235**	**0.28**	**-0.147409**
0.24	-0.223964	0.26	-0.182644	0.28	-0.149224
0.30	-0.184236	0.32	-0.155207	0.34	-0.130088
0.37	-0.160121	0.39	-0.137699	0.41	-0.117394
0.43	-0.144873	0.45	-0.125828	0.47	-0.108271
0.49	**-0.127409**	**0.51**	**-0.111793**	**0.53**	**-0.0972387**

Tablo 4.7: Katkılı TMA düşey gerilmesi nümerik analiz sonuçları (12.Ay).

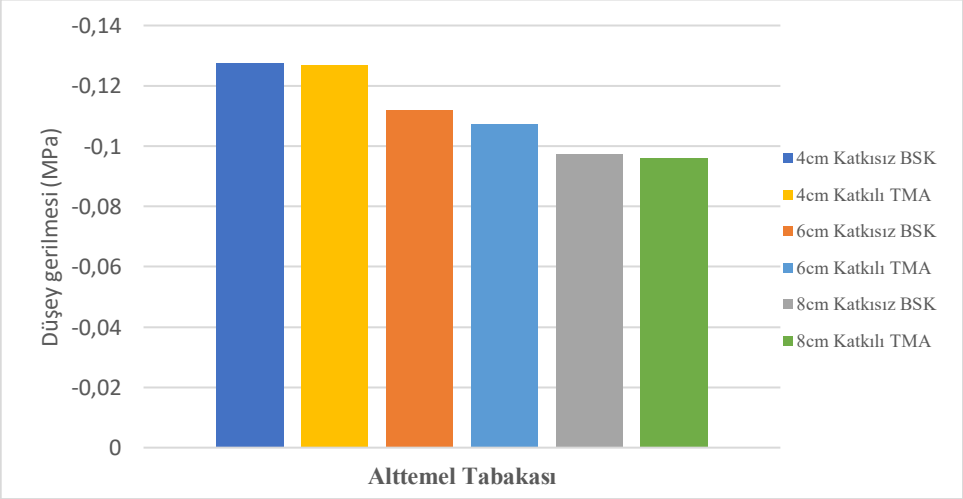
Katkılı TMA					
4cm		**6cm**		**8cm**	
Derinlik (m)	**Düşey gerilmesi (MPa)**	**Derinlik (m)**	**Düşey gerilmesi (MPa)**	**Derinlik (m)**	**Düşey gerilmesi (MPa)**
0	-0.689256	0	-0.699172	0	-0.707868
0.01	-0.669173	0.02	-0.661717	0.02	-0.649814
0.03	-0.619084	0.03	-0.56933	0.04	-0.514835
0.04	**-0.580938**	0.05	-0.47146	0.06	-0.373107
0.04	-0.596041	**0.06**	**-0.414986**	**0.08**	**-0.295682**
0.08	-0.505163	0.06	-0.434099	0.08	-0.320153
0.12	-0.40725	0.10	-0.36591	0.12	-0.271015
0.16	-0.325118	0.14	-0.30051	0.16	-0.22675
0.20	-0.261839	0.18	-0.247011	0.20	-0.191014
0.24	**-0.218957**	0.22	-0.205862	0.24	-0.16355
0.24	-0.222088	**0.26**	**-0.177638**	**0.28**	**-0.144557**
0.30	-0.183039	0.26	-0.18001	0.28	-0.146333
0.37	-0.159255	0.32	-0.153366	0.34	-0.12793
0.43	-0.144159	0.39	-0.136278	0.41	-0.115652
0.49	**-0.126838**	0.45	-0.124627	0.47	-0.106772
		0.51	**-0.107309**	**0.53**	**-0.0960042**



Şekil 4.17 : Kaplama tabakasında oluşan düşey gerilmesi (1.Ay).



Şekil 4.18 : Temel tabakasında oluşan düşey gerilmesi (1.Ay).



Şekil 4.19 : Alttemel tabakasında oluşan düşey gerilmesi (1.Ay).

4.3.3 Yatay Gerilmelerin Karşılaştırması

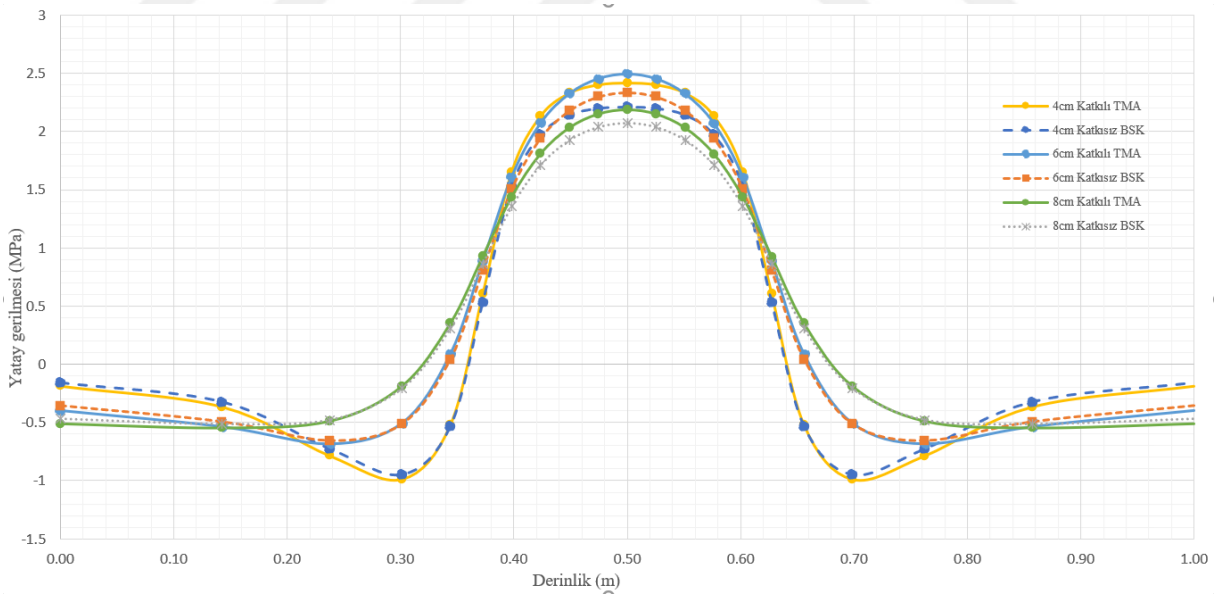
Yol üstyapının enine göre yatay gerilmeleri dikkate alınmıştır. Tablo 4.8 ve Tablo 4.9'de değişik kalınlığa sahip katkısız BSK ve katkılı TMA modellerin yatay gerilme sonucu verilmektedir. Şekil 4.20'de Katkılı TMA ve Katkısız BSK modellerin yatay gerilme karşılaştırması yapılmıştır.

Tablo 4.8: Katkısız BSK yatay gerilmesi nümerik analiz sonuçları (1.Ay)

Katkısız BSK					
4cm		**6cm**		**8cm**	
Derinlik (m)	**Yatay gerilmesi (MPa)**	**Derinlik (m)**	**Yatay gerilmesi (MPa)**	**Derinlik (m)**	**Yatay gerilmesi (MPa)**
0	-0.160705	0	-0.356214	0	-0.470548
0.14	-0.32511	0.14	-0.494831	0.14	-0.515263
0.24	-0.730224	0.24	-0.657581	0.24	-0.479535
0.30	-0.950505	0.30	-0.513339	0.30	-0.207646
0.34	-0.535281	0.34	0.0409027	0.34	0.305564
0.37	0.529983	0.37	0.805084	0.37	0.859875
0.40	1.52563	0.40	1.50223	0.40	1.35514
0.42	1.96883	0.42	1.94149	0.42	1.71238
0.45	2.13975	0.45	2.17927	0.45	1.92705
0.47	2.19687	0.47	2.29856	0.47	2.03921
0.50	**2.2091**	**0.50**	**2.3355**	**0.50**	**2.07438**
0.53	2.19712	0.53	2.29911	0.53	2.03974
0.55	2.14021	0.55	2.18031	0.55	1.92807
0.58	1.96942	0.58	1.94288	0.58	1.71376
0.60	1.52619	0.60	1.50378	0.60	1.35672
0.63	0.530295	0.63	0.806545	0.63	0.861454
0.66	-0.535398	0.66	0.0420546	0.66	0.306961
0.70	-0.951333	0.70	-0.512927	0.70	-0.206789
0.76	-0.731159	0.76	-0.657869	0.76	-0.479346
0.86	-0.325342	0.86	-0.495119	0.86	-0.515382
1.00	-0.160621	1.00	-0.356324	1.00	-0.470699

Tablo 4.9: Katkılı TMA yatay gerilmesi nümerik analiz sonuçları (1.Ay).

Katkılı TMA					
4cm		6cm		8cm	
Derinlik (m)	Yatay gerilmesi (MPa)	Derinlik (m)	Yatay gerilmesi (MPa)	Derinlik (m)	Yatay gerilmesi (MPa)
0	-0.18554	0	-0.398048	0	-0.51061
0.14	-0.363447	0.14	-0.536849	0.14	-0.546649
0.24	-0.78492	0.24	-0.68473	0.24	-0.488014
0.30	-0.985508	0.30	-0.505527	0.30	-0.18717
0.34	-0.518288	0.34	0.0882607	0.34	0.352312
0.37	0.603879	0.37	0.884866	0.37	0.926074
0.40	1.65222	0.40	1.61008	0.40	1.43766
0.42	2.13404	0.42	2.07215	0.42	1.8082
0.45	2.33158	0.45	2.32622	0.45	2.03231
0.47	2.403	0.47	2.45507	0.47	2.14992
0.50	**2.42004**	**0.50**	**2.49481**	**0.50**	**2.18653**
0.53	2.4033	0.53	2.45448	0.53	2.14936
0.55	2.33214	0.55	2.32509	0.55	2.03125
0.58	2.13477	0.58	2.07064	0.58	1.80674
0.60	1.65293	0.60	1.6084	0.60	1.436
0.63	0.60435	0.63	0.883261	0.63	0.9244
0.66	-0.518262	0.66	0.0869739	0.66	0.35082
0.70	-0.986245	0.70	-0.506038	0.70	-0.188109
0.76	-0.785834	0.76	-0.684478	0.76	-0.488253
0.86	-0.363679	0.86	-0.536545	0.86	-0.54654
1.00	-0.185453	1.00	-0.397905	1.00	-0.510444



Şekil 4.20 : Kaplama tabakasında oluşan yatay gerilmesi (1.Ay).

4.3.4 Deformasyonların Karşılaştırılması

689KPa lastik basıncı altında analiz edilen tabakalarda lastiğin altında derinlikle değişen düşey deformasyonların nümerik analiz sonucu Tablo 4.10 ve Tablo 4.11'de yer almaktadır.

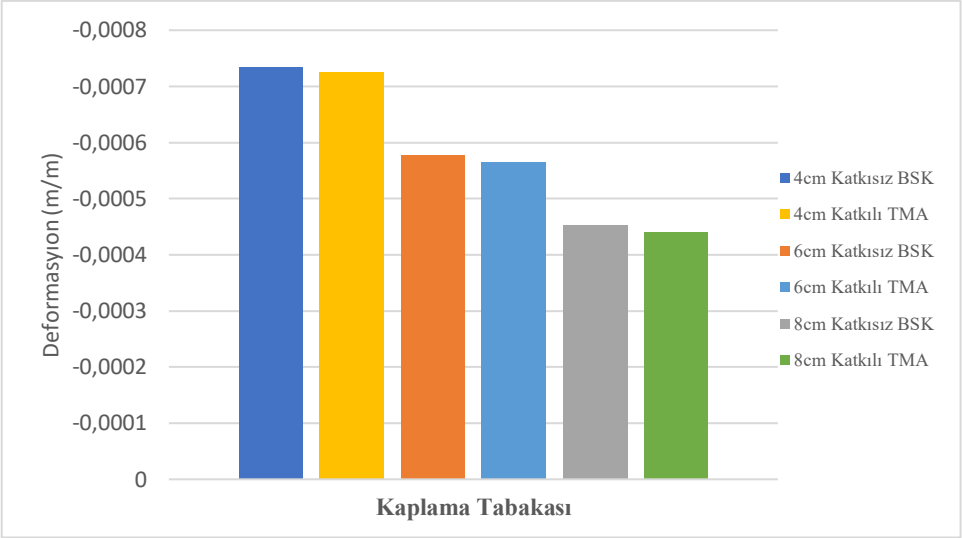
Şekil 4.21, Şekil 4.22 ve Şekil 4.23'te kaplama, temel ve alttemel tabakasında değişik modellerde meydana gelen deformasyonlar karşılaştırılmıştır.

Tablo 4.10: Katkısız BSK deformasyonu nümerik analiz sonuçları (1.Ay)

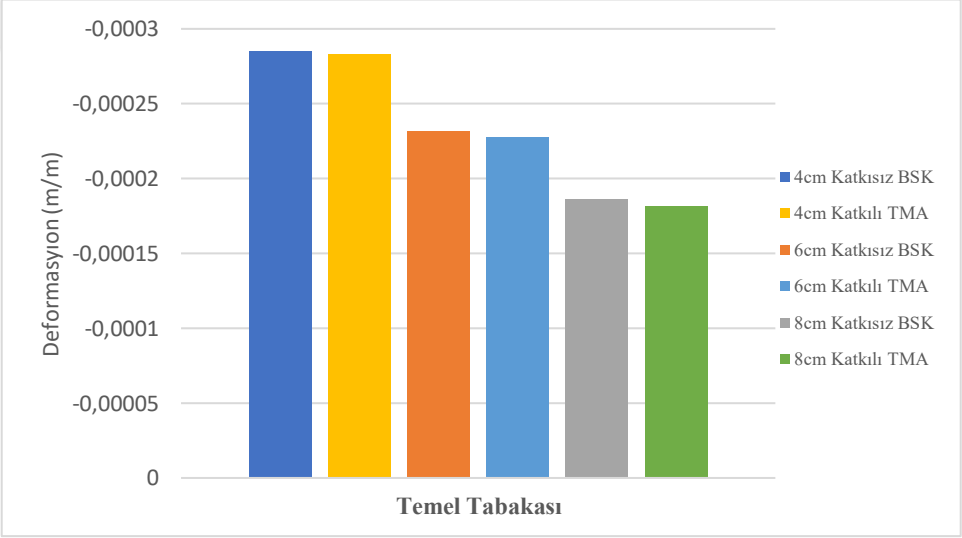
Katkısız BSK					
4cm		**6cm**		**8cm**	
Derinlik (m)	**Deformasyon (m/m)**	**Derinlik (m)**	**Deformasyon (m/m)**	**Derinlik (m)**	**Deformasyon (m/m)**
0	-0.000738783	0	-0.000583847	0	-0.000461665
0.01	-0.000742189	0.02	-0.000588463	0.02	-0.000466262
0.02	-0.000742546	0.03	-0.000588695	0.04	-0.000466
0.03	-0.000739919	0.05	-0.000584786	0.06	-0.000461334
0.04	**-0.000734311**	**0.06**	**-0.00057663**	**0.08**	**-0.000452**
0.08	-0.000627954	0.10	-0.000492909	0.12	-0.000387047
0.12	-0.00052566	0.14	-0.000415542	0.16	-0.000328158
0.16	-0.000435139	0.18	-0.000347131	0.20	-0.000275913
0.20	-0.000356375	0.22	-0.000286662	0.24	-0.000229158
0.24	**-0.000285359**	**0.26**	**-0.000231218**	**0.28**	**-0.000185787**
0.30	-0.000181208	0.32	-0.000148832	0.34	-0.000120896
0.37	-9.86E-05	0.39	-8.19E-05	0.41	-6.72E-05
0.43	-3.65E-05	0.45	-3.08E-05	0.47	-2.57E-05
0.49	**4.48E-35**	**0.51**	**3.96E-35**	**0.53**	**3.47E-35**

Tablo 4.11: Katkılı TMA deformasyonu nümerik analiz sonuçları (1.Ay).

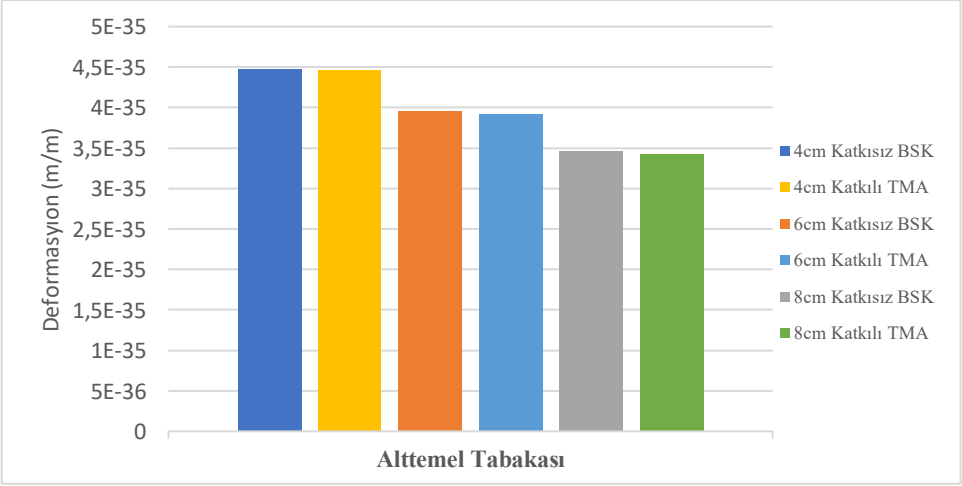
Katkılı TMA					
4cm		**6cm**		**8cm**	
Derinlik (m) (m)	**Deformasyon (m/m)**	**Derinlik (m)**	**Deformasyon (m/m)**	**Derinlik (m)**	**Deformasyon (m/m)**
0	-0.000729689	0	-0.000571204	0	-0.000448303
0.01	-0.000733592	0.02	-0.00057577	0.02	-0.000452823
0.03	-0.000732208	0.03	-0.000576101	0.04	-0.000452695
0.04	**-0.000725611**	0.05	-0.000572427	0.06	-0.000448346
0.08	-0.000620835	**0.06**	**-0.000564637**	**0.08**	**-0.000439516**
0.12	-0.000520113	0.10	-0.000483252	0.12	-0.000376917
0.16	-0.000430893	0.14	-0.000407926	0.16	-0.00032002
0.20	-0.000353136	0.18	-0.000341157	0.20	-0.000269394
0.24	**-0.000282921**	0.22	-0.000281983	0.24	-0.000223954
0.30	-0.000179823	**0.26**	**-0.000227613**	**0.28**	**-0.00018171**
0.37	-9.79E-05	0.32	-0.000146702	0.34	-0.000118423
0.43	-3.63E-05	0.39	-8.08E-05	0.41	-6.60E-05
0.49	**4.46E-35**	0.45	-3.04E-05	0.47	-2.52E-05
		0.51	**3.93E-35**	**0.53**	**3.43E-35**



Şekil 4.21 : Kaplama tabakasında oluşan deformasyonu (1.Ay).



Şekil 4.22 : Temel tabakasında oluşan deformasyonu (1.Ay).



Şekil 4.23 : Alttemel tabakasında oluşan deformasyonu (1.Ay).

4.4 12. AY MODELLERİN SONUÇ KARŞILAŞTIRMASI

4.4.1 Von-Mises Gerilmelerin Karşılaştırması

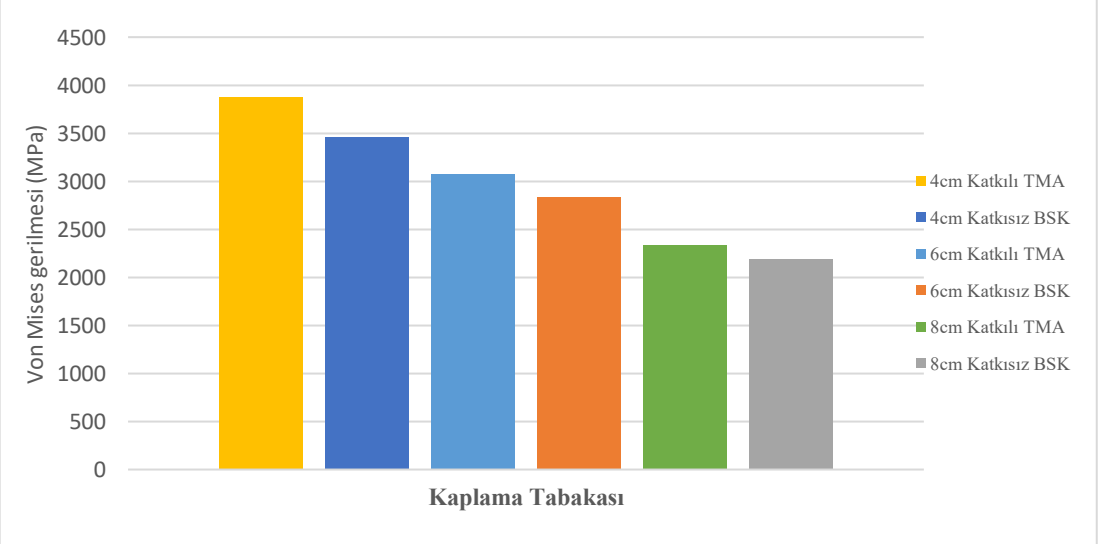
Katkısız BSK ve katkılı TMA Modellerin 12.Ayda tekerrürlü yük altıda sergilediği performansı analiz edilmiştir. 424542 KPa eşdeğer aks yükü yol üstyapı modellerde yüklenmiştir. 12.Ayda tekerrürlü yük altında katmanlar arasında meydana gelen von mises gerilmesi Tablo 4.12 ve Tablo 4.13'te sunulmuştur. Şekil 4.24, Şekil 4.25 ve Şekil 4.26'da 12.Ayda katkılı TMA ve katkısız BSK; Model 1 (40cm kaplama), Model 2 (6cm kaplama) ve Model 3 (8 cm kaplama) von mises gerilmesi nümerik analiz sonuçların karşılaştırılmıştır.

Tablo 4.12: Von-Mises gerilmesi nümerik analiz sonuçları (12.A)

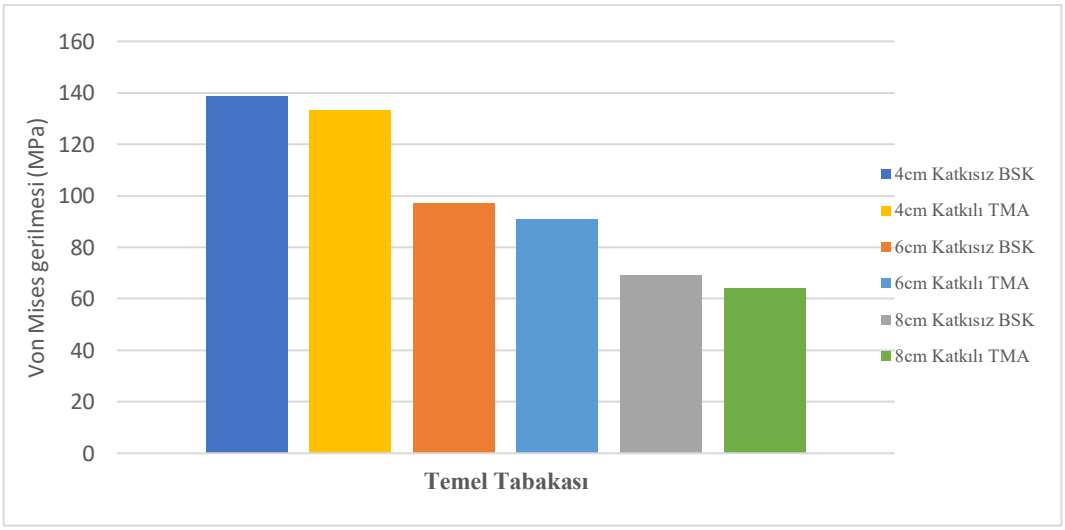
Katkısız BSK					
4cm		**6cm**		**8cm**	
Derinlik (m)	**Von Mises gerilmesi (MPa)**	**Derinlik (m)**	**Von Mises gerilmesi (MPa)**	**Derinlik (m)**	**Von Mises gerilmesi (MPa)**
0	3221.45	0	2521.85	0	1855.34
0.01	1518.16	0.02	1128.61	0.02	777.959
0.02	132.07	0.03	168.189	0.04	179.167
0.03	1774.41	0.05	1458.88	0.06	1130.96
0.04	**3459.71**	**0.06**	**2833.7**	**0.08**	**2192.27**
0.04	164.003	0.06	117.914	0.08	86.0493
0.08	181.14	0.10	120.853	0.12	84.6148
0.12	171.864	0.14	113.996	0.16	79.4468
0.16	155.928	0.18	105.287	0.20	74.0629
0.20	142.831	0.22	98.681	0.24	70.2446
0.24	**138.813**	**0.26**	**97.0473**	**0.28**	**69.4073**
0.24	93.9849	0.26	65.4421	0.28	46.3496
0.30	77.1184	0.31	57.5272	0.33	41.4153
0.37	60.6831	0.36	49.1901	0.38	35.8976
0.43	41.6165	0.41	39.7678	0.43	29.3434
0.49	**13.3126**	0.46	27.8951	0.48	20.8842
		0.51	**11.0805**	**0.53**	**9.00694**

Tablo 4.13: Katkılı TMA Von-Mises gerilmesi nümerik analiz sonuçları (12.Ay).

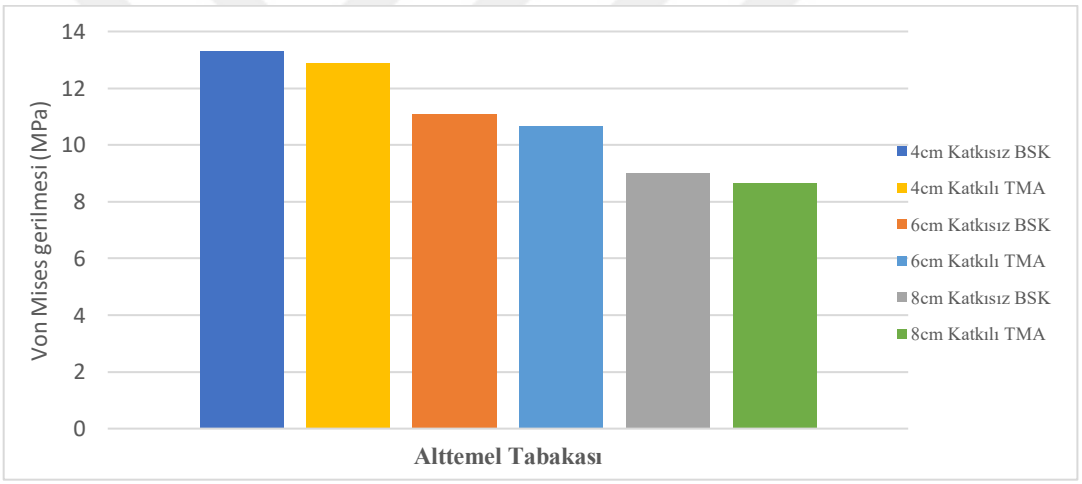
Katkılı TMA					
4cm		6cm		8cm	
Derinlik (m)	Von Mises gerilmesi (MPa)	Derinlik (m)	Von Mises gerilmesi (MPa)	Derinlik (m)	Von Mises gerilmesi (MPa)
0	3633.49	0	2758.47	0	1993.95
0.01	1097.25	0.02	1243.41	0.02	844.984
0.03	1361.79	0.03	168.746	0.04	178.701
0.04	**3878.4**	0.05	1575.55	0.06	1197.79
0.04	153.952	**0.06**	**3074.19**	**0.08**	**2332.87**
0.08	170.252	0.06	107.557	0.08	77.2282
0.12	162.338	0.10	110.759	0.12	76.3893
0.16	148.188	0.14	105.17	0.16	72.2199
0.20	136.518	0.18	97.8056	0.20	67.7779
0.24	**133.123**	0.22	92.1987	0.24	64.6356
0.24	90.0637	**0.26**	**90.9485**	**0.28**	**64.0487**
0.29	77.4573	0.26	61.1	0.28	42.6734
0.34	65.0905	0.32	52.1712	0.33	38.3394
0.39	51.8902	0.39	42.2163	0.38	33.3739
0.44	35.7472	0.45	29.6053	0.43	27.3822
0.49	**12.8658**	**0.51**	**10.6528**	0.48	19.5908
				0.53	**8.65071**



Şekil 4.24 : Kaplama tabakasında oluşan Von-Misesi gerilmesi (12.Ay).



Şekil 4.25 : Temel tabakasında oluşan Von-Misesi gerilmesi (12.Ay).



Şekil 4.26 : Alttemel tabakasında oluşan Von-Misesi gerilmesi (12.Ay).

4.4.2 Düşey Gerilmelerin Karşılaştırması

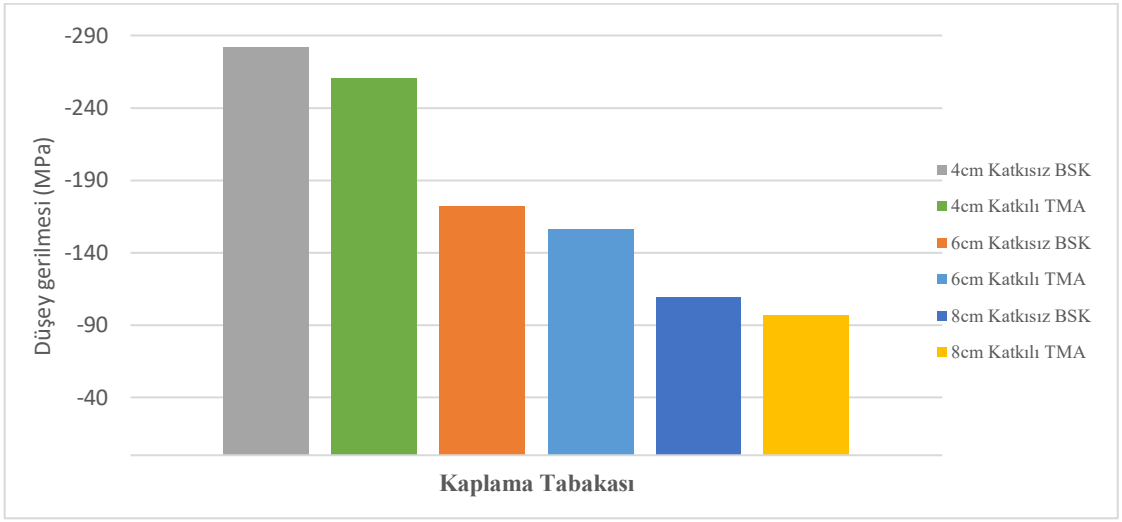
Yol üstyapısının 12.Ay boyunca tekrarlan yükler altında meydana gelen nümerik analizi düşey gerilme sonuçları Tablo 4.14 ve Tablo 4.15'te verilmiştir. Şekil 4.27'de kaplama ve temel tabakalar arasında, Şekil 4.28'de temel ve alttemel tabakası arasında ve Şekil 4.29'da alttemel ve taban zemin tabakası arasındaki düşey gerilmeler karşılaştırmıştır.

Tablo 4.14: Katkısız BSK düşey gerilmesi nümerik analiz sonuçları (12.Ay).

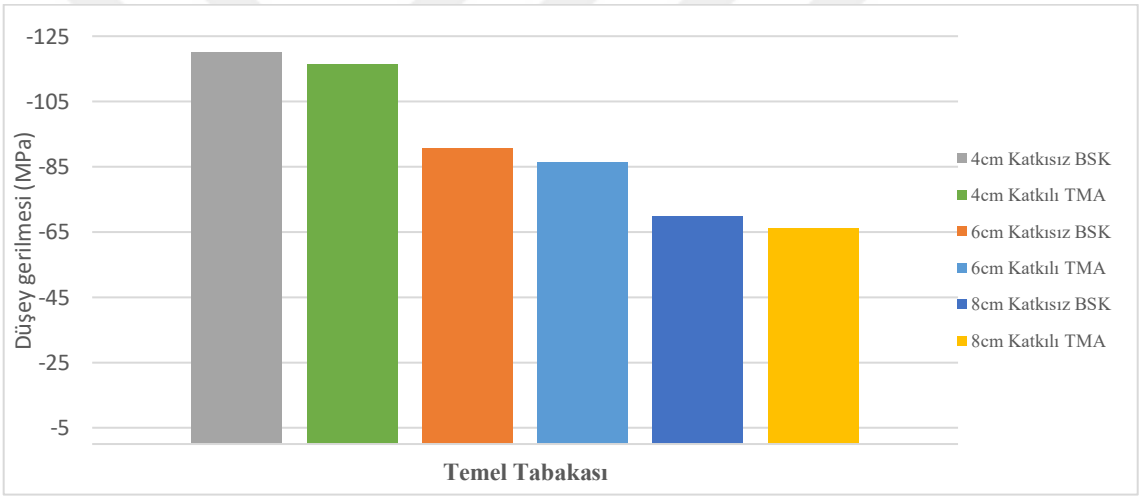
Katkısız BSK					
4cm		**6cm**		**8cm**	
Derinlik (m)	**Düşey gerilmesi (MPa)**	**Derinlik (m)**	**Düşey gerilmesi (MPa)**	**Derinlik (m)**	**Düşey gerilmesi (MPa)**
0	-428.279	0	-437.516	0	-442.002
0.01	-410.154	0.02	-399.729	0.02	-392.767
0.02	-360.216	0.03	-309.582	0.04	-280.388
0.03	-308.135	0.05	-217.488	0.06	-165.58
0.04	**-281.904**	**0.06**	**-172.196**	**0.08**	**-109.544**
0.04	-294.461	0.06	-190.277	0.08	-131.009
0.08	-251.575	0.10	-164.16	0.12	-114.307
0.12	-206.973	0.14	-139.134	0.16	-99.1124
0.16	-169.458	0.18	-118.29	0.20	-86.5982
0.20	-140.21	0.22	-101.987	0.24	-76.7993
0.24	**-120.084**	**0.26**	**-90.6063**	**0.28**	**-69.895**
0.24	-121.8	0.26	-92.01	0.28	-70.6276
0.30	-102.845	0.31	-82.582	0.33	-64.8326
0.37	-90.756	0.36	-75.377	0.38	-60.3891
0.43	-82.6973	0.41	-69.5927	0.43	-56.8201
0.49	**-73.2194**	0.46	-64.2942	0.48	-53.6008
		0.51	**-58.121**	**0.53**	**-49.5382**

Tablo 4.15: Katkılı TMA düşey gerilmesi nümerik analiz sonuçları (12.Ay)

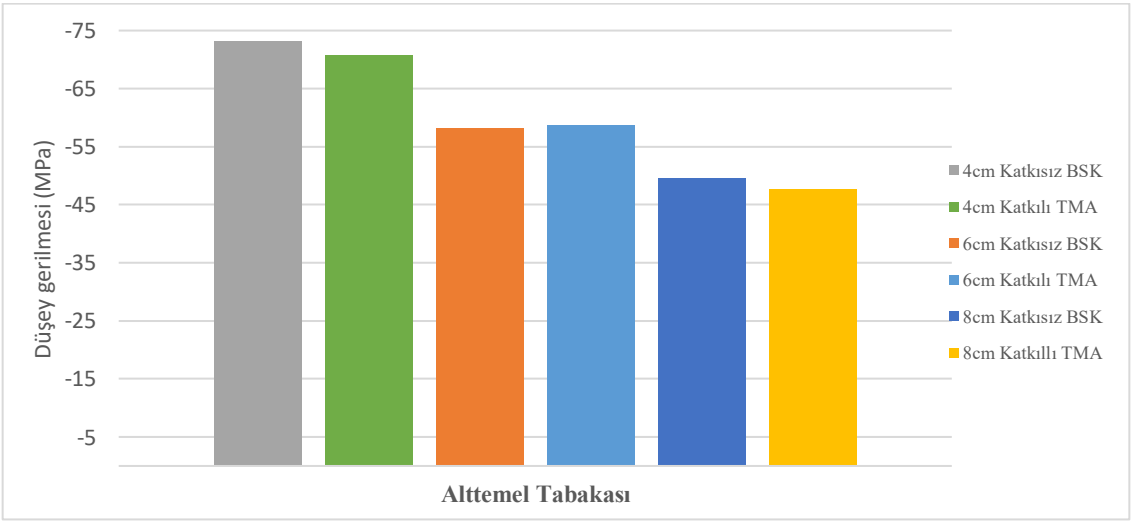
Katkılı TMA					
4cm		**6cm**		**8cm**	
Derinlik (m)	**Düşey gerilmesi (MPa)**	**Derinlik (m)**	**Düşey gerilmesi (MPa)**	**Derinlik (m)**	**Düşey gerilmesi (MPa)**
0	-435.033	0	-438.805	0	-443.012
0.013	-395.197	0.015	-398.208	0.02	-391.464
0.026	-308.258	0.03	-301.713	0.04	-274.054
0.04	**-259.956**	0.045	-203.534	0.06	-154.487
0.04	-277.718	**0.06**	**-156.213**	**0.08**	**-96.9521**
0.08	-238.09	0.06	-175.538	0.08	-119.522
0.12	-196.966	0.1	-152.303	0.12	-104.978
0.16	-162.283	0.14	-129.993	0.16	-91.7071
0.2	-135.152	0.18	-111.339	0.2	-80.733
0.24	**-116.416**	0.22	-96.659	0.24	-72.108
0.24	-118.104	**0.26**	**-86.3554**	**0.28**	**-66.0083**
0.29	-103.231	0.26	-87.4784	0.28	-66.6751
0.34	-92.6177	0.3225	-77.2477	0.33	-61.5169
0.39	-84.8454	0.385	-70.1961	0.38	-57.5218
0.44	-78.5487	0.4475	-64.9865	0.43	-54.2788
0.49	**-70.7618**	**0.51**	**-58.5902**	0.48	-51.3209
				0.53	**-47.5789**



Şekil 4.27 : Kaplama tabakasında oluşan düşey gerilmesi (12.Ay).



Şekil 4.28 : Temel tabakasında oluşan düşey gerilmesi (12.Ay).



Şekil 4.29 : Alttemel tabakasında oluşan düşey gerilmesi (12.Ay).

4.4.3 Yatay Gerilmelerin Karşılaştırması

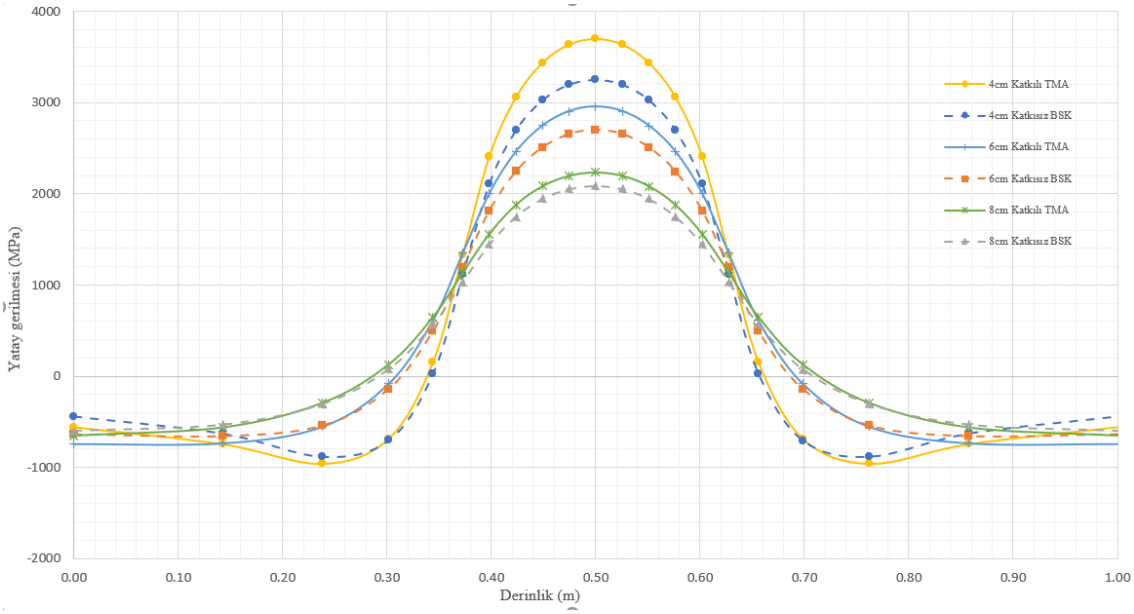
Yol üstyapısını enine göre 12.Ayda meydana gelen yatay gerilmelerin nümerik analiz sonuçları Tablo 4.16 ve Tablo 4.17'de verilmiştir. Şekil 4.30'te Katkısız BSK ve katkılı TMA modellerde kaplama tabakasında oluşan yatay gerilmesin karşılaştırması yapılmıştır.

Tablo 4.16: Katkısız BSK yatay gerilmesi nümerik analiz sonuçları (12.Ay)

Katkısız BSK					
4cm		**6cm**		**8cm**	
Derinlik (m)	**Yatay gerilmesi (MPa)**	**Derinlik (m)**	**Yatay gerilmesi (MPa)**	**Derinlik (m)**	**Yatay gerilmesi (MPa)**
0	-440.101	0	-639.054	0.00	-600.25
0.14	-627.879	0.14	-659.536	0.14	-532.838
0.24	-882.326	0.24	-544.149	0.24	-307.153
0.30	-704.923	0.30	-143.761	0.30	75.6675
0.34	26.9056	0.34	494.405	0.34	568.77
0.37	1114.81	0.37	1191.55	0.37	1035.62
0.40	2112.31	0.40	1813.81	0.40	1444.89
0.42	2698.6	0.42	2244.08	0.42	1751.07
0.45	3029.48	0.45	2507.86	0.45	1946.26
0.47	3199.09	0.47	2652.77	0.47	2053.45
0.50	**3250.84**	**0.50**	**2699.19**	**0.50**	**2087.61**
0.53	3198.38	0.53	2652.11	0.53	2052.94
0.55	3028.13	0.55	2506.59	0.55	1945.29
0.58	2696.81	0.58	2242.36	0.58	1749.74
0.60	2110.35	0.60	1811.84	0.60	1443.34
0.63	1113.01	0.63	1189.56	0.63	1034.0
0.66	25.5939	0.66	492.63	0.66	567.244
0.70	-705.187	0.70	-144.887	0.70	74.5274
0.76	-881.701	0.76	-544.431	0.76	-307.713
0.86	-627.359	0.86	-659.358	0.86	-532.947
1.00	-439.796	1.00	-638.73	1.00	-600.165

Tablo 4.17: Katkılı TMA yatay gerilmesi nümerik analiz sonuçları (12.Ay)

Katkılı TMA					
4cm		6cm		8cm	
Derinlik (m)	Yatay gerilmesi (MPa)	Derinlik (m)	Yatay gerilmesi (MPa)	Derinlik (m)	Yatay gerilmesi (MPa)
0	-557.094	0	-740.854	0	-654.92
0.14	-744.239	0.14	-733.005	0.14	-564.92
0.24	-959.109	0.24	-553.136	0.24	-296.52
0.30	-685.744	0.30	-82.8738	0.30	125.58
0.34	155.885	0.34	612.12	0.34	647.93
0.37	1333.22	0.37	1349.11	0.37	1134.33
0.40	2408.54	0.40	2004.38	0.40	1559.51
0.42	3058.87	0.42	2462.11	0.42	1878.84
0.45	3437.37	0.45	2746.3	0.45	2083.72
0.47	3635.56	0.47	2903.76	0.47	2196.82
0.50	**3696.97**	**0.50**	**2954.4**	**0.50**	**2232.97**
0.53	3634.73	0.53	2903.04	0.53	2196.28
0.55	3435.8	0.55	2744.93	0.55	2082.69
0.58	3056.78	0.58	2460.24	0.58	1877.43
0.60	2406.22	0.60	2002.22	0.60	1557.86
0.63	1331.04	0.63	1346.92	0.63	1132.61
0.66	154.188	0.66	610.138	0.66	646.28
0.70	-686.326	0.70	-84.1882	0.70	124.33
0.76	-958.655	0.76	-553.546	0.76	-297.17
0.86	-743.731	0.86	-732.863	0.86	-565.09
1.00	-556.719	1.00	-740.503	1.00	-654.88



Şekil 4.30 : Kaplama tabakasında oluşan yatay gerilmesi (12.Ay).

4.4.2 Deformasyonların Karşılaştırması

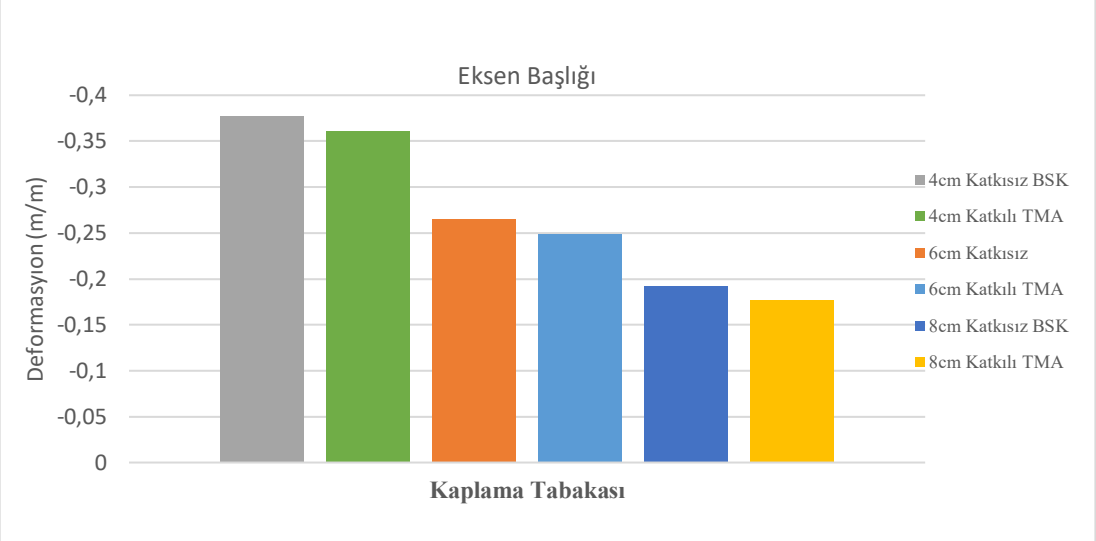
12.Ay boyunca tekerrürlü yük altında katkısız BSK ve katkılı TMA; Model 1 (4cm kaplama), Model 2 (6cm kapla) ve Model 3'e (8cm kaplama) 424542KPa eşdeğer aks yükü uygulanmıştır. Deformasyon nümerik analiz sonuçları Tablo 4.18 ve Tablo 4.19'da yer almaktadır. Şekil 4.31 kaplama tabakasındaki deformasyonu, Şekil 4.32 temel tabakasındaki deformasyon ve Şekil 4.33 alttemel tabakasındaki farklı modeller arasında karşılaştırma yapılmıştır.

Tablo 4.18: Katkısız BSK deformasyonu nümerik analiz sonuçları (12.Ay)

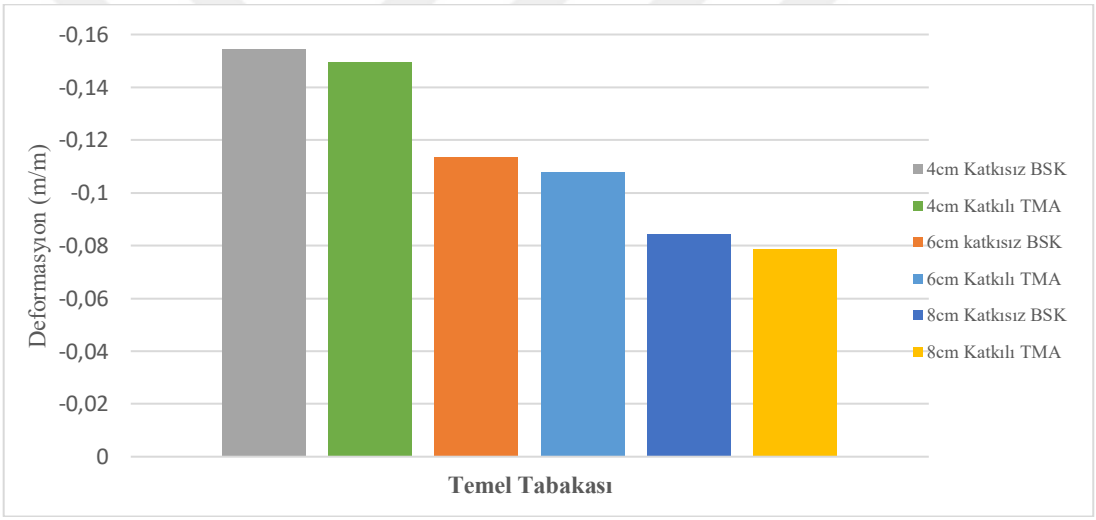
Katkısız BSK					
4cm		6cm		8cm	
Derinlik (m)	**Deformasyon (m/m)**	**Derinlik (m)**	**Deformasyon (m/m)**	**Derinlik (m)**	**Deformasyon (m/m)**
0	-0.378708	0	-0.266992	0	-0.19406
0.01	-0.38057	0.02	-0.269091	0.02	-0.195994
0.02	-0.381019	0.03	-0.269509	0.04	-0.196257
0.03	-0.380085	0.05	-0.268326	0.06	-0.194978
0.04	**-0.377751**	**0.06**	**-0.26548**	**0.08**	**-0.192051**
0.08	-0.326255	0.10	-0.230515	0.12	-0.167289
0.12	-0.276443	0.14	-0.197404	0.16	-0.144115
0.16	-0.231473	0.18	-0.167166	0.20	-0.122812
0.20	-0.191351	0.22	-0.13955	0.24	-0.103092
0.24	**-0.154395**	**0.26**	**-0.113566**	**0.28**	**-0.084335**
0.30	-0.0993059	0.31	-0.081681	0.33	-0.061282
0.37	-0.0545504	0.36	-0.0538469	0.38	-0.0408437
0.43	-0.0204266	0.41	-0.0303172	0.43	-0.0233143
0.49	**2.58E-32**	0.46	-0.0118293	0.48	-0.00930913
		0.51	**2.16E-32**	**0.53**	**1.80E-32**

Tablo 4.19: Katkılı TMA deformasyonu nümerik analiz sonuçları (12.Ay)

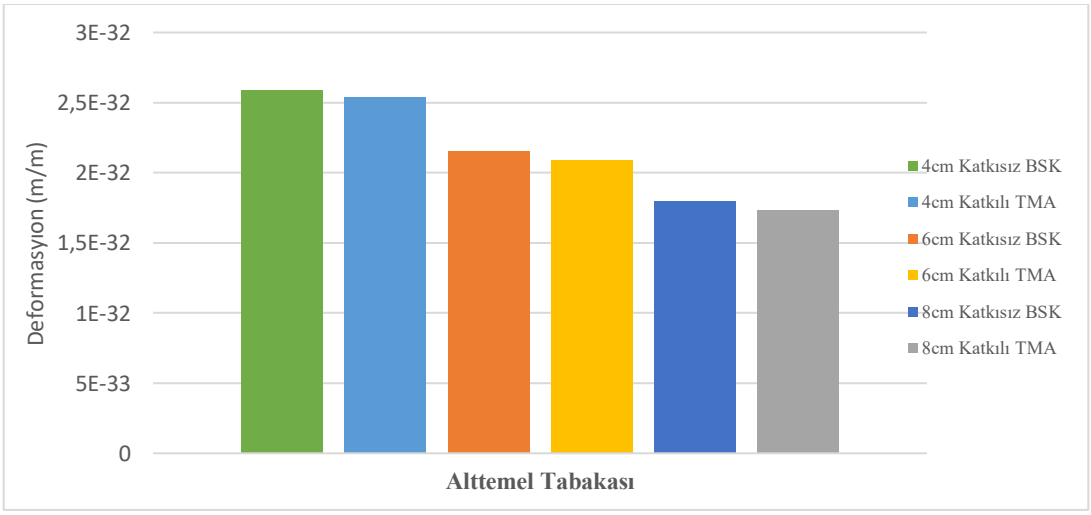
Katkılı TMA					
4cm		6cm		8cm	
Derinlik (m) (m)	**Deformasyon (m/m)**	**Derinlik (m)**	**Deformasyon (m/m)**	**Derinlik (m)**	**Deformasyon (m/m)**
0	-0.36201	0	-0.249673	0	-0.17885
0.01	-0.364056	0.02	-0.251591	0.02	-0.180591
0.03	-0.363789	0.03	-0.251999	0.04	-0.180859
0.04	**-0.361223**	0.05	-0.250965	0.06	-0.179761
0.08	-0.312778	**0.06**	**-0.248433**	**0.08**	**-0.177205**
0.12	-0.265763	0.10	-0.216365	0.12	-0.154819
0.16	-0.223089	0.14	-0.185829	0.16	-0.133741
0.20	-0.184794	0.18	-0.157761	0.20	-0.114235
0.24	**-0.14935**	0.22	-0.131962	0.24	-0.0960708
0.29	-0.106155	**0.26**	**-0.107581**	**0.28**	**-0.0787171**
0.34	-0.0692141	0.32	-0.0706491	0.33	-0.0573726
0.39	-0.038488	0.39	-0.0395774	0.38	-0.0383567
0.44	-0.0147181	0.45	-0.0152305	0.43	-0.0219777
0.49	**2.54E-32**	**0.51**	**2.09E-32**	0.48	-0.00882854
				0.53	**1.73E-32**



Şekil 4.31 : Kaplama tabakasında oluşan deformasyonu (12.Ay).



Şekil 4.32 : Temel tabakasında oluşan deformasyonu (12.Ay).

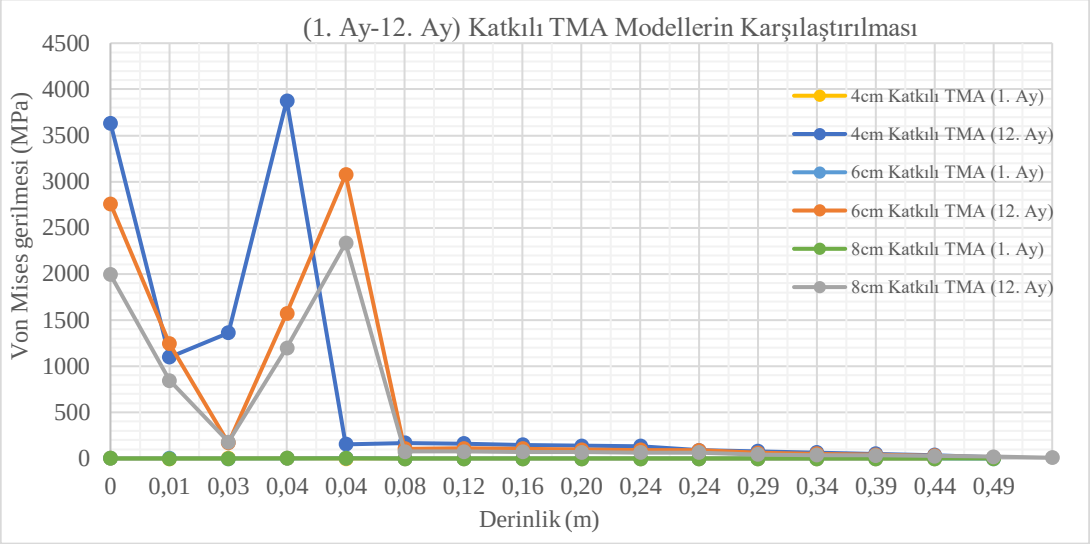


Şekil 4.33 : Alttemel tabakasında oluşan deformasyonu (12.Ay).

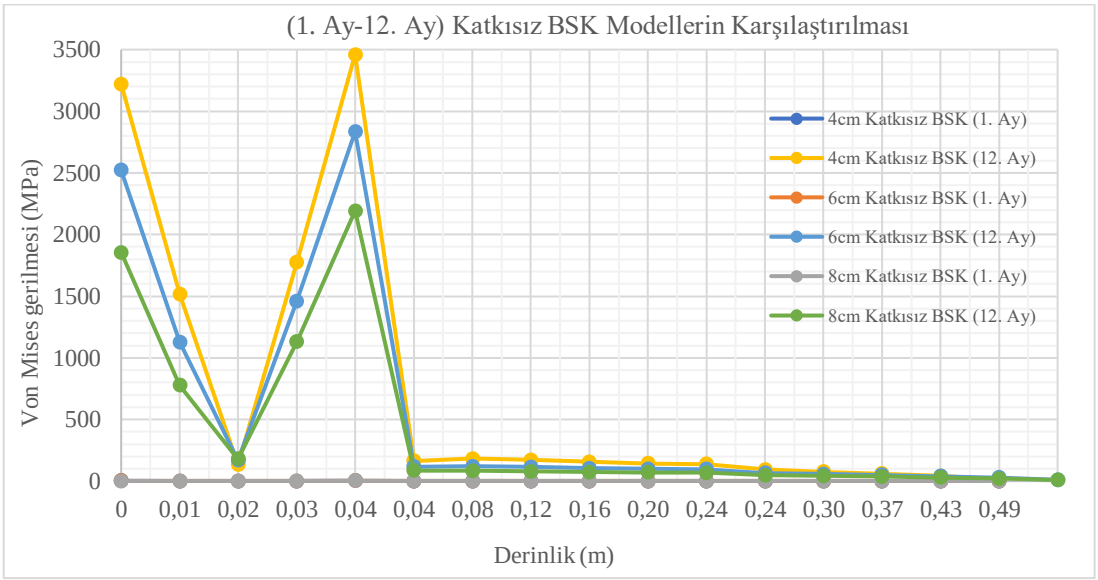
4.5 1. AY VE 12. AY MODELLERIN PERFOMANS KARŞILAŞTIRMASI

4.5.1 Von-Mises Gerilmesi

Şekil 4.34 ve Şekil 4.35'te görüldüğü üzere 4cm kaplama kalınlıktaki modeller daha yüksek gerilmeye sahip, 6cm ve 8cm kaplama kalınlıktaki modeller daha düşük gerilmeler meydana gelmektedir. Beklendiği gibi katkılı TMA modellerde daha yüksek von mises gerilmeler meydana gelmiştir. 1.Ayda oluşan gerilmeler çok küçük ve sıfıra yakın olduğundan dolayı grafiklerde düz çizgi şeklinde görülmektedir.



Şekil 4.34 : Katkılı TMA Modellerin Von mises gerilmesi karşılaştırması (1.Ay-12.Ay).



Şekil 4.35 : Katkısız BSK Modellerin Von mises gerilmesi karşılaştırması (1.Ay-12.Ay).

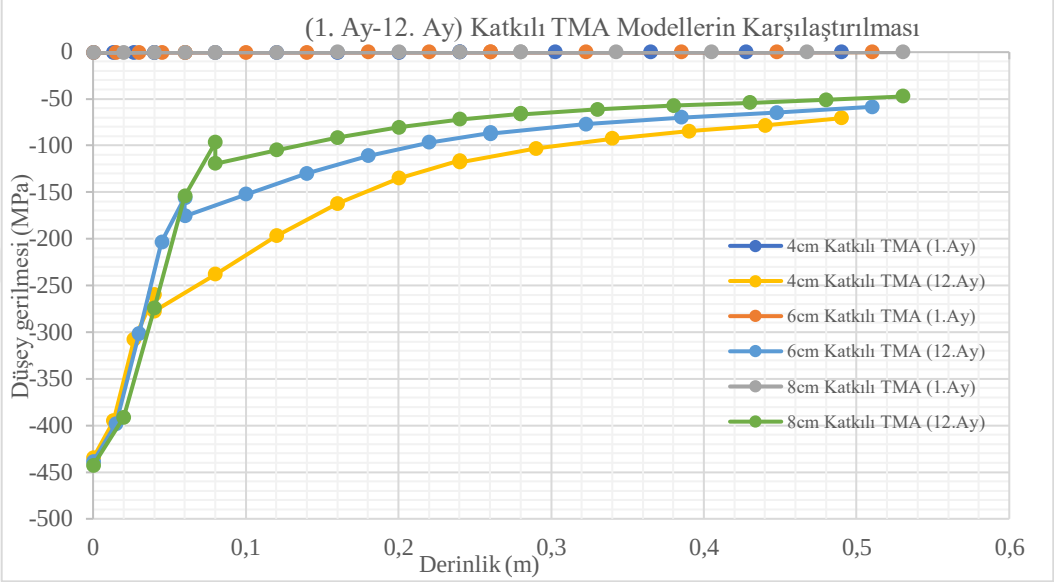
Tablo 4.20'de tüm yol üst yapılarında zaman periyoduna bağlı olarak eğri uydurma yöntemi (curve fitting method) ile Von Mises gerilmelerindeki eğim çizgisine göre en iyi fonksiyon denklemlerinin üstel olduğu tespit edilmiş; regresyon analizleri incelendiğinde ise ampirik çalışmaların sayısal analizleri desteklediği, R^2 değerlerinin 1'e yakın olduğu tespit edilmiştir, dolayısıyla güçlü bir ilişki olduğu görülmektedir.

Tablo 4.20: Yol üstyapısı Von Mises gerilmelerin fonksiyon ve regresyon analizleri.

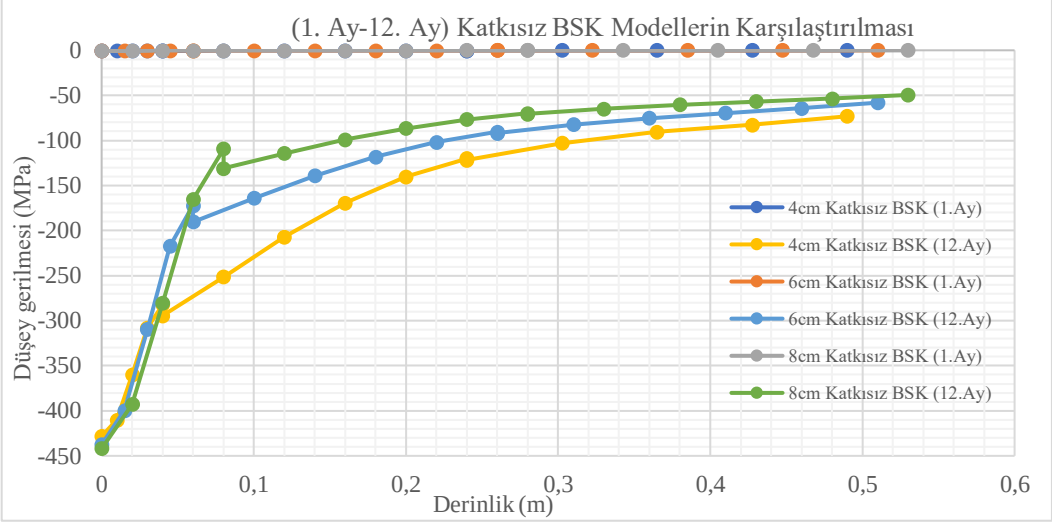
Katkılı TMA Modeller	**Fonksiyon tipi**	**Regresyon denklemi**	**R^2**
4cm Kaplama kalınlığı	Üstel (Exponential)	$2625.2e^{-0.31x}$	0.828
6cm Kaplama kalınlığı	Üstel (Exponential)	$2066.7e^{-0.304x}$	0.7528
8cm Kaplama kalınlığı	Üstel (Exponential)	$1417.5e^{-0.288x}$	0.7745
Katkısız BSK Modeller	**Fonksiyon tipi**	**Regresyon denklemi**	**R^2**
4cm Kaplama kalınlığı	Üstel (Exponential)	$2346.1e^{-0.283x}$	0.7201
6cm Kaplama kalınlığı	Üstel (Exponential)	$1777.9e^{-0.277x}$	0.766
8cm Kaplama kalınlığı	Üstel (Exponential)	$1369.7.5e_{-0.28x}$	0.7818

4.5.2 Düşey Gerilmesi

Şekil 4.36 ve Şekil 4.37'de görüldüğü üzere katkılı TMA ve katkısız BSK modellerde en iyi düşey gerilme sonucu, 8cm kaplama kalınlıktaki modellere sahip, 6 cm ve 4 cm kaplama kalınlıktaki modeller daha düşük gerilmeler meydana gelmektedir. 1.Ayda oluşan gerilmeler sıfıra yakın mertebede küçük olduğundan dolayı grafiklerde düz çizgi şeklinde görülmektedir.



Şekil 4.36 : Katkılı TMA Modellerin düşey gerilmesi karşılaştırması (1.Ay-12.Ay).



Şekil 4.37 : Katkısız BSK Modellerin düşey gerilmesi karşılaştırması (1.Ay-12.Ay).

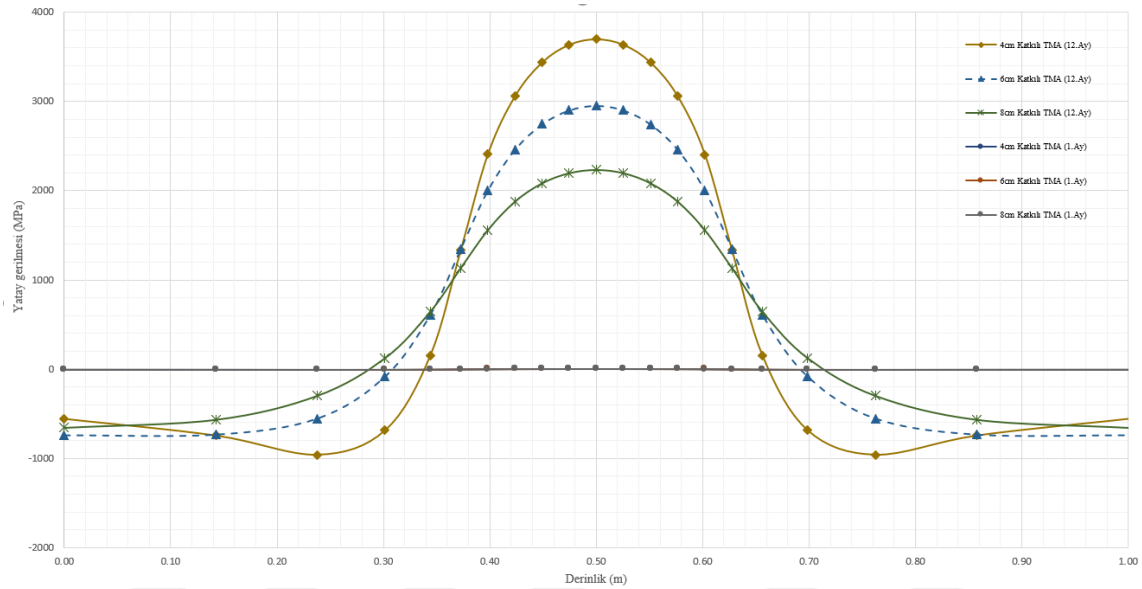
Tablo 4.21 değerlendirildiğinde kaplama kalınlığı ile düşey gerilmeleri arasında güçlü bir ilişki bulundu. Düşey gerilmelerindeki eğim çizgisine göre en iyi fonksiyon denklemlerinin Polinom olduğu tespit edilmiştir. R^2 değerlerinin genellikle 1'e yakın olduğu görülmüş ve sayısal analizlerin deneysel çalışmaları desteklediği sonucuna varılmıştır.

Tablo 4.21: Yol üstyapısı düşey gerilmelerin fonksiyon ve regresyon analizleri.

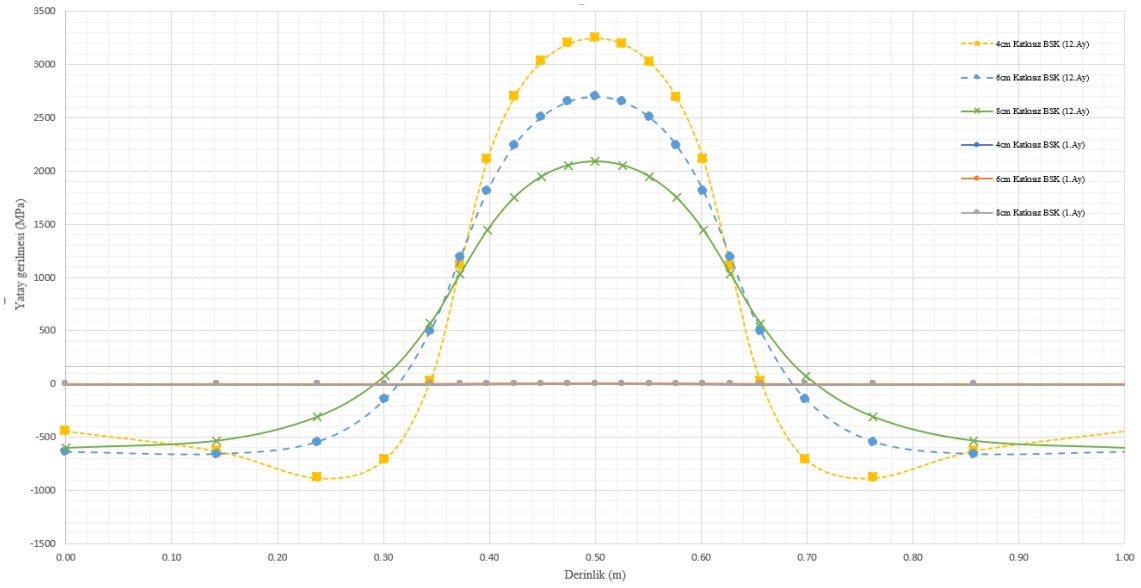
Katkılı TMA Modeller	**Fonksiyon tipi**	**Regresyon denklemi**	**R^2**
8cm Kaplama kalınlığı	Polinom	$-2513x^2+1767.2x-330.44$	0.748
6cm Kaplama kalınlığı	Polinom	$-2382.1x^2+1682.4x-338$	0.8009
4cm Kaplama kalınlığı	Polinom	$-2086x^2+1583.6x-370.66$	0.9375
Katkısız BSK Modeller	**Fonksiyon tipi**	**Regresyon denklemi**	**R^2**
8cm Kaplama kalınlığı	Polinom	$-2467.7x^2+1754.2x-336.29$	0.7711
6cm Kaplama kalınlığı	Polinom	$-2274.5x^2+1645.6x-344.72$	0.8362
4cm Kaplama kalınlığı	Polinom	$-2130.3x^2+1630x-383.18$	0.9595

4.5.3 Yatay Gerilmesi

Şekil 4.38'de katkılı TMA ve Şekil 4.39'da katkısız BSK yol üstyapısı modellerde 4cm kaplama kalınlığa sahip daha yüksek yatay gerilmeyi sahiptir. En düşük yatay gerilmeler 8cm kalınlıktaki kaplamalara aittir. 1.ayın yatay gerilmeleri dikkate alınmayacak kadar küçüktür dolaysıyla grafikte sıfıra yakın bir düz çizgi gibi görünmektedir.



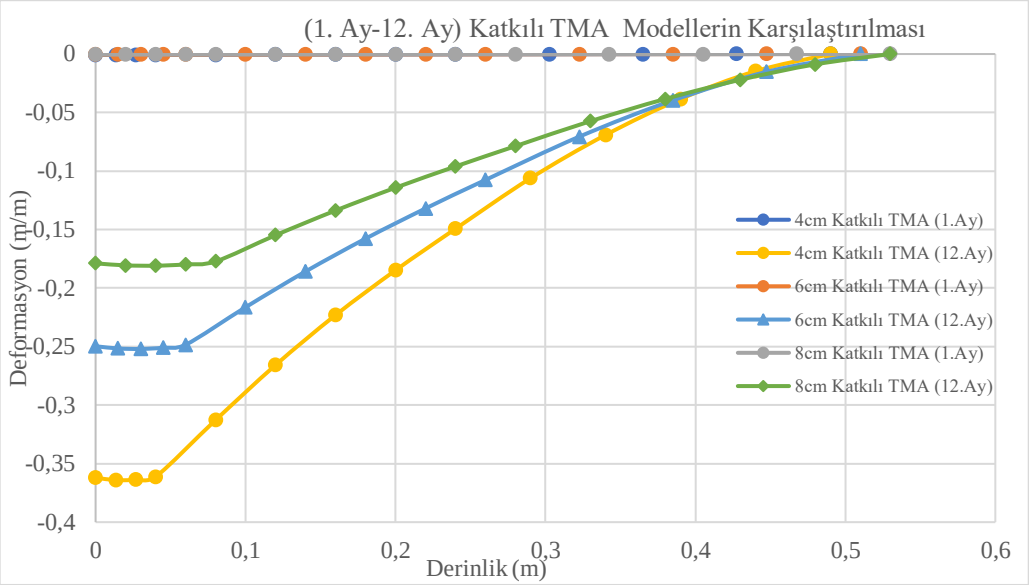
Şekil 4.38 : Katkılı TMA Modellerin yatay gerilmesi karşılaştırması (1.Ay-12.Ay).



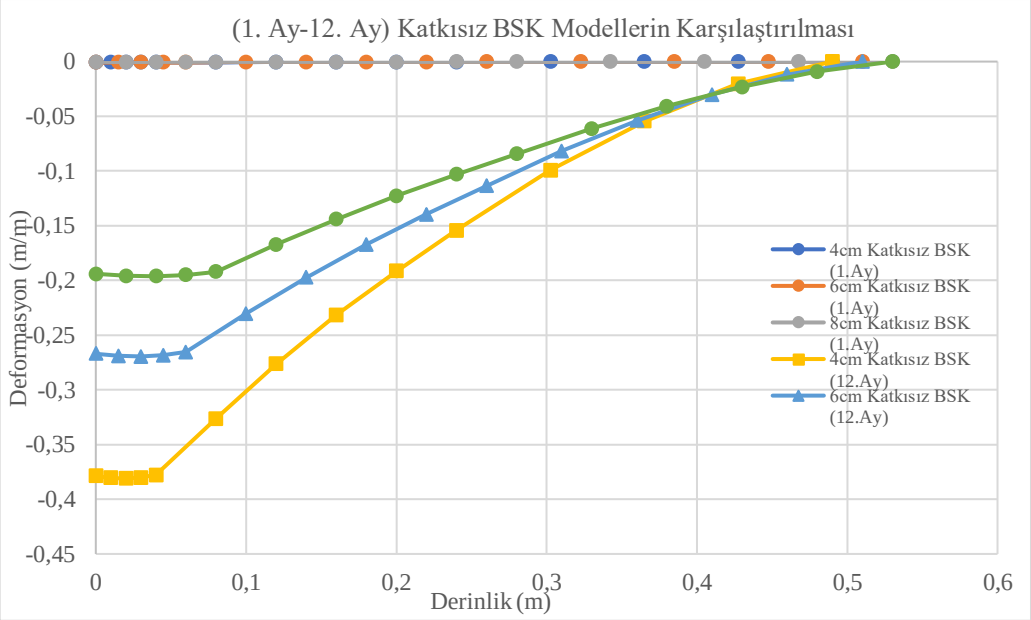
Şekil 4.39: Katkısız BSK Modellerin yatay gerilmesi karşılaştırması (1.Ay-12.Ay).

4.5.4 Deformasyon

En düşük deformasyon 8cm kaplama kalınlıktaki modellere aittir. Şekil 4.40 ve Şekil 4.41'de görüldüğü üzere 4cm ve 6cm kaplama kalınlıktaki modellerde daha yüksek deformasyonlar meydana gelmiştir. Şekil 4.40 ve Şekil 4.4'te gösterilen grafikte maksimum deformasyonlar asfalt yüzeyinde oluşmaktadır ve alttemel tabakasında deformasyonlar ihmal edilebilecek kadar önemsiz mertebede düşmektedir.



Şekil 4.40 : Katkılı TMA Modellerin deformasyonu karşılaştırması (1.Ay-12.Ay).



Şekil 4.41 : Katkısız BSK Modellerin deformasyonu karşılaştırması (1.Ay-12.Ay).

Tablo 4.22'de en iyi fonksiyon denklemlerinin zaman periyoduna bağlı olarak yatay deformasyonlar hakkında eğri uydurma (curve fitting) eğim çizgisine göre Polinom olduğu belirlenmiş, regresyon analizleri değerlendirildiğinde ampirik çalışmaların sayısal analizler ve R^2 değerlerinin 1'e yakın olması, dolayısıyla güçlü bir ilişki tespit edilmesi.

Tablo 4.22: Yol üstyapısı deformasyon fonksiyon ve regresyon analizleri.

Katkılı TMA Modeller	**Fonksiyon tipi**	**Regresyon denklemi**	**R^2**
8cm Kaplama kalınlığı	Polinom	$-0.0693\ x^2+0.4234x-0.1959$	0.9857
6cm Kaplama kalınlığı	Polinom	$-0.2416\ x^2+0.6732x-0.2706$	0.9888
4cm Kaplama kalınlığı	Polinom	$-0.6845\ x^2+1.1456x-0.3871$	0.9939
Katkısız BSK Modeller	**Fonksiyon tipi**	**Regresyon denklemi**	**R^2**
8cm Kaplama kalınlığı	Polinom	$-0.928\ x^2+0.469x-0.2128$	0.9856
6cm Kaplama kalınlığı	Polinom	$-0.2965\ x^2+0.7406x-0.29$	0.9896
4cm Kaplama kalınlığı	Polinom	$-0.7276\ x^2+1.2021x-0.4044$	0.9935

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Esnek kaplama asfalt yollarında meydana gelen hasarlar genellikle deformasyonlar, çatlamalar ve ayrışmalar olmak üzere üçe ayrılmaktadır. Tüm bu hasarlarda başta olan faktörler; iklim koşulları, trafik yükün etkisi, dizayn, yapım ve serme hataların etkisi, hatalı malzeme oranı ve seçimin etkisi yer almaktadır. Trafik etkisi faktörünü içeren dingil yükü, tekerlek sayısı, trafik yoğunluğu, lastik basıncı, araç türü ve tekrarlanan yükü olmaktadır. İklim gibi çevresel koşulları içeren unsurlar yağış miktarı, hava sıcaklığın aşırı yükselmesi ve soğuması, don etkisi (tekerlek zincirleri, kış-buz lastiği ve sırt kauçuğu lastik kullanımı çökme ve oturmayı neden olmaktadır, oturmalarda asfalt yüzeyinde su birikimi olur dolaysıyla asfalt bozulmaları, dengesiz araç kullanımı ve öte yandan biriken sular gecede ayna gibi davranarak karşıt arabaların farlarının ışığıyla otomobil sürücüsünün gözüne yansıtıyor ve oldukça zararlı sonuçları neden olmaktadır), bulunmaktadır. Hatalı malzeme seçimin etkisini etken maddeler, asfaltın şişmesi (alt tabakalarında bulunan su ve rutubetler kış aylarında donması nedeniyle tabakaların hacmini arttırır ve şişmesini sebep olur), standart dışı (düşük) asfalt kalınlığı, düşük bitümlü asfaltlar, kullanılan agregaların aşınma ve don dayanımın az olması ve kaplamada kullanılan aşırı kaba agrega veya az oranlı ince ve mıcır taneli agregalar oturma ve çökmeyi neden olmaktadır. Yapım ve serme hatalarını etkileyen faktörler ise taban zeminin toprak türü ve iyice sıkıştırmaması, tabakaların sıkıştırma hatası, yanlış karışım yüzdesi, kusurlu serme ve karışım sıcaklığın iyice ayarlanmaması olmaktadır. Taş mastik asfaltta meydana gelen süzülme ve kusmaları ortadan kaldırmak için selülozik elyafı kullanılır. Selülozik elyaflar, TMA karışımlarda bitümü destekler ve stabiliteyi arttırıp, yüksek performansı sağlamaktadır. Polimerler ve elyaflar asfaltın ömrünün uzatılmasını sağlar.

Söz konusu sorunlar göz önünde bulundurularak, asfalt yol üstyapısının çevresel koşullar altında, daha üzün ömürlü ve daha iyi bir performans sergilenmesi amacıyla bu çalışma yapıldı. Amaçlarından biri de alt tabakalarda ve kaplamada gerilmelerin neden olduğu çatlaklar ve deformasyonları azaltmak ya da engellenmek ve oluşacak olan yer değiştirmeleri belirlenen sınır şartların içinde tutmaktır. Ampirik deney sonuçları, nümerik yöntemler kullanarak desteklenmesi ve ileriye yönelik tahminlerin yapılmasına sağlanacaktır. Bu amaç gözetilerek gerçekleştirilen çalışmada yol üstyapısının çevresel koşullar altındaki genel performans değerlendirilmektedir. Abaqus CAE destekli programda ampirik deney sonuçları göz önünde bulundurarak yol üstyapısının simülasyon modellemeleri oluşturulup ve analiz edilmiştir.

Sunulan sonuçlara göre, SBS ve selülozik elyaf ile modifiye edilmiş TMA ve modifiyesiz asfalt betonu BSK ile hazırlanan yol üstyapısında, trafik ve iklim gibi çevre koşullarının yol performansına etkisi bir yıl boyunca araştırılmıştır. Ayrıca katmanlarda kullanılan agrega ve bitümün özellikleri incelenmiştir. Kullanılan malzemelerin KTŞ-2013 ve AASHTO standartlarına uygun olduğu tespit edilmiştir. Saf bitümün kullanıldığı yol kaplamasında optimum bitüm oranı %5,2 olarak belirlenmiş; SBS-modifiye bitüm ilave edilen TMA kaplamada ise optimum bitüm oranı SBS-polimer kullanımına bağlı olarak artmış ve %6,5 olarak belirlenmiştir. SBS ile modifiye edilmiş TMA kaplamanın esneklik modülü değerleri katkısız asfalt betonu BSK olanlara göre daha yüksek olarak belirlenmiştir. Esneklik modülleri, çok katmanlı yapıda yukarıdan aşağıya düşüş eğilimi göstermiştir. Asfalt tabakalarında zamana bağlı olarak gerilme değerlerinin artmasının nedeni asfaltın sertliğinden kaynaklanmaktadır. Asfaltlar ısıya duyarlılık açısından termoplastik malzemeler oldukları için yüksek sıcaklıklarda esnek, düşük sıcaklıklarda kırılgan olmaları beklenir. Asfaltın esnek yapısının nakliye, depolama, karışım ve üretim süreçlerindeki çevre koşulları, sıcaklık değişimleri ve çökelmeye bağlı oksidasyon nedeniyle sertleştiği görülmüştür. Ayrıca boşluk oranı arttıkça hava ile temastan dolayı sertleşme süresi kısalmaktadır. Asfalt yol üstyapı, kaplamasında sertleşmenin katkısız BSK kaplamada daha yüksek olduğu görülmüş, polimer ve elyaf kullanımının yüksek sıcaklıklarda deformasyona, düşük sıcaklıklarda kırılma eğiliminin dayanımı artırdığı anlaşılmıştır.

SBS ve elyaf katkılı TMA kaplamada performans özelliklerinin katkısız asfalt betonu BSK olanlara göre SBS ve elyaf polimer malzeme kullanımına bağlı olarak arttığı anlaşılmaktadır. Bu durum, SBS polimer ve elyaf kullanıldığında agregalar arasındaki yapışkanlık (aderans) artışından kaynaklanmaktadır. Yol üst yapısında bir yıllık süre içerisinde trafik ve iklimin de etkisiyle maksimum yük tekrar sayısına bağlı olarak yorulma dayanımı azalmıştır. Bu nedenle, yol üzerindeki gerilmelerin artmasına ve yoldaki yatay ve düşey gerilmelere bağlı olarak yolda deformasyonlar meydana gelmiştir. Çekme mukavemeti, asfaltın viskoelastik ve termoplastik davranışlarından dolayı yükleme hızına ve sıcaklığa göre değişir. Polimer kullanımı TMA kaplamada yüksek rijitliğe neden olur ve bu da elastik davranışa yol açar. En yüksek gerilmeler alt katmanlara göre kaplama tabakasında gözlenmiştir, alt katmanları, ağırlık ve hareketli yükleri alt taban katmanlarına aktardıkları için en az Von Mises gerilimine maruz bırakılmıştır. Kaplama ve temel tabakalarında alttemel tabakasına göre deformasyonların daha yüksek olduğu görülmüştür. Ampirik çalışmalarda elde edilen esneklik modülü, poisson oranı, özgül

ağırlık gibi malzemelerin ampirik parametrelerinden yararlanılarak sonlu elemanlar yöntemiyle tabakalarda belirlenen Von Mises gerilme, yatay ve düşey gerilmeler ve deformasyon değerlerinin desteklediği görülmüştür. Ampirik sayısal analiz yöntemlerinden türetilen parametrelerle sonlu elemanlar yöntemi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, farklı asfalt kaplama katmanlarına sahip modellere ait Von Mises gerilmeleri ve deformasyonları ortaya çıkarılmıştır. Asfalt kalınlığı artırılınca maksimum deformasyon miktarı nispeten düşük bir seviyede bulunmuştur. Bir yıl periyodunda kaplama tabakasında oluşan maksimum deformasyon miktarı 0.379413 (m/m) 4cm kaplama kalınlıktaki katkısız BSK'da oluşmakta olup, minimum deformasyon miktarı 0.155528 (m/m) 8cm kaplama kalınlığına sahip katkılı TMA olduğu tespit görülmüştür. Kaplama kalınlığı artınca deformasyon miktarında yaklaşık iki kat azalmaktadır. Kaplama kalınlığı ile hem deformasyonlar hem de Von Mises gerilmeleri arasında güçlü bir ilişki bulunduğu tespit edilmiştir. Esnek yol kaplamasındaki farklı malzeme türleri ve farklı katmanlardan üretilmesi nedeniyle analitik hesaplamalar karmaşıktır. Yolların üst yapıları üzerindeki trafik yükü ve basıncının dağılımı çeşitlidir ve her katmanda farklı malzemeler kullanılır ve bu nedenle mekanik özellikler ve yükü dağıtma yeteneği değişiklik gösterir. İklim ve çeşitli çevresel koşullar yolun performansını etkiler. Bu nedenlerden dolayı yolun performans özelliklerinin belirlenmesi için ampirik çalışmalar sayısal analizlerle desteklenmelidir.

Tekrarlanan yükler altında, asfalt betonu kaplamaların yorulma dayanımı zaman içinde çevre (iklim) ve trafik koşullarına bağlı olarak yorulmada düşüler görülmüştür. Bu tip bozulmaların önüne geçmek ve asfaltın uzun ömürlü olabilmesi için polimer malzemeler kullanılması önerilmektedir. Bu çalışmada, 8cm kaplama kalınlığa sahip katkılı TMA yapıdan daha iyi sonuçlar elde edilmiş, dayanım bakından daha iyi olduğundan dolayı deformasyon açısından da daha az miktarda artış göstermiştir. Katkılı TMA kaplamanın yorulmaya karşı dayanımı arttığından dolayı yol üst yapısının hizmet servisi de artmaktadır. Katkılı TMA'ların agrega gradasyonu dane boyutları daha büyük olduğu için dayanımı daha fazladır. Yol üstyapının kaplama kalınlığı artınca oluşan gerilmeler alt tabakalara daha az yaymaktadır, dolaysıyla şekil değiştirmede daha az meydana gelmektedir. Yoğun sıcaklık farkı olan karasal iklimin hüküm sürdüğü ve trafik yükünün ve çeşidinin fazla olduğu yerlerde çalışmalar yapılarak değerlendirilecektir. Yapılan alanızda trafik yükü az olduğu için sonuçların birbirine yakın çıkmıştır, fakat tekrarlı yükün fazla olduğu yerlerde gerilme-deformasyon değişimleri arasındaki fark daha iyi görülecektir. Sonuçlara göre katkılı malzeme kullanımı katkısız

malzemeye göre daha iyi sonuçlar sergilediği anlaşılmıştır. Daha önce de belirtildiği gibi bu araştırmamızın amacı; bir yıl periyodunda tekrarlanan yükler ve çevre gibi iklim gibi çevresel koşullarında, üstyapının yorulmaya karşı yüksek dayanımını sahip olan bir karışımı elde etmek olduğundan dolayı katkılı TMA karışımı katkısız BSK'dan daha iyi bir karışım olduğu tespit edilerek istenilen amaca ulaşılmıştır.

KAYNAKLAR

Abdel-Motaleb M.E., 2007, Impact of high- pressure truck tires on pavement design in Egypt, Emirates Journal for Engineering Research, 12 (2), 65-73.

Abed A.H., Al-Azzawi A.A., 2012, Evaluation of rutting depth in flexible pavements by using finite element analysis and local empirical model, Am. J. Eng. Appl. Sci. 5 (2), 163–169.

Airey, G.D., 2004, Styrene butadiene styrene polymer modification of road bitumens," J. Mater. Sci., 39 (3), 951–959.

Akyüncü V., Yıldırım H., 2014, Sulphate performance of different types of fly ash concrete, Sigma 32, 434-443.

Alhadidy, A.I, Tan, Y.Q., 2009, Effect of polyethylene on life of flexible pavements, Construction and Building Materials, 23,1456–1464.

Ameri M., Vamegh M., Imanisab R., Rooholamini H., 2106, Effect of nanoclay on performance of neat and SBS-modified bitumen and HMA, Petroleum Science and Technology, 34, 11-12.

Anderson B., 2005, Fracture mechanics: fundamentals and applications", CRC Press, London, UK, ISBN-13: 97-0849316562.

Arsalan, H., 20017, Karayollarında üstyapı performansının iyileştirilmesi ve analizi (Doktora tezi), Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi.

Asphalt Institute, 2001, "Quantification of the Effects of Polymer-Modified Asphalt", 1st ed. United States.

ASTM C127, Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate, ASTM International, U.S.A, PA, 2015.

ASTM C128, Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate, ASTM International, U.S.A, 2001.

Austrods, 2000, Guide to the Selection of Road Surfacings. Sydney, Australia.

Bağdatlı, M. E. C., Yıldırım, M. Ş., 2017, Karayolu Üstyapılarındaki Bozulmaların Bakım Maliyetlerine Etkisi, 6(1), 102-111.

Bakhshi B, Imamnısab R., 2015, Rutting analysis of modified asphalt concrete pavements, Construction Materials, 170(4), 1-12.

Bal, Ü. Y., 2013, Airy Gerilme Fonksiyonları ve Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Beton Yol Kaplamasının 3 Boyutlu Gerilme Analizleri, Yüksek lisans tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi.

Behbahani H., Nowbakht S., Fazaeli H.and Rahmani J., 2009, Effects of Fiber Type and Content on the Rutting Performance of Stone Matrix Asphalt. Journal of Applied Polymer Science, 9: 1980–1984.

Behbahani H., Ziari H., Noubakhat S., 2008, The use of polymer modification of bitumen for durant hot asphalt mixtures, J. Appl. Sci. Res. 4 (1), 96–102.

Beyhan, H., 2019, Ulaştırma Sektöründe Enerji Verimliliği Hedefler Engeller Fırsatlar. Ulaştırma Sektöründe Enerji Verimliliği Hedefler Engeller Fırsatlar. Ankara.

Bozturk, H., 2017, Karayollarında üstyapı performansının iyileştirilmesi ve analizi (Doktora tezi), Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi.

Caia Y., Sangghaleh A., Panb E., 2015, Effect of anisotropic base/interlayer on the mechanistic responses of layered pavements, Comput.Geotech., 65, 250-257.

Chelovian, A., Shafabakhsh, G., 2017. Laboratory evaluation of Nano Al2O3effect on Dynamic Performance of Stone Mastic Asphalt, International Journal of Pavement Research and Technology, 10 (2), 131-138.

Chen H. H., Marshek K. M., Saraf C. L., 1990, Effects of truck tire contact pressure distribution on the design of flexible pavements: a three dimensional finite element approach, Transportation Research Record, 1095, 7278 .

Çeloğlu, E., 2014, farklı doğal asfaltların bitüm ve bitümlü sıcak karışımların özelliklerine etkileri, Yüksek lisans tezi, Fırat Üniversitesi.

Fang H., Haddock J.E., White T.D., Hand A.J., 2004, On the characterization of flexible pavement rutting using creep model-based finite element analysis, Finite Elem. Anal. Des. 41 (1), 49–73.

Feng Z., Rao W., Chen C., Tian B., Li, X. Li P., Guo Q., 2016, Performance evaluation of bitumen modified with pyrolysis carbon black made from waste tyres, Constr. Build. Mater. 111, 495–501.

Forough, S.A. Investigating the effects of loading frequency and temperature on moisture sensitivity of SBS-modified asphalt mixtures. J. Mater. Civ. Eng. 2014, 26, 897–903.

Ghasemi, M., Marandi, S. M., 2010, Laboratory Investigation of the Properties of Stone Matrix Asphalt Mixtures Modified with RGP–SBS, Digest Journal of Nano Materials and Biostructures, 1823-1834.

Google haritası, (Türkiye) https://www.google.com/maps, [Ziyaret Tarihi: Aralık 2020]

Herb, W., Velasquez, R., Stefan, H. G, Marasteanu, M. O., Clyne, T., 2009, Simulation and Characterization of Asphalt Pavement Temperatures, 10(1), 233-247.

Hikersbay-climate, URL: http://hikersbay.com, [Ziyaret Tarihi: Aralık 2020]

Howell, W.E., Perez, S.E., Volger, W. A.,1985, Aircraft Tire Footprint Forces. Tire Pavement Interface, ASTM STP 929, Pottinger, M.G., Yager, T.J. (eds), American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 110-124.

http://www.udhb.gov.tr/images/istatistik/0c3de9b9fe1505c.pdf , UBAK 2015.

Huang Y. H., 2004, Pavement Analysis and Design, Prentice Hall Inc., New Jersey, ISBN-13: 978-0131424739.

Ismail N., 2020, Modifiye Taş Mastik Asfaltın Normal Aşınma Tabakasına Göre Performansının İncelenmesi (yüksek lisans tezi). Aksaray Üniversitesi.

Karadağ H., Fırat S., Işık N. S., 2019, Çelikhane Cürufunun Yol Temel ve Alttemel Malzemesi Olarak Kullanılması, Politeknik Dergisi, 23(3): 799- 812.

Karakaş, A. S, 2014, Bitümlü sıcak karışımların trafik etkisi altında mekanik özelliklerinin incelenmesi, (Doktora tezi), Fırat Üniversitesi.

Karaşahin, M., 2014, Karayolu üstyapısı ders notları‖, İstanbul Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Ders Notları.

Karataş A.S., Bozkurt T.S, Sayın B., Ortes F., 2017, An assessment of SBS modified asphalt concrete pavements performance features performing numerical analysis, AIP Conference Proceedings, 1863, 540002.

Karataş A.S., Kuloğlu N., Kök B.V., Yilmaz M., 2015, The evaluation of the field performance of the neat and SBS modified hot mixture asphalt, Constr. Build. Mater. 98, 678–684.

Karataş A.S., Ortes F., 2017, Comparative assessment of the mechanical properties of asphalt layersunder the traffic and environmental conditions, 131, 278-290.

Karataş A.S., Sayın B., Kuloğlu N., 2014, The changes in the mechanical properties of neat and SBS-modified HMA pavements due to traffic loads and environmental effects over a one-year period, Construction and Building Materials, 71, 406-415.

Karayolları Genel Müdürlüğü Yol Envanteri, KGM, Ankara, 2016.

Karayolları Teknik Şartnamesi, KGM, Ankara, 2013.

Khodaii A., Mehrara A., 2020, Evaluation of permanent deformation of unmodified and SBS modified asphalt mixtures using dynamic creep test, Constr. Build. Mater., 23 (7), 2586–2592.

Khodary F., Akram H., Mashaan N., 2009, Behaviour Of Different Pavement Types Under Traffic Loads Using Finite Element Modelling, Journal of Civil Engineering and Technology, 11(11), 40-48.

Kuloğlu N., Kök B. V., Durmaz, B., 2006, Beton asfaltın farklı türden temeller üzerindeki serbest basınç mukavemet değerinin değişimi, Science and Eng. J of Fırat Univ, 18 (1), 91-97.

Kuo C. M., K. T., Darter M. I., 1995, Three dimensional finite element model for analysis of concrete pavement support, Jan 4 1996, Washington, D.C., TRB, Transportation Research Record, ISBN: 0309061660, 119-127.

Lippmann S. 1986, Effects of Tire Structure and Operating Conditions on the Distribution of Stress Between the Tread and the Road, in The Tire Pavement Interface, 91-109.

Lu X., Isacsson U., 2000, Modification of road bitumens with thermoplastic polymers, Polym. Test., 20 (1), 77–86.

Mutyılmaz, S., 2014, Lifli Kendiliğinden Yerleşen Betonların Yol Betonu Olarak Kullanılması, Yüksek lisans tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi.

Noureldin, A.S., 1995. Long Term Performance Of Asphalt Cement Binders, A Dual View, Physical Properties Of Asphalt Cement Binders, ASTM STP 1241, John C. Hardin, Ed., American Society For Testing And Materials, Philadelphia.

Orhan, F., 2012, Bitümlü Karışımlar Laboratuarı Çalışmaları, Karayolları Genel Müdürlüğü Yayınları, Ankara.

Ozgen, E., 1960, Yolarda don zararlarının önlenmesi, Karayolları I Bölge Müdürlüğü, İstanbul.

Öztorun N. K., 2015, Yapı analizinde sonlu elemanlar ders notları, İstanbul Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Ders Notları.

Pandey S., Chowdary T. H., Rokade S., 2017, Effect Of Higher Axle Loads On Service Life Of Bitumınous Pavement, World Conference on Pavement and Asset Management (WCPAM).

Park, H.M., Choi, J.Y., Lee, H.Y., Hwang, E.Y., 2009, Performance Evaluation of a High Durability Asphalt Binder and a High Durability Asphalt Mixture for bridge Deck Pavements, Construction and Building Materials, 23, 219–225.

Park, T.S.; Cho, H.K. Evaluation of Mechanical Characteristics of SBS Polymer Modified Asphalt Mixtures upon Variation of Filler Contents. Neurochem. Res. 2002, 33, 1979–1989.

Rahman M. T., Mahmud K., Ahsan S. 2011, Stress strain characteristics of flexible pavement using Finite Element Analysis, International Journal of Civil and Structural Engineering, 2 (1), 352-364.

Roberts R. L., Kandhal P. S., Brown R. E., 1996, Hot Mix Asphalt Materails, Mixture, Design and Construction, Second Edition, NAPA Education Foundation, Lanham, Maryland.

Saedi, S., 2019, Polimerik Katkıların (Frp, Viatop Premium ve SBS) Taş Mastik Asfalt Kaplamaların Mekanik Özellikleri Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Trabzon, 186s.

Sebaaly, P.E., Tabatabaee, N. 1993, Influence of vehicle speed on dynamic loads and pavement response. Transportation Research Board, 1410, 107–114.

Sengoz B., Isikyakar G. 2008, Evaluation of the properties and microstructure of SBS and EVA polymer modified bitumen, Constr. Build. Mater., 22 (9),1897–1905.

Seong H. S., Glaucio H. P., William G. B. 2006, Simulation of crack propagation in asphalt concrete using an intrinsic cohesive zone model, Journal of Engineering Mechanics, 132(11), 1215-1223.

Sirin O., Kim H. J., Tia M., Choubane B., 2008, Comparison of rutting resistance of unmodified and SBS-modified Superpave mixtures by accelerated pavement testing, Constr. Build. Mater., 22 (3), 286–294.

Sultangazi belediye başkanı, (Türkiye) URL: https://abdurrahmandursun.com, [Ziyaret Tarihi: Aralık 2020]

Sun, L., Duan, Y., 2013, Dynamic response of top-down cracked asphalt concrete pavement under a half-sinusoidal impact load, Springer-Verlag Wien, 2, 16-25.

Şanlıer, İ., 2018, Kuzey Marmara Otoyolu Projesi Kapsamında Taş Mastik Asfalt (TMA) Uygulamaları, Performanslarının Karşılaştırılması ve Maliyet Analizi. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi,Sakarya, 156s.

Talati, A., Talati, V., 2014, Study of Stone Matrix Asphalt For The Flexible Pavement, 2 (1), 2321-9939

Tielking JT., Roberts FL., 1987, Tire contact pressure and its effect on pavement strain, ASCE Journal of Transportation Engineering 113, 56–71.

TS EN 1097-6, Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler-Bölüm 6: Tane yoğunluğunun ve su emme oranının tayini,TSE, Ankara, 2-43 (2013).

TS EN 12697, Bitümlü karışımlar - Deney yöntemleri, TSE, Ankara, 1-37(2016).

TS EN 1367-1. Agregaların ısıl ve bozunma özellikleri için deneyler – Bölüm 2 : Magnezyum sülfat deneyi, TSE, Ankara, 1-14 (2008).

TS EN 1426, ―Bitüm ve bitümlü bağlayıcılar-İğne batma derinliği tayini, TSE, Ankara, 1-16(2015).

TS EN 933-1, ―Agregaların geometrik özellikleri için deneyler- Bölüm 1: Tane büyüklüğü dağılımının tayini - Eleme yöntemi‖, TSE, Ankara, 2-18 (2012).

TS EN 933-3, Agregaların geometrik özellikleri için deneyler bölüm 3: Tane şekli tayini yassılık endeksi, TSE, Ankara, 2-11 (2012).

Tunç, A., 2001. Yol Malzemeleri ve Uygulamaları, Atlas Yayınevi, Yayın no. 01, İstanbul.

Tunç, A., 2004. Esnek Kaplama Malzemeleri El Kitabı, Asil Yayın Dağıtım Ltd.Şti., Ankara, 352 s.

Umar F., Yayla N., (1994). Yol inşaatı, İstanbul Teknik Üniversitesi.

Varol T., 2004, Bartın yöresi orman yollarının üstyapı kalınlığının ve taşıma kapasitesinin Belirlenmesi (Doktora tezi). Zonguldak Karaelmas Üniversitesi.

Vijapure P., Shurpali P., Agarwaland P., Allapur S., 2015, Finite Element Analysis of Flexible Pavement, International Journal of Computer & Mathematical Sciences, 4, 5.

Water Science Engineering Association. (Iran) URL: https://waterse.ir/sieve-analysis-hydrometry, [Ziyaret Tarihi: Aralık 2020]

Wen, G.; Zhang, Y.; Zhang, Y.; Sun, K.; Fan, Y. Rheological characterization of storage-stable SBS-modified asphalts. Polym. Test. 2002, 21, 295–302.

Yanjing Z., Fujian N., Lan Z., 2011, Viscoelastic response of reflective cracking under dynamic vehicle loading in asphalt concrete pavements, 11th International Conference of Chinese Transportation Professionals (ICCTP), 14-8 August 2011, Nanjing , China, ISBN: 9780784411865, 3278-3297.

Yilmaz M., Çeloğlu M. E., 2013, Effects of SBS and different natural asphalts on the properties of bituminous binders and mixtures, Constr. Build. Mater., 44, 533–540.

Yoo, P.J., Al-Qadi, Elseifi M.A., Janajreh I., 2006, Flexible pavement responses to different loading amplitudes considering layer interface condition and lateral shear forces, International Journal of Pavement Engineering, 7 (1), 73-86.

Zapién-Castillo S., Rivera-Armenta J. L., Chávez-Cinco M. Y., Salazar-Cruz B. A., Mendoza-Martínez A. M., 2016, Physical and rheological properties of asphalt modified with SEBS/montmorillonite nanocomposite, Constr. Build. Mater. 106, 349-356.

Zhao, X.; Wang, S.; Wang, Q.; Yao, H. Rheological and structural evolution of SBS modified asphalts under natural weathering. Fuel 2016, 184, 242–247.

Zheng C., Xie S., 2003, Effects of the tire- pavement contact pressure on asphalt pavement, Proceedings of the eastern asia society for transportation studies, 4, 401-407.

Zhi, S., Gun, W.W., Hui, L.X., Tian B., 2012, Evaluation of Fatigue Crack Behavior in Asphalt Concrete Pavements with Different Polymer Modifiers, Construction and Building Materials, 24, 72-78.

EKLER

EK-1: Cebeci-Kumtaşlı BSK'ya ait Marshall Karışım Dizaynı (İSFALT)

CEBECİ BÖLGESİ TAŞ OCAGI KAYNAKLI DİZAYN ÖZELLİKLERİ

Kumtaşı agregalara ait fiziksel özellikler ve Asfalt Betonu **Aşınma Tabakası Tip 1 (AC 16 Aşınma 50/70)** Karışım Dizaynı değerleri aşağıda verilmiştir.

Tane Boyutu Dağılımı (Elek Analizi) Deney Metodu: TS EN 933-1

Elek No. (İnç)	Elek No. (mm)	12-19 mm (3/4"-1/2") %Geçen	5-12 mm (1/2"-No:4) %Geçen	0-5 mm (No:4-0) %Geçen	Yıkanmış 0-5 mm %Geçen
3/4"	19	100,0			
1/2"	12,5	27,9	100,0		
3/8"	9,5	5,6	91,4	100,0	100,0
No 4	4,75	3,9	16,4	94,9	98,3
No 10	2,0	2,8	9,5	65,5	61,1
No 40	0,425	2,3	7,3	38,5	19,9
No 80	0,180	2,1	6,5	28,5	10,4
No 200	0,075	1,7	5,5	20,7	6,1

Agrega Fiziksel Özellikleri

Deney Adı	**Deney Metodu**	**Birim**	**Deney Sonucu**
Parçalanma Direnci (Los Angeles Aşınma Kaybı) 500 devir	TS EN 1097-2 *	%	**18**
Yassılık İndeksi (5-12mm Agrega için)	TS EN 933-3 *	%	**13**
Yassılık İndeksi (12-19 mm Agrega için)	TS EN 933-3 *	%	**10**
Soyulma Mukavemeti, % Bitümle kaplanmış yüzey (24 saat 60°C suda bekletmeden sonra)	TS EN 12697-11	%	**65**
Kaba Agregalarda Tane yoğunluğu (Hacim özgül Ağırlığı –kuru)	TS EN 1097-6 *	gr/cm^3	**2,680**
Kaba Agregalarda Su emme (Absorbsiyon)	TS EN 1097-6 *	%	**0,99**
$MgSO_4$ Değeri	TS EN 1367-2	%	**10**
Cilalanma Değeri, PSV	TS EN 1097-8	-	**58**

İnce Agrega Fiziksel Özellikleri

İnce Agregalarda Tane yoğunluğu (Hacim özgül Ağırlığı –kuru- ortalama)	TS EN 1097-6 *	gr/cm^3	**2,648**
İnce Agregalarda Su emme oranı (Absorbsiyon)	TS EN 1097-6 *	%	**1,62**
Metilen Mavisi, (ince agreganın 0/2 mm kısmına)	TS EN 933-9 *	MB	**2,75**
Filler Tane Yoğunluğu Tayini	TS EN 1097-7 *	gr/cm^3	**2,697**

Bitüm Özellikleri

Deney Adı	Birim	Deney Metodu	Deney Sonucu
Penetrasyon 25°C,100g,5s (Otomatik)	0,1mm	TS EN 1426 *	59
Bitüm Özgül Ağırlık $d_{25/25}$	-	TS EN 15326 *	1,036

AŞINMA TABAKASI DİZAYNI

Dizaynda, (12mm – 19mm), (5mm – 12mm) dane boyutu agregalar ve (0 mm – 5mm) taş tozu ve yıkanmış taş tozu ve B50/70 penetrasyonlu bitüm kullanılmıştır. Tabloda agregaların kullanım oranlan ile dizayn gradasyonu ve tolerans limitleri verilmektedir.

Agrega kullanım oranları ve karışım gradasyonu

KULLANIM ORANI		12 %	48 %	8%	32 %	KARIŞIM GRADASYONU	K.T.Ş. 2013 AŞINMA TİP 1 TABAKASI			
ELEK (İnç)	AÇIKLIĞI (mm)	12-19 mm	5-12 mm	0-5 mm Yıkanmamış	0-5 mm Yıkanmış		ŞARTNAME		İŞYERİ KARIŞIM FORMÜLÜ	
¾"	19,0	12,0	48,0	8,0	32,0	100,0	100		100	
½"	12,5	3,3	48,0	8,0	32,0	91,3	88	100	88	95
3/8"	9,5	0,7	43,9	8,0	32,0	84,5	72	90	81	89
No 4	4,75	0,5	7,9	7,6	31,5	47,4	42	52	43	51
No 10	2,00	0,3	4,6	5,2	19,6	29,7	25	35	27	33
No 40	0,425	0,3	3,5	3,1	6,4	13,2	10	20	10	16
No 80	0,180	0,3	3,1	2,3	3,3	9,0	7	14	7	12
No 200	0,075	0,2	2,6	1,7	2,0	6,5	3	8	4	8

Agrega Karışımının Efektif Özgül Ağırlığı (G_{ef}): 2,711 gr/cm^3

Agrega Karışımının Hacim Özgül Ağırlığı (G_{sb}): 2,668 gr/cm^3

KARIŞIMIN DENEY SONUÇLARI:

Asphalt Institute MS-2 Marshall metoduna göre 2x75 darbeyle 135 °C'de hazırlanan numunelerle yapılan aşınma tabakası dizaynı sonucunda, optimum bitüm; kuru agregaya göre ağırlıkça **%5,20 ±0,2** (1000 g kuru agrega + 52,0 gr B 50/70 bitüm) olarak bulunmuştur.
Optimum bitüm hesabında Marshall grafiklerinden faydalanılmış, %4 Boşluk değerine karşılık gelen bitüm değeri optimum bitüm olarak alınmıştır.
Optimum bitümdeki diğer sonuçlar aşağıda verilmektedir.

	Deney Standardı	**Sonuç**	**Şartname**
Bitüm % 'si (ağırlıkça,100'e)	TS EN 12697-1	**5,20 ± 0,2**	4,0 -7,0
Pratik Özgül Ağırlık, gr/cm^3	TS EN 12697-6 *	**2,404**	
Marshall Stabilitesi, kg	TS EN 12697-34 *	**1520**	Min.900
Boşluk, %	TS EN 12697-8	**4,0**	3- 5
Asfaltla (bitüm) dolu boşluk, %	TS EN 12697-8	**72,00**	65- 75
Agregalar arası boşluk (VMA) %	TS EN 12697-8	**14,30**	14- 16
Akma, mm.	TS EN 12697-34 *	**3,6**	2- 4
Filler /Bitüm Oranı		**1,2**	Max. 1,5

EK-2: Cebeci-Kumtaşlı TMA'ya ait Marshall Karışım Dizaynı (Arsalan, 2014)

T.C. ULAŞTIRMA BAKANLIĞI
Karayolları Genel Müdürlüğü

RAPOR

Raporun Tarihi : 02.08.2011
Yazanın Adı Soyadı : M. Neşe DEMİRCAN
Gönderildiği Yerler : Ky.17.Bölge Md., İşletmeler Dairesi Başkanlığı
Konusu : Taş Mastik Asfalt TMA Tip-1 Dizaynı Raporu Kontrolü

İlgi: Ky.17. Bölge Müd.'nün 25.07.2011 gün B111TCK1170700/350-01-19418 sayılı yazısı.

İlgi yazı ile yapımı İntel Yapı Tur. Elk. İnş. San. ve Tic. Ltd. Şti.nin yükleniminde devam eden "Kınalı-Avcılar arası TEM otoyolunda eksik kalan üstyapı iyileştirmesi ve büyük onarım inşaatı işi" kapsamında kullanılmak üzere Cebeci Su-Taş taş ocağına ait agregalar kullanılarak hazırlanan TMA Tip-1 dizaynı raporu gönderilerek kontrolü istenmiştir.

Yapılan kontrol sonucu, dizaynın aşağıda belirtilen konular göz önünde bulundurularak uygulanması yerinde olacaktır.

- TMA imalatı yapımında (polimer modifiye bitüm şartnamesi) PMB 76-16 sınıfına uygun üretilmiş modifiye bitüm kullanılmalıdır.
- TMA imalatı yapılırken karışım gradasyonu, bitüm ve fiber miktarı sürekli kontrol edilmelidir. Karışımda Polimer Modifiye Bitüm ve fiber kullanılacağından karıştırma, serme ve sıkıştırma sıcaklıkları normal sıcak karışımlara göre daha yüksek olması gerektiğinden, kullanılan katkıların üreticisi/temsilcisi firmalar tarafından önerilen sıcaklıklara göre şantiyede TMA üretimi yapılmalıdır. TMA üretimi sırasında filler agrega ile fiber malzemeyi otomatik tartıp beslemek için plentte gerekli donanım bulundurulmalıdır. Ayrıca TMA imalatının yolda sıkıştırılmasından sonra "Kum Yama Yöntemi (ASTM E-965)" ile ölçülen doku derinliğinin K.T.Ş. Kısım 408.08'de belirten değeri sağlaması gerekmektedir.
- İşyeri Karışım Formülünde hazırlanacak laboratuar briketleri sonucu bulunan değerlerin şartname dizayn kriterlerine uygunluğuna bakılması ve yukarıda belirtilen şartlar sağlanamaz ise dizaynın tekrar edilmesi uygun olacaktır.
- Agregaya ait cilalanma değerinin kontrol edilmesi, ayrıca üretilen TMA sıcak karışım malzemesinden en az 150 kg numune alınarak Tekerlek İzinde Oturma ve İndirek Çekme Mukavemeti deneyleri yapılması için laboratuarımıza gönderilmesi gereklidir.

Not: Dizaynın ilgili şartnamesine uygun olması müteahhit firmanın dizaynın uygulanmasından doğan sorumluluğunu ortadan kaldırmaz.

T.C. ULAŞTIRMA BAKANLIĞI
Karayolları Genel Müdürlüğü
Araştırma ve Geliştirme Dairesi Başkanlığı
17.Bölge Müdürlüğü

RAPOR

Raporun Tarihi	22.07.2011
Yazanların Adı ve Soyadı	Gönül YÖNTER
Ünvanı	Üstyapı Mühendisi
Gönderildiği Yerler	Karayolları Genel Müdürlüğüne Araştırma ve Geliştirme Dairesi Başkanlığı
Konusu	Taş Mastik Asfalt Tabakası Dizaynı
Lab. No	**20**

1- GİRİŞ

Kınalı - Avcılar Arası TEM Otoyolunda Eksik Kalan Üstyapı ve Büyük Onarım İnşaatı İşi Kontrol Şefliği tarafından laboratuvarımıza getirilen, Cebeci Su-Taş Taş Ocağına ait agregalar ile asfalt betonu TMA Tabakası karışım dizaynının hazırlanması istenmiştir.

2- YAPILAN ÇALIŞMALAR

Dizaynda Cebeci Su-Taş taş ocağından üretilen (3/4"-1/2"), (1/2"-No.4), (No.4-0) ve filler dane boyutu grubu agregalar ve gönderilen 56 penetrasyonlu bitüm kullanılmıştır. Karışım gradasyonunun hazırlanmasında, aşağıdaki tabloda verilen laboratuvar elek analizi sonuçları esas alınmıştır. Tabloda agregaların kullanım oranları ile dizayn gradasyonu ve tolerans limitleri verilmektedir.

KULLANIM ORANLARI		11	57	24	8	100	K.T.Ş. TMA Tabakası			
ELEK AÇIKLIĞI		3/4"-1/2"	1/2"-No.4	No.4-0	Filler	KARIŞIM GRAD.	Kısım 408 Limitleri			
mm	inch	% geçen	% geçen	% geçen	% geçen		Şartname		Tolerans	
1 1/2"	100	100,0	100,0	100,0	100,0	**100,0**	100	100	100,0	100
25	1"	100,0	100,0	100,0	100,0	**100,0**	100	100	100,0	100,0
19,1	3/4"	100,0	100,0	100,0	100,0	**100,0**	100,0	100	100,0	100,0
12,7	1/2"	53,7	100,0	100,0	100,0	**94,9**	90	100	90,9	98,9
9,52	3/8"	5,0	55,0	100,0	100,0	**63,9**	50	75	59,9	67,9
4,76	No.4	0,9	2,1	98,9	100,0	**33,0**	25	40	30,0	36,0
2,00	No.10	0,0	0,9	68,2	100,0	**24,9**	20	30	17,0	27,9
0,42	No.40	0,0	0,0	32,5	100,0	**15,8**	12	22	12,8	18,8
0,177	No.80	0,0	0,0	20,6	100,0	**12,9**	9	17	9,9	15,9
0,075	N0.200	0,0	0,0	12,3	98,0	**10,8**	8	14	8,8	12,8

T.C. ULAŞTIRMA BAKANLIĞI
Karayolları Genel Müdürlüğü
Araştırma ve Geliştirme Dairesi Başkanlığı
17.Bölge Müdürlüğü

3- AGREGA VE BİTÜM DENEYLERİNİN SONUÇLARI

Dizayn gradasyonuna uygun olarak hazırlanan agregalara yapılan deneyler ile bitüme a sonuçları aşağıda verilmektedir.

Ocak Adı	Cebeci Su-Taş Taş Ocağı				
Kayanın cinsi	Kum taşı				
	Kaba Agrega	İnce Agrega	Filler	ŞARTNAME LİMİTLERİ	Deney Standardı
Hacim Özgül Ağırlığı	2,705	2,683		Kaba Agrega Abs.Şartname Lim.	TS EN 1097-6
Zahiri Özgül Ağırlığı	2,745	2,767	2,778		
Absarbsiyonu %	0,55	1,13		Maks. 2,0	
Karışımın Efektif Özgül Ağırlığı (deneyle)			2,688		ASTM D-2041
Karışımın Efektif Özgül Ağırlığı (hesapla)			2,731		
Cilalanma Değeri			62	50	TS EN 1097-8
Termal ve Bozunma Özellikleri Magnezyum Sülfat Deneyi			1,0	16	TS EN 1367-2
Los Angeles Aşınma Kaybı, %			20,6	30	AASHTO T-96
Yassılık İndeksi, %			14,1	30	BS 812
Soyulma Mukavemeti (gönderilen bitüm ile) %			50-60	Min. 50	KTŞ Kısım 403 Ek-A
Atterberg Limitleri (Plastisite İndeksi)			N.P.	Maks. 2	TS 1900
Kil Topakları ve Ufanabilir Taneler (Maksimum %)			Yok	0,5	ASTM C-142
Organik Madde Miktarı Tayini (Maksimum %)			Yok	Bulunmayacak	TS 3679 (AASHTO T-194)
Bitüm Özgül Ağırlığı			1,019		TS 1087
Bitüm Penetrasyonu,			56		TS EN 1426
Yumuşama Noktası, °C			52		TS EN 1427
Metilen Mavisi Deneyi %			1	Maks. 1,5	TS EN 933-10
İmalatta kullanılacak bitümlü bağlayıcı			Rafinerisi		
			tipi		
			sınıfı		

4- KARIŞIMIN DENEY SONUÇLARI

Marshall Metoduna göre 2x50 darbeyle yapılan dizayn sonucunda, Optimum Bitüm kuru agregaya göre ağırlıkça % (100 gr. Kuru agrega + 6,50 bitüm) olarak bulunmuştur. Optimum bitümdeki diğer sonuçlar aşağıda verilmektedir.

	Dizayn	Şartname
Dizayna Göre Optimum Bitüm	6,50	± 0,3
Karışıma konması gereken bitüm		-
Elyaf miktarı %	0,35	0,3-1,5
Scheelenberger bitüm süzülme deneyi %	0,03	Maks. 0,3
Pratik Özgül Ağırlık	2,402	-
Stabilite kg.	894	Min. 750
Boşluk, %	3,01	4-6
Asfalt Dolu Boşluk, %	82,0	-
V.M.A, %	16,7	Min. 16
Akma, mm.	3,04	2-4

Elyaf Miktarı %	Karışımda karışım ağırlığının %0,35 oranında ÖKOCELL-G SMA Additiv (Bitümsüz)	0.3-1.5

T.C. ULAŞTIRMA BAKANLIĞI
Karayolları Genel Müdürlüğü
Araştırma ve Geliştirme Dairesi Başkanlığı
17.Bölge Müdürlüğü

5- SONUÇ

Yukarıda verilen dizayn sonuçları plentin çalışmasına esas olacaktır. Karışım, fiziksel özelliklerinin dizayna uygunluğunun ve sıkışmasının kontrolünde, şantiyede dizayna göre hazırlanacak olan İşyeri Karışım Formülü (İKF) değerleri kullanılacaktır. İKF'nin KTŞ Kısım 408'de verilen dizayn kriterlerine uyup uymadığı dikkatle kontrol edilmeli, gerekirse düzeltme yapılmalıdır.

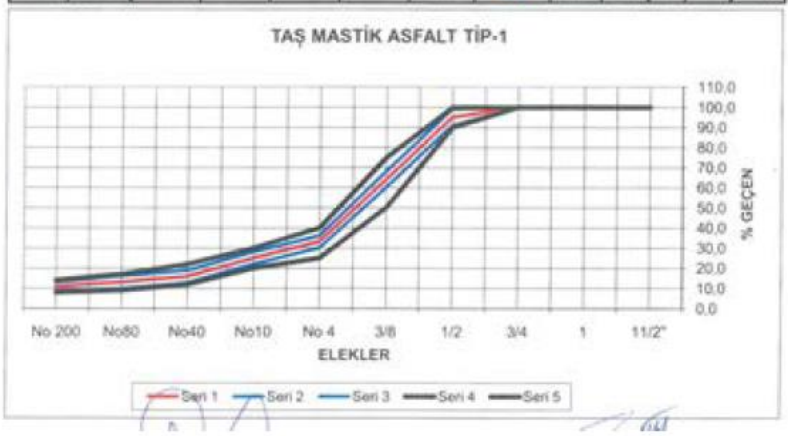
KARAYOLLARI 17. BÖLGE MÜDÜRLÜĞÜ
Araştırma Başmühendisliği

KINALI-AVCILAR ARASI TEM OTOYOLUNDA EKSİK KALAN ÜSTYAPI İYİLEŞTİRMESİ VE BÜYÜK ONARIM İNŞAATI İŞİ TMA TİP-1 TABAKASI DİZAYNI

Tarih : 20.07.2011

Müteahhit : İNTEL Yapı Tur. Elek. İnş. San. ve Tic. Ltd. Şti.
Ocak Adı : Cebeci Su-Taş Taş Ocağı (Kum Taşı)
Lab.No. : 20

Elek Açıklığı		Karışım oranları						Toleranslı karışım limitleri		TMA Tip 1 Şartname Limitleri		ort.
		0	11	57	24	8	100					
inç	mm.		3/4"-1/2"	1/2"-No4	No4-0	Filler	Karışım					
11/2"	37,5	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100	100	100,00
1	25,4	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100	100	100,00
3/4	19	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100	100	100,00
1/2	12,5	100,0	53,7	100,0	100,0	100,0	94,9	90,9	98,9	90	100	95,00
3/8	9,5	100,0	5,0	55,0	100,0	100,0	63,9	59,9	67,9	50	75	62,50
No 4	4,75	100,0	0,9	2,1	98,9	100,0	33,0	30,0	36,0	25	40	32,50
No10	2,00	100,0	0,0	0,9	68,2	100,0	24,9	21,9	27,9	20	30	25,00
No40	0,425	100,0	0,0	0,0	32,5	100,0	15,8	12,8	18,8	12	22	17,00
No80	0,18	100,0	0,0	0,0	20,6	100,0	12,9	9,9	15,9	9	17	13,00
No 200	0,075	100,0	0,0	0,0	12,3	98,0	10,8	8,8	12,8	8	14	11,00



KARAYOLLARI GENEL MÜDÜRLÜĞÜ
17.BÖLGE MÜDÜRLÜĞÜ
Araştırma Başmühendisliği

KINALI-AVCILAR ARASI TEM OTOYOLUNDA EKSİK KALAN ÜSTYAPI İYİLEŞTİRMESİ VE BÜYÜK ONARIM İNŞAATI İŞİ TMA TİP-1 TABAKASI DİZAYNI

Tarih : 20.07.2011

Bitüm Penetrasyonu (Mod.Bit.)	: B-35	Kaba Agreganın Hacim Özgül Ağırlığı,Gk-h	2,705	Gef-deney :	2,688
Bitüm Özgül Ağırlığı,Gb	: 1,019	Kaba Agreganın Zahiri Özgül Ağırlığı,Gk-z	2,745	Gef-hesap :	2,731
Agreganın Bitüm Absorpsiyonu Pba	: 0,31	İnce Agreganın Hacim Özgül Ağırlığı,Gi-h	2,683	Karışım. Mıcır :	1200 gr
Agreganın Effektif Özg. Ağırlığı,Gef	: 2,731	İnce Agreganın Zahiri Özgül Ağırlığı,Gi-z	2,767	Darbe Sayısı :	50
Agreganın Hacim Özg. Ağırlığı,Gsb	: 2,708	Fillerin Zahiri Özgül Ağırlığı,Gf-z	2,778	%Va=Agrega Hacim %'si	82,61
Agreganın Zahiri Özg. Ağırlığı,Gsa	: 2,753			%Vb=Bitüm Hacim %'si	14,38
Lab: 20				%Vh=Hava Hacim %'si	3,01

Müteahhit : İNTEL Yapı Tur. Elek. İnş. San. ve Tic. Ltd. Şti.
Ocak Adı : Cebeci Su-Taş Taş Ocağı (Kum Taşı)

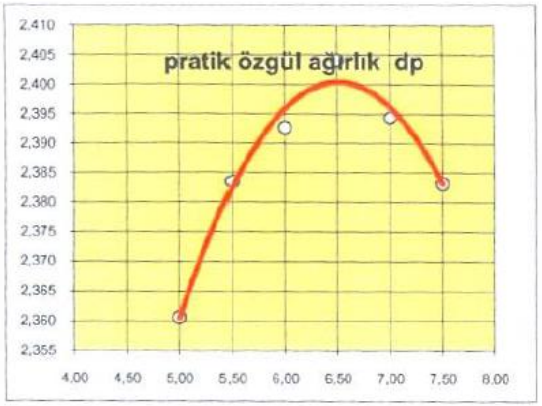
No	BİTÜM		Sıcaklık	YÜKSEKLİKLER,mm				Havada Ağırlık,g	Sudaki Ağırlık,g	Doy.Yüz. Ağırlık,g	Hacim cm³	Hacim Özg.Ağırl	Maks.Teo. Özgül Ağ	% Boşluk	%	Asf.Dol Boşluk	Akma	Stabilite	Düzltm. Faktörü	Düzeltm Stabilite
	Wa,%	g	°C	1	2	3	ortlm	A	C	B	V	Dp	Dt	Vh	V.M.A	Vf	mm	kg		kg
1	5,00	60,0	140	68,6	68,5	68,3	68,5	1246,9	728,3	1254,4	526,1	2,370					2,62	855	0,886	757
2	5,00	60,0	140	69,4	69,6	69,4	69,5	1251,2	730,2	1260,5	530,3	2,360					2,41	845	0,854	721
3	5,00	60,0	140	69,3	69,4	69,4	69,4	1239,6	721,2	1248,2	527,0	2,352					2,49	825	0,857	707
												2,361	2,528	6,64	16,97	60,9	2,51			729
4	5,50	66,0	140	67,6	67,5	67,4	67,5	1259,9	738,7	1266,8	528,1	2,386					2,88	930	0,911	847
5	5,50	66,0	140	68,0	67,8	68,4	68,1	1254,4	736,1	1262,4	526,3	2,383					2,86	935	0,897	838
6	5,50	66,0	140	67,6	68,1	68,1	67,9	1257,9	737,1	1265,3	528,3	2,381					2,83	925	0,900	833
												2,383	2,511	5,08	16,57	69,4	2,86			839
7	6,00	72,0	140	66,8	67,1	67,8	67,2	1256,7	737,2	1262,1	524,9	2,394					2,95	980	0,917	898
8	6,00	72,0	140	68,2	68,8	68,1	68,4	1260,9	740,0	1266,9	526,9	2,393					2,98	975	0,889	866
9	6,00	72,0	140	67,6	68,3	67,9	67,9	1265,5	742,6	1271,9	529,3	2,391					3,05	990	0,900	891
												2,393	2,494	4,05	16,64	75,7	2,99			885
10	6,50	78,0	140	67,6	67,6	67,6	67,6	1275,7	746,0	1277,3	531,3	2,401					3,25	1034	0,908	939
11	6,50	78,0	140	67,9	68,4	67,8	68,0	1281,3	750,0	1282,5	532,5	2,406					3,26	1014	0,898	910
12	6,50	78,0	140	67,1	67,6	67,2	67,3	1266,3	741,0	1267,6	526,5	2,405					3,15	1020	0,915	934
												2,404	2,477	2,94	16,64	82,3	3,22			928
13	7,00	84,0	140	67,3	67,8	67,6	67,6	1272,5	744,0	1275,2	531,2	2,395					3,85	872	0,909	793
14	7,00	84,0	140	67,9	67,6	67,4	67,6	1267,2	742,1	1271,1	529,0	2,396					3,87	940	0,907	853
15	7,00	84,0	140	66,2	66,2	66,4	66,3	1269,2	741,9	1272,4	530,5	2,392					3,90	832	0,938	780
												2,394	2,460	2,68	17,36	84,6	3,87			809
16	7,50	90,0	140	66,1	66,1	66,2	66,1	1273,9	740,5	1274,7	534,2	2,385					4,25	750	0,940	705
17	7,50	90,0	140	66,3	66,4	66,2	66,3	1270,6	739,2	1272,1	532,9	2,384					4,30	825	0,937	773
18	7,50	90,0	140	66,3	66,2	66,3	66,3	1271,4	739,2	1273,2	534,0	2,381					4,32	785	0,938	736
												2,383	2,444	2,50	18,13	86,2	4,29			738
																		Fill/Bit		
6,50	OPTİMUM BİTÜM SONUÇLARI (Hesapla Geff hesapla)											2,402	2,477	3,01	16,7	82,0	3,04	2,46		893,99
	TMA DİZAYN KRİTERLERİ													(2-4)	min16	-	(2-4)	-		min750

V=B-C
Dp=A/V Dt=(100+Wa)/(100/Geff+Wa/Gb)
Vh=(Dt-Dp)×100/Dt
Gsb=100/(%K/Gk-h+%İ/Gi-h+%F/Gf-z)
Gsa=100/(%K/Gk-z+%İ/Gi-z+%F/Gf-z)
VMA=100-(Dp×(100-Wa/(1+Wa/100))/Gsb)
Vf=(VMA-Vh)×100/VMA
Pb=100×Gb×(Gef-Gsb)/(Gef×Gsb)

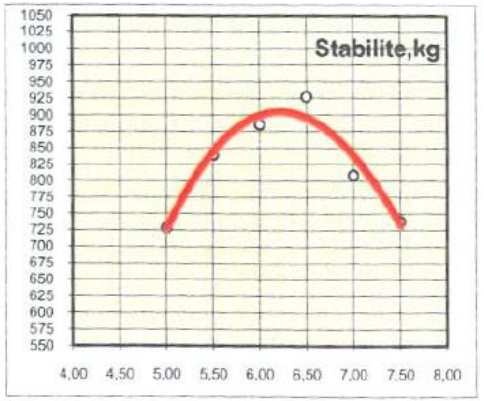
1½"	100,0
1"	100,0
3/4"	100,0
1/2"	91,6
3/8"	71,8
No.4	32,0
No.10	22,5
No.40	15,8
No.80	13,5
No.200	11,1

Kaba %'si= 68,0
İnce %'si= 20,9
Filler %'si= 11,1

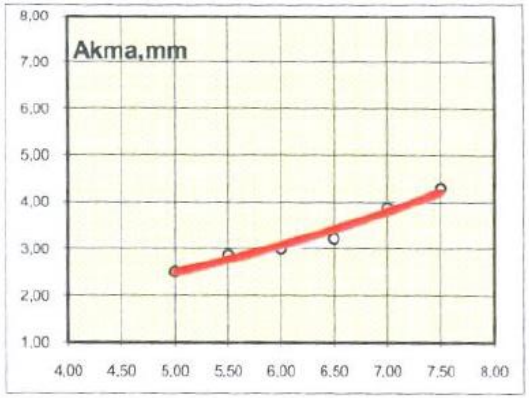
KINALI-AVCILAR ARASI TEM OTOYOLUNDA EKSIK KALAN USTYAPI IYILEŞTIRMESI VE BUYUK ONARIM İNŞAATI İŞİ TMA TİP-1 TABAKASI DİZAYNI



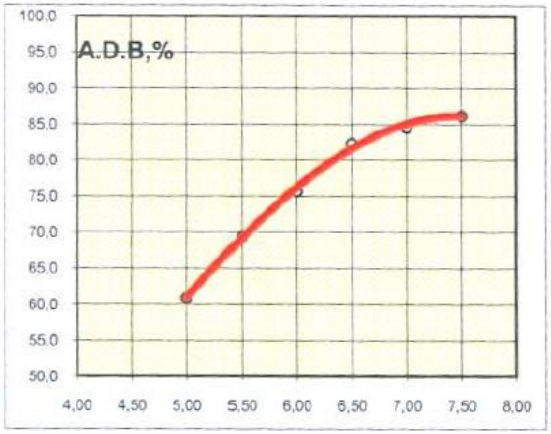
y =-0,0175x2 + 0,2283x + 1,6577
x= 6,5



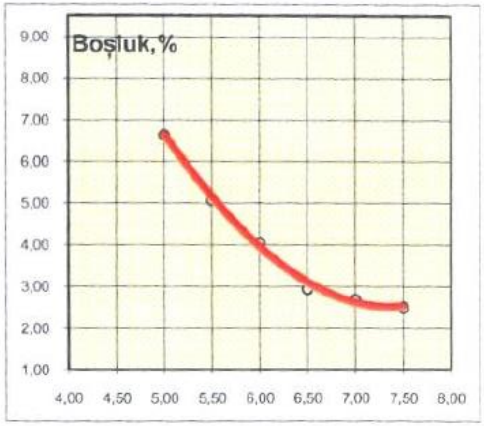
y = 6,8729x3 - 240,68x2 + 2194,3x - 5087,7
x= 6,5



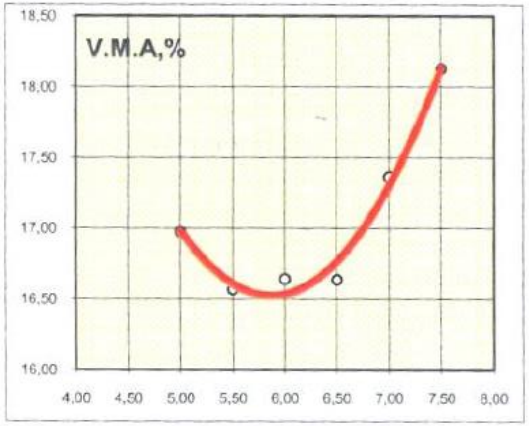
y = 0,8714e0,2099x
x= 6,5



y = -0,4748x3 + 5,2985x2 + 0,2246x - 13,328



y = 0,0381x3 - 0,0005x2 - 6,1599x + 32,683



y = 0,6054x2 - 7,1018x + 37,35

Cebeci-Kumtaşlı TMA'ya ait Performans Deney Raporları

T.C.
ULAŞTIRMA BAKANLIĞI
Karayolları Genel Müdürlüğü 1.(İstanbul) Bölge Müdürlüğü

K-Q TSE-ISO-EN 9001

Sayı : B.11.1.TCK.1.01.07.00/ 350-04 - 26821 05/ 10/ 2011
Konu : Polimer Modifiye Bitüm Deneyleri

İŞLETMELER BAŞMÜHENDİSLİĞİNE

İlgi: 19.09.2011 gün ve B.11.1.TCK.1.1.11.12-403-99/100 sayılı Otoyolu Yapım Kontrol Şefliği yazısı.

Müteahhit İNTEL Yapı Turizm Elek. İnş. San. ve Tic. Ltd. Şti.'nin taahhüdünde bulunan "Kınalı-Avcılar Arası TEM Otoyolunda Eksik Kalan Üstyapı ve Büyük Onarım İnşaatı" işi kapsamında, Taş Mastik Asfalt dizaynında kullanılmak üzere hazırlanan %4.0, %4.5 ve %5.0 Globalprene 3501 SBS katkılı polimer modifiye bitüm numunelerine yapılan deneylere ait sonuçları içeren Araştırma Raporu ekte gönderilmektedir.

Bilgilerini rica ederim.

Karayolları Genel Müdürlüğü
1. Bölge Müdürlüğü
Araştırma ve Geliştirme Başmühendisliği
34408 Kağıthane / İSTANBUL

BOLARŞ-BK
.../.../BK/077/1
03.10.2011

Sayfa 1/3
Page 1 of 3

Deney Raporu
Test Report

Müşterinin adı/adresi Customer name/address	İşletmeler Başmühendisliği Otoyolu Yapım Kontrol Şefliği
İşin adı Project name	Kınalı-Avcılar Arası TEM Otoyolunda Eksik Kalan Üstyapı ve Büyük Onarım İnşaatı
Yüklenici Contractor	İNTEL Yapı Turizm Elek. İnş. San. ve Tic. Ltd. Şti.
İstek numarası Order no.	19.09.2011 gün ve B.11.1.TCK.1.1.11.12-403-99/100 sayılı Otoyolu Yapım Kontrol Şefliği yazısı.
Numunenin adı ve tarifi Name and identity of test item	%4.0 katkılı polimer modifiye bitüm numunesi (1 adet) %4.5 katkılı polimer modifiye bitüm numunesi (1 adet) %5.0 katkılı polimer modifiye bitüm numunesi (1 adet)
Numunenin kabul tarihi The date of receipt of test item	20.09.2011
Açıklamalar Remarks	...
Deneyin yapıldığı lab. Name of the testing lab	Bitüm Laboratuvarı
Deneyin yapıldığı tarih Date of Test	
Raporun sayfa sayısı Number of pages of the report	3

Karayolları Genel Müdürlüğü
1. Bölge Müdürlüğü
Araştırma ve Geliştirme Başmühendisliği
34408 Kağıthane / İSTANBUL

BOLARŞ-BK
-/-
/BK/677/1
03.10.2011

Deney Raporu
Test Report

Laboratuvar No.	677
Proje Adı	Kınalı-Avcılar Arası TEM Otoyolunda Eksik Kalan Üstyapı ve Büyük Onarım İnşaatı
Numunenin Cinsi	%4.0, %4.5 ve %5.0 Katkılı Modifiye Bitüm Numuneleri

Sıra No	DENEY ADI		STANDARDI	BİRİM	%4.0	%4.5	%5.0	PMB 70-16
1	PENETRASYON (25°C, 100g, 5 sn.)		TS EN 1426	0,1mm	39	38,8	40,8	30-70
2	YUMUŞAMA NOKTASI	min.	TS EN 1427	°C	57,7	62,1	68,3	62
3	KUVVET ÖLÇÜMLÜ DÖKTİLİTE* (25°C, 5cm/dk)	min.	TS EN 13587	J	100+	100+	100+	0,5
4	ELASTİK GERİ DÖNME (25°C)	min.	TS EN 13398	%	68	75,3	94	60
5	PARLAMA NOKTASI	min.	TS EN ISO 2592	°C	315	310	310	220
6	ÖZGÜL AĞIRLIK		TS EN 15326	g/cm³	1,027	1,025	1,025	1,0-1,1
7	DEPOLAMA STABİLİTESİ*		TS EN 13399					
7.1	YUMUŞAMA NOKTASI FARKI	maks.		°C	1,7	1,5	10,8	5
7.2	PENETRASYON FARKI	maks.		0,1mm	1,2	1,7	3,2	12
8	DİNAMİK KESME REOMETRESİ (DSR) ($G^*/\sin\delta$ > 1kPa)	Yenilme Sıcaklığı min.	TS EN 14770 AASHTO T315	°C	72,5	74,3	98,2	70
9	DÖNMELİ İNCE FİLM ETÜVÜ DENEYİ*		TS EN 12607-1					
9.1	KÜTLE KAYBI			%	0,05	0,0	0,0	1,0
9.2	YUMUŞAMA NOKTASI	min.	TS EN 1427	°C	61,6	62,1	61,6	60
9.3	Yumuşama Noktasındaki Değişiklik							
	artma	maks.		°C	3,9	0,0	-	8
	azalma	maks.		°C	-	0,0	6,7	5
9.4	KALICI PENETRASYON	min.	TS EN 1426	%	78,7	92,5	85,5	50
9.5	DİNAMİK KESME REOMETRESİ (DSR) ($G^*/\sin\delta$ > 2,2 kPa)	Yenilme Sıcaklığı min.	TS EN 14770 AASHTO T315	°C	70,5	70,6	70,2	70
10	RTFOT+PAV ile Yaşlandırılmış Mod. Bitüme Yapılan Deneyler		TS EN 14769 AASHTO R28					
10.1	DSR ($G^*/\sin\delta$ < 5000 kPa)	Yenilme Sıcaklığı maks.	TS EN 14770 AASHTO T315	°C	25,8	21,0	21,5	31
10.2	KİRİŞ EĞME REOMETRESİ (BBR) Eğilme-Sünme Sertliği (S<300 MPa, m>0,300)	Sıcaklık min.	TS EN 14771 AASHTO T313 ASTM D6648	°C	-6	-6	-6	-6

Karayolları Genel Müdürlüğü
1. Bölge Müdürlüğü
Araştırma ve Geliştirme Başmühendisliği
34408 Kağıthane / İSTANBUL

BOLARŞ-B
-/-
/BK/677/1
03.10.2011

Deney Raporu
Test Report

Müteahhit İNTEL Yapı Turizm Elek. İnş. San. ve Tic. Ltd. Şti.'nin taahhüdünde bulunan "Kınalı-Avcılar Arası TEM Otoyolunda Eksik Kalan Üstyapı ve Büyük Onarım İnşaatı" işi kapsamında, Taş Mastik Asfalt dizaynında kullanılmak üzere hazırlanan %4.0, %4.5 ve %5.0 Globalprene 3501 SBS katkılı polimer modifiye bitüm numuneleri laboratuvarımıza test edilmek üzere getirilmiştir.

Karayolları Genel Müdürlüğü
Araştırma ve Geliştirme Dairesi Başkanlığı
İnönü Bulvarı 06100 Yücetepe / ANKARA

Deney Raporu
Test Report

ARGE-ŞŞ(YAP)
-86
-63 2180 86
12/13

Raporun Tarihi : 02.12.2011
Yazanın Adı Soyadı : M. Neşe DEMİRCAN
Gönderildiği Yer : Ky.1.Bölge Müdürlüğü
Konusu : Tekerlek İzinde Oturma ve İÇM Deneyleri
Lab No : 105

İlgi: Ky.1.Bölge Müdürlüğü'nün 16.11.2011 B111ICK1010700/350-35527 sayılı yazısı.

İlgi yazı ile; yapım çalışmaları İntel Yapı Tur. Elk. İnş. San. ve Tic. Ltd.Şti'nin yüklenimnde devam eden " Kınalı –Aversa TEM Otoyolunda eksik kalan üstyapı ve büyük onarım işi" kapsamında kullanılması düşünülen TMA-Tip1 numunesi laboratuarımıza getirilerek deneylerinin yapılması istenmiştir.

Numuneler üzerinde istenileri deneyler yapılarak sonuçları ekteki tablolarda verilmiştir.

Yapılan deneylerin sonuçlarına göre; ekstraksiyon sonucu yapılan elek analizinde 3/8"'len geçen malzeme miktarı %74 olup, dizayn değerlerine göre tolerans limitlerinin dışında olduğu görülmüştür.

İÇM (Sıkıştırılmış bitümlü karışımların sudan kaynaklanan bozulmalara karşı direnci) onarının şartname değeri olan min. %80 şartını sağladığı görülmüştür.

Tekerlek izinde oturma (TIO) değerinin KTŞ maksimum limit değerinin altında (30000 devirde T.İO. %:1,45) olduğu görülmüştür.

Karayolları Genel Müdürlüğü
Araştırma ve Geliştirme Dairesi Başkanlığı
İnönü Bulvarı 06100 Yücetepe / ANKARA

Deney Raporu
Test Report

ARGE-DSTD-08
ISO 2389 E
12/31

Dizayn Değerleri	Elek Açıklığı	¾	½	3/8	No:4	No:10	No:40	No:80	No:200
	% Geçen	100	94,9	63,9	33,0	25,0	15,8	12,9	10,8
	Opt. Bitüm	% 6,50							
	Elyaf (%)	%0,35							
	Hacim Öz. Ağr.	2,402							
	Boşluk (%)	3,01							
Ekstr.	Elek Açıklığı	¾	½	3/8	No:4	No:10	No:40	No:80	No:200
	% Geçen	100	94,4	74,0	34,2	23,0	14,0	12,8	10,2
	Bitüm	% 6,60							
TİO	% Sıkışma	96,5							KTŞ Kısım 408 Şartname Değeri
	Dp	2,319							
	Geçiş Sayısı 1000	0,46							
	Geçiş Sayısı 3000	1,04							
	Geçiş Sayısı 5000	1,20							
	Geçiş Sayısı 10000	1,32							
	Geçiş Sayısı 30000	1,45							Maks. 6
	Geçiş Sayısı 50000	1,66							

DENEY ADI	*DENEY SONUCU*	DENEY STANDARDI
Koşullu İÇM (kg/cm²)	9,20	AASHTO T-283
Koşulsuz İÇM (kg/cm²)	10,50	
Çekme Mukavemeti Oranı, %	87,6	Min. 80

