

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**





KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce

Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : / /

Tezin Savunma Tarihi : / /

Tez Danışmanı :

Trabzon

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında
Amadou Oury DIALLO Tarafından Hazırlanan**

**BETON YOL ÜSTÜ ASFALT KAPLAMALARIN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE
MEKANİSTİK ANALİZİ**

**başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 14 / 05 / 2019 gün ve 1804 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak kabul edilmiştir.**

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Şükrü YETGİN

Üye : Prof. Dr. Muhammet Vefa AKPINAR

Üye : Doç. Dr. Erol ŞADOĞLU



**Prof. Dr. Asim KADIOĞLU
Enstitü Müdürü**

ÖNSÖZ

Bu çalışma, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek lisans Tezi olarak hazırlanmıştır.

Öncelikle ve en önemlisi, bu fırsatıyla, bana Türkiye'de eğitime devam etmeye fırsat veren ve Türkiye'nin en iyi üniversitelerinden birine yerleştiren "Türkiye bursları" na en içten teşekkür ederim.

"Beton Yol Üstü Asfalt Kaplamaların Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Mekanistik Analizi" isimli tezi bana öneren, her aşamasında sürekli destekleyen ve benden yardımını esirgemeyen danışmanım Prof. Dr. Muhammet Vefa AKPINAR'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Teşekkürlerim, yüksek lisans eğitim ve araştırmalarım boyunca bana yardımcı olan tüm insanlara da iletilir. Ayrıca, beni iltifat dolu sözlerle teşvik eden ve bana motivasyon veren tüm arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Son olarak, eğitimim boyunca beni teşvik eden ve bana dua eden Gine'deki aileme teşekkür ederim.

Bu tezi yürekten Kız Kardeşlerime armağan ediyorum.

Amadou Oury DIALLO

Trabzon, 2019

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Beton Yol Üstü Asfalt Kaplamaların Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Mekanistik Analizi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Muhammet Vefa AKPINAR ‘ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim 11/06/2019.

Amadou Oury DIALLO

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XII
KISALTMALAR DİZİSİ.....	XIII
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Genel Bilgi ve Problemin Tanıtımı	1
1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	4
1.3. Varsayımlar ve Sınırlamalar	4
2. LİTERATÜR TARAMASI	5
2.1. Yol Kaplamaların İyileştirme Yöntemleri	5
2.1.2. Asfalt Kaplama ile Beton Yol Rehabilitasyonu	8
2.1.3. Asfalt Kaplama Uygulaması Öncesi Yapılan Tamir	8
2.1.4. Asfalt Kaplamanın Uygulaması	12
2.1.5. Beton Üstü Asfalt Kaplamalarda Yansıma Çatlakları	14
2.1.6. Yansıma Çatlaklarına Sebep Olan Parametreler	15
2.1.7. Yansıma Çatlakların Önleme/Azaltma Teknikleri.....	18
2.1.7.1. Mevcut Beton Plakaların Kırılması Tekniği	18
2.1.7.2. Derz Kesimi Ve Derz Dolgusu “Sawing-and-sealing”.....	20
2.1.7.3. Geosentetikler	21
2.1.7.4. Asfalt Kaplamanın Kalınlığını Artırılması	22

2.2.	Yol Kaplama Mekanistik Analizi.....	23
2.2.1.	Katmanlı Elastisite Analizi (Layered Elastic Analysis, LEA).....	23
2.2.2.	Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM).....	24
2.2.3.	Literatürde Mekanistik Analizi Çalışmaları.....	25
3.	YÖNTEM.....	28
3.1.	Sonlu Elemanlar Modellemesi.....	28
3.1.2.	Geometrik Model.....	30
3.1.1.	Eleman Tipi ve Malzeme Özellikleri.....	31
3.1.2.	Sonlu Elemanlara Ayırma (Meshing).....	32
3.1.3.	Tabakaların Ara Yüz Temaslarının Modellenmesi.....	33
3.1.4.	Mesnetleme ve Yükleme.....	33
4.	BULGULAR VE TARTIŞMA.....	36
4.1.	Kritik Dingil Yükün Konumu.....	38
4.2.	Asfalt Kaplama Kalınlığının ve Modülünün Etkisi.....	40
4.3.	Asfalt ve Beton Tabakaların Arasındaki Bağın Etkisi.....	42
4.4.	Beton Plaka Modülünün Etkisi.....	44
4.5.	Beton Plakaların Derz Boyutunun Etkisi.....	47
4.6.	Beton Plaka Arası Kayma Donatılarının Kullanımının Etkisi.....	48
4.7.	Parametrelerin Gerilmelere Etki Seviyelerinin Karşılaştırılması.....	50
5.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	55
5.1.	Sonuçlar.....	55
5.2.	Öneriler:.....	57
6.	KAYNAKLAR.....	58
7.	EKLER.....	62

ÖZGEÇMİŞ

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

BETON YOL ÜSTÜ ASFALT KAPLAMALARIN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE MEKANİSTİK ANALİZİ

Amadou Oury DIALLO

Karadeniz Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof.Dr. Muhammet Vefa AKPINAR

2019, 61 Sayfa, 9 Sayfa Ek

Beton üstü asfalt kaplama, gerilmelere bağlı olarak bozulmuş Portland çimentolu beton (PCC) yolların rehabilitasyonu için en yaygın yöntemdir. Bununla birlikte, asfalt kaplamanın performansı, asfalt kaplamanın altındaki derz bölgesinde oluşan aşırı gerilmeler ve şekil değiştirmelerden kaynaklanan yansıma çatlakların oluşması nedeniyle kısmen sınırlandırılmış olmaktadır. Bu çalışma, trafik yükleri altındaki beton üstü asfalt kaplamaların mekanistik davranışlarını incelemek için mevcut beton üstü asfalt yol kaplaması geliştirilen üç boyutlu sonlu elemanlar (FE) modeli kullanılarak analiz edilmiştir. Analizlerde değişken parametreler olarak, asfalt kalınlığı, asfalt elastisite modülü, asfalt / beton ara yüzü teması, PCC elastisite modülü, derz boyutu ve kayma donatı göz önünde bulunduruldu. Analizlerde asfalt kaplamanın altındaki maksimum çekme gerilme ve şekil değiştirme tepkimeleri incelendi.

Çalışmanın sonuçları, çalışılan parametrelerdeki değişimlerin, asfalt kaplamada çekme gerilmeler ve şekil değiştirmelerde önemli değişikliklere yol açtığını göstermiştir. Kaplamanın altındaki yatay doğrultudaki çekme gerilmeler ve şekil değiştirmeler, sırasıyla 22 KPa ve 1683 KPa ve $25 \cdot 10^{-6}$ ve $460 \cdot 10^{-6}$ arasında değiştiği tespit edilmiştir. Asfalt kaplamada çekme gerilme ve şekil değiştirme en fazla etkileyen parametrelerin sırasıyla asfalt kalınlığı, asfalt / beton ara yüz temas durumu, kayma donatıların kullanımı ve asfalt modülü olarak tespit edilmiştir. Asfalt kaplama altındaki çekme gerilme ve şekil değiştirme beton yol üzerindeki asfalt kaplamalarda yansıma çatlakların oluşumunu öngörmede uygulanabilir bir yöntem olduğu görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Asfalt Kaplama, Çimentolu Beton Kaplama, Yansıma Çatlak, Sonlu Eleman Yöntemi, Gerilme, Şekil Değiştirme.

Master Thesis

SUMMARY

MECHANISTIC ANALYSIS OF ASPHALT OVERLAY OVER PORTLAND CEMENT CONCRETE PAVEMENT USING FINITE ELEMENT METHOD

Amadou Oury DIALLO

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Muhammet Vefa AKPINAR
2019, 61 Pages, 9 Pages Appendix

Asphalt concrete (AC) overlay is the most common method for rehabilitating distressed Portland cement concrete (PCC) pavements. However, the occurrence of reflective cracking caused by excessive stresses and strains concentration at the bottom of the overlay at the vicinity of the joints or cracks affects negatively the performance of the asphalt overlay. This study focused on the development of a three-dimensional finite element (FE) model of an AC overlaid on an existing PCC pavement in order to assess the mechanistic behavior of the pavement under traffic load. The analysis considered different AC thickness, AC modulus, AC/PCC interface contact, PCC modulus, joint width, and the use of dowel bars. The investigated pavement responses were the maximal tensile stress and strain at the bottom of the asphalt overlay.

The results of the study showed that the changes in the pavement parameters result in a large range of variation in the magnitude of the pavement responses. The magnitude of the longitudinal tensile stress and strain at the bottom of the overlay varied between 22 KPa and 1683 KPa and between 25 microstrains and 460 microstrains, respectively. The parameters that influenced the most the pavement responses were the AC thickness, the AC/PCC interface contact condition, the use of dowel bars and the AC modulus. The stress was more sensitive to the changes in the pavement parameters. The analysis of the tensile stress and strain at the bottom of the overlay was found to be a viable method to predict the occurrence of reflective cracking in AC overlay over PCC pavement.

Keywords: Asphalt Overlay, Portland Cement Concrete Pavement, Reflective Cracking, Finite Element Method, Stress, Strain.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 2. 1. Beton üstü asfalt kaplama (Kentucky, USA).	8
Şekil 2. 2. Asfalt kaplama uygulaması öncesi yapılan tamirler (Khazanovich vd., 2013). ...	9
Şekil 2. 3. Yol kenar drenaj sistemi (Smith ve Hoerner, 2008).....	10
Şekil 2. 4. Kayma donatı fonksyonu ve yerleştirmesi (ACPA, 2006).....	11
Şekil 2. 5. Kayma çubukların yerleşim prosedürü (Perkins vd., 2009).	12
Şekil 2. 6. “Tack-coat” uygulaması (Tom Kuenmen,2016).....	13
Şekil 2. 7. Beton plakaların “Rubblization” sonrası sıkıştırılması (Ceylan, 2005).	19
Şekil 2. 8. “Saw and seal” uygulanmış olan Almanya’da bir beton üstü asfalt kaplama ...	20
Şekil 2. 9. Geosentetik arazi uygulaması (Al-qadi vd., 2008).	22
Şekil 3. 1. ANSYS APDL ara yüzü.	29
Şekil 3. 2. Sonlu elemanlar analizi akış diyagramı.....	30
Şekil 3. 3. Kaplama modeli.....	31
Şekil 3. 4. Model “mesh”i.....	32
Şekil 3. 5. Kaplama yüzeyine uygulanan basınç (Lytton vd., 2010).	34
Şekil 3. 6. Dingil yükü ve tekerlek boyutları.	35
Şekil 3. 7. Dingil yükü pozisyonları.	35
Şekil 4. 1. Asfalt tabakanın altında boyuna yatay gerilme kontur diyagramı.	37
Şekil 4. 2. Asfalt tabakanın altında boyuna şekil değiştirme kontur diyagramı.	37
Şekil 4. 3. Asfalt tabakanın altında şekil değiştirme-dingil yükü pozisyonu ilişkisi.....	39
Şekil 4. 4. Asfalt tabakanın altında çekme gerilme - dingil yükü pozisyonu ilişkisi.	39
Şekil 4. 5. Farklı asfalt modülleri için, asfalt tabakanın altında boyuna şekil değiştirme- asfalt kalınlığı ilişkisi.....	41
Şekil 4. 6. Farklı asfalt modülleri için, asfalt tabakanın altında boyuna çekme gerilme - asfalt kalınlığı ilişkisi	41
Şekil 4. 7. 3500 MPa asfalt modülü ve farklı asfalt kalınlıkları için, asfalt tabakanın altında boyuna çekme gerilme - asfalt/beton ara yüz temas durumu ilişkisi.....	42

Şekil 4. 8. 10 cm asfalt Kalınlığı ve farklı asfalt modülleri için, asfalt tabakanın altında boyuna çekme gerilme - asfalt/beton arayüs temas durumu ilişkisi.....	43
Şekil 4. 9. 3500 MPa asfalt modülü ve farklı asfalt kalınlıkları için, asfalt tabakanın altında boyuna şekil değiştirme - asfalt/beton arayüs temas durumu ilişkisi....	43
Şekil 4. 10. 10 cm asfalt Kalınlığı ve farklı asfalt modülleri için, asfalt tabakanın altında boyuna şekil değiştirme - asfalt/beton arayüs temas durumu ilişkisi.	44
Şekil 4. 11. Yapışık asfalt/beton, farklı asfalt kalınlıkları için, asfalt tabakanın altında boyuna çekme gerilme - beton modülü ilişkisi.....	45
Şekil 4. 12. Yapışık olmayan asfalt/beton, farklı asfalt kalınlıkları için, asfalt tabakanın altında boyuna çekme gerilme - beton modülü ilişkisi.	45
Şekil 4. 13. Yapışık asfalt/beton, farklı asfalt kalınlıkları için, asfalt tabakanın altında boyuna şekil değiştirme - beton modülü ilişkisi.	46
Şekil 4. 14. Yapışık olmayan asfalt/beton, farklı asfalt kalınlıkları için, asfalt tabakanın altında boyuna şekil değiştirme - beton modülü ilişkisi.....	46
Şekil 4. 15. Farklı asfalt kalınlıkları için, asfalt tabakanın altında boyuna çekme gerilme-derz boyutu ilişkisi.	47
Şekil 4. 16. Farklı asfalt kalınlıkları için, asfalt tabakanın altında boyuna şekil değiştirme-derz boyutu ilişkisi.	48
Şekil 4. 17. Kayma donatılarının modeli.	49
Şekil 4. 18. Farklı asfalt kalınlıkları için, asfalt tabakanın altında boyuna çekme gerilme - kayma donatları ilişkisi.....	49
Şekil 4. 19. Farklı asfalt kalınlıkları için, asfalt tabakanın altında boyuna şekil değiştirme-kayma donatları ilişkisi.....	50
Ek. Şekil 7. 1. Yapışık asfalt/beton, 6cm asfalt, 3500 MPa asfalt modülü için, boyuna gerilme kontur diyagramı.	64
Ek. Şekil 7. 2. Yapışık olmayan asfalt/beton, 6cm asfalt, 3500 MPa asfalt modülü için, boyuna gerilme kontur diyagramı.	64
Ek. Şekil 7. 3. Yapışık asfalt/beton, 6cm asfalt, 3500 MPa asfalt modülü için, boyuna şekil değiştirme kontur diyagramı.....	65
Ek. Şekil 7. 4. Yapışık olmayan asfalt/beton, 6cm asfalt, 3500 MPa asfalt modülü için, boyuna şekil değiştirme kontur diyagramı.	65
Ek. Şekil 7. 5. Yapışık asfalt/beton, 10cm asfalt, 10000 MPa asfalt modülü için, asfalt tabakanın altında boyuna gerilme kontur diyagramı.	66
Ek. Şekil 7. 6. Yapışık olmayan asfalt/beton, 10cm asfalt, 10000 MPa asfalt modülü için, asfalt tabakanın altında boyuna gerilme kontur diyagramı.	66
Ek. Şekil 7. 7. Yapışık asfalt/beton, 10cm asfalt, 10000 MPa asfalt modülü için, asfalt tabakanın altında boyuna şekil değiştirme kontur diyagramı.....	67
Ek. Şekil 7. 8. Yapışık olmayan asfalt/beton, 10cm asfalt, 10000 MPa asfalt modülü için, asfalt tabakanın altında boyuna şekil değiştirme kontur diyagramı. ..	67

Ek. Şekil 7. 9. Dingil yükü derzden uzak uygulanmışken, yapışık asfalt/beton, 6cm asfalt 3500 MPa asfalt modülü için, asfalt tabakanın altında boyuna gerilme kontur diyagramı.	68
Ek. Şekil 7. 10. Dingil yükü derzden uzak uygulanmışken, yapışık asfalt/beton, 6cm asfalt3500 MPa asfalt modülü için, asfalt tabakanın altında boyuna şekil değiştirme kontur diyagramı.	68
Ek. Şekil 7. 11. Dingil yükü tam derzin üstüne uygulanmışken, yapışık asfalt/beton, 6 cm asfalt, 3500 MPa asfalt modülü için, asfalt tabakanın altında boyuna gerilme kontur diyagramı.	69
Ek. Şekil 7. 12. Dingil yükü tam derzin üstüne, yapışık asfalt/beton, 6cm asfalt, 3500MPa asfalt modülü için, asfalt tabakanın altında boyuna şekil değiştirme kontur diyagramı.	69
Ek. Şekil 7. 13. Kayma donatıları yerleşmişken yapışık asfalt/beton, 3 cm asfalt, 3500 MPa asfalt modülü için, asfalt tabakanın altında boyuna gerilme kontur diyagramı.	70
Ek. Şekil 7. 14. Kayma donatıları yerleşmişken yapışık asfalt/beton, 3 cm asfalt, 3500 MPa asfalt modülü için, asfalt tabakanın altında boyuna şekil değiştirme kontur diyagramı.	70

TABLolar DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 2. 1. Mevcut kaplamaları değerlendirme yöntemleri (M-E PDG, 2008).	6
Tablo 2. 2. Kaplamaların değerlendirme sonucu ve uygun onarım teknikleri.....	7
Tablo 2. 3. Kayma danatların boyutları (ACPA, 2006).....	11
Tablo 2. 4. "Tack coat" uygulama oranı (Mohammad vd., 2012).	13
Tablo 3. 1. Kaplamanın malzeme özellikleri.	32
Tablo 3. 2. Standart dingil yükleri (Lytton vd., 2010).	34
Tablo 4. 1. Kaplamanın parametrelerin girdi arakları.....	51
Tablo 4. 2. Gerilmelerin değişim oranları hesaplanması.....	52
Tablo 4. 3. Bu çalışma ile F. Zhou vd. (2009) 'nin çalışması Karşılaştırma.....	54

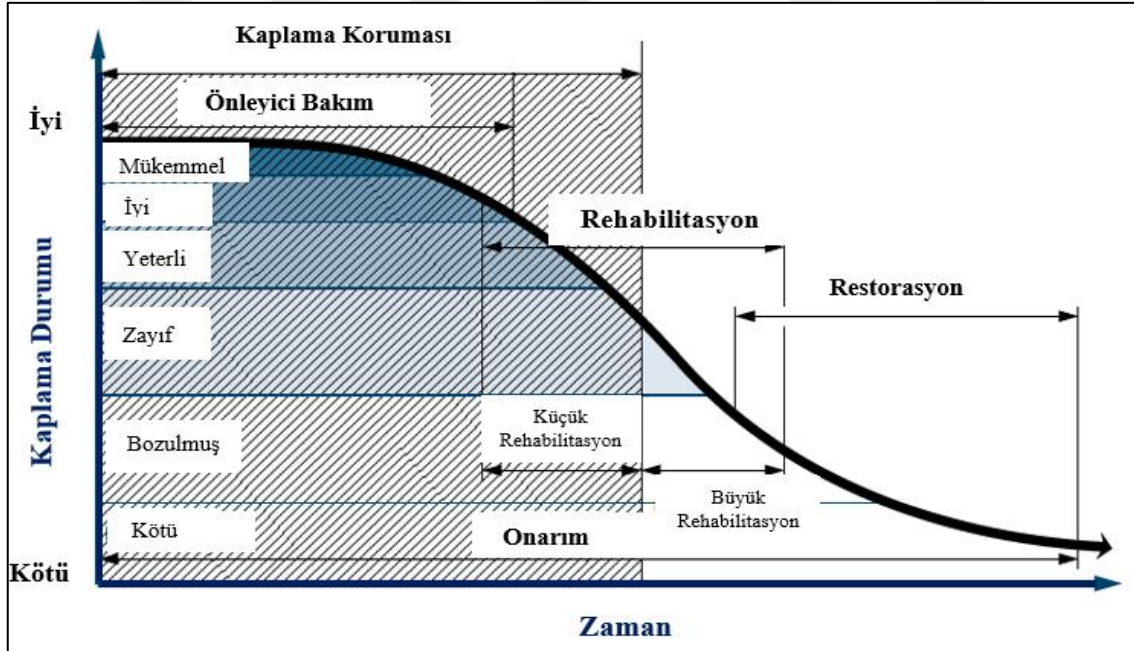
KISALTMALAR DİZİSİ

2B	2-Boyutlu
3B	3-Boyutlu
ACPA	Amerikan Beton Yollar Birliği
AI	Asphalt Institüsü
APT	Hızlandırılmış Test Yolu
DBR	Kayma Donatı Güçlendirme
FEM	Sonlu Elemanlar Yöntemi
HMA	Bitümlü Sıcak Karışımı
JPCP	Derzli Donatısız Beton Kaplama
JRCP	Derzli Donatılı Beton Kaplama
LEA	Katmanlı Elastik Analizi
LTE	Yük Aktarım Verimliliği
MEPDG	Mekanik-Ampirik Kaplama Tasarım Rehberi
PCC	Portland Çimentolu Beton

1. GİRİŞ

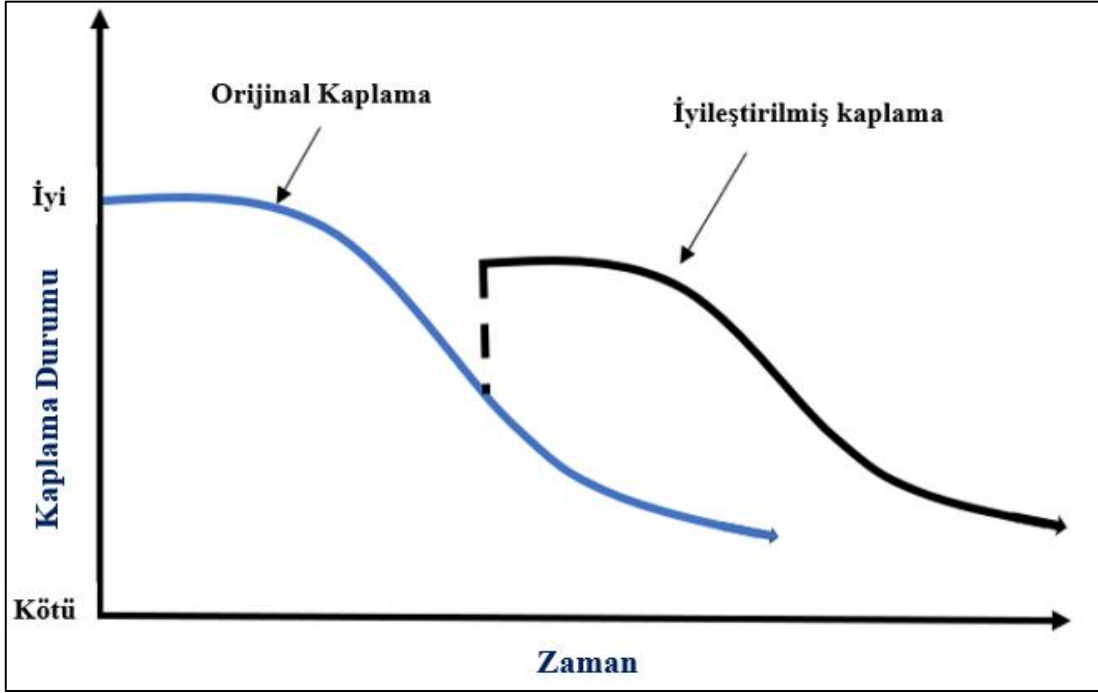
1.1. Genel Bilgi ve Problemin Tanıtımı

Bir ülkenin ekonomik ve sosyal faaliyetleri geliştirmek için, çok kaliteli ulaşım yapıları özellikle yollara ihtiyaç vardır. Bu nedenle karayolu kaplamalarını iyi bir durumda tutmak karayolları ve belediyelerin öncelikli konuları arasındadır. Son yıllarda yol malzemelerine olan talebin artmasından aynı zamanda temininde karşılaşılan problemlerden dolayı yeniden yol yapımı yerine mevcut yolların rehabilitasyonu daha doğru çözüm olarak karşımıza çıkmaktadır. Yolların sürdürülebilirliği açısından mevcut yolların düzenli bakımı, onarımı veya rehabilitasyonu yaygın olarak tercih edilmektedir. Beton yol kaplamalar, ılık asfalt, sathi kaplamalara göre daha uzun ömürlü olmakla birlikte, zamanla hava, çevresel etmenler ve artan trafik yüklerinden dolayı hizmet ömrünün sonuna ulaşmaktadır. Bu nedenle yeniden yapıma maliyeti daha pahalı olabileceğinden, mevcut beton kaplama bu seviyeye ulaşmadan önce rehabilitasyonun yapılması gerekmektedir.



Şekil 1.1. Yolun hizmet ömrü boyunca farklı aşamalarda uygun koruma çözümleri (ACPA, 2014).

Trafik hacmine ve mevcut kaplama bozulma seviyesine bağılı olarak hasarlı kaplama üzerine yeni bir tabaka sermek en yaygın yöntemdir. Mevcut beton yolları sürüş konforu iyileştirmek, hizmet ömrünü uzatmak, performansını artırmak, ve yapısal kapasitesini artırmak için beton kaplama üstüne asfalt tabaka sermek (asphalt overlay) en çok kullanılan yöntemdir (PCS / Law, 1991; Freeman, 2002; Huang, 2004).



Şekil 1. 2 Kaplamanın iyileştirilmesinin etkisi.

Asfalt kaplamanın altında bulunan beton plakaları; ısı, mekanik yükler, çevresel şartlar ve trafik yüklerinden kaynaklanan hareketler oluşmaktadır. Bu hareketler beton plakaların derzleri ve çatlakları olduğu yerlerde oluşmaktadır. Bu hareketlerden dolayı beton üstüne yerleştirilmiş asfalt kaplamanın altında aşırı gerilmeler oluşmaktadır. Aşırı gerilme birikiminden dolayı çatlaklar asfalt kaplamanın altında başlayıp tabakanın yüzeyine kadar yayılmaktadır (Lytton, 1989; Nunn, 1989; Zhou vd., 2010). “Yansıma çatlakları” şeklinde adlandırılan bu çatlaklar, beton üstüne serilmiş asfalt kaplamaları performansını, servis ömrünü ve sürüş kalitesini, bakım süresini zamanla olumsuz yönde etkiler (Francois vd., 1982). Bu nedenle son yıllarda karayolu kaplamaları üzerine çalışan araştırmacılarının önemli bir kısmı, asfalt ile iyileştirilmiş beton kaplamaların performansını etkileyen parametreleri deneysel ve mekanistik analizlerle araştırmaya yönelmişlerdir. Çalışmalar, asfalt kaplamasında trafik yüklerinden ve günlük sıcaklık değişimlerinden dolayı asfalt

kaplamanın altında aşırı çekme gerilmeleri oluştuğunu göstermiştir. Ayrıca araştırmacılar yansıma çatlakların oluşmasının bu gerilmelere bağlı olduğunu göstermişlerdir (Huang, 2004; Lytton,1989; Nunn, 1989). Yol kaplamaların yapısal özellikleri, malzeme özellikleri, tabakaların arasındaki bağ gibi parametrelerin gerilme davranışlarına etkisinin incelenmesi gereği duyulmuştur. Bunu gerçekleştirmek için laboratuvar çalışmalarını hızlandırılmış test yolu gibi mekanistik analizlerle beraber birçok araştırma yapılmıştır. Ancak halen daha asfalt tabaka ile iyileştirilmiş hasarlı beton kaplama ile ilgili literatürde büyük bir boşluk vardır. Bazı çalışmalar asfalt kaplama ve mevcut beton plakaları arasındaki ara yüz bağ koşullarına odaklanmıştır (Al-Qadi vd., 2009; Ozer vd., 2012). Birçok çalışma ise asfalt kaplamanın tasarımını, kalınlığını ve yansıma çatlaklarını minimize etmek için geosentetik gibi güçlendirme malzemelerin kullanımı üzerine odaklanmıştır (Amini, 2005; Fallah ve Khodaii, 2015; Shen vd., 2017; Sobhan ve Tandon, 2011). Beton plakaları arasındaki yük transfer özellikleri (LTE), mevcut betonun mukavemeti veya derzlerin boyutlarının beton üstü asfalt kaplamada oluşan gerilmeler üzerine etki seviyeleri yeterince çalışmamıştır. Önceki çalışmalar daha ziyade asfalt kaplama yapısına ve malzeme özelliklerinin yolun performansı üzerine olan etkilerini araştırmışlardır.



Şekil 1. 3 Beton üstü asfalt kaplamada yansıma çatlakları.

1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bu çalışmada, beton kaplama üstüne serilmiş asfalt kaplamanın performansı aşağıda verilen parametrelerin etkilerini içerecek şekilde mekanistik analizlerle (gerilme-şekil değiştirme) araştırılmıştır. Çalışmanın nihai amacı, asfalt kaplamada oluşan gerilmeler üzerinde bu parametrelerin etki seviyelerinin (hangisi daha etkili) bulmaktır.

- Asfalt kaplamanın elastisite modülü;
- Asfalt kaplamanın kalınlığı;
- Asfalt ve beton kaplamaların ara yüzü teması;
- Beton kaplamanın elastisite modülü;
- Beton plakaları arasında derzlerin boyutları;
- Kayma donatısı (Dowel bar) güçlendirilmesi;

Bu amaçla, bu çalışmada 3 boyutlu sonlu eleman ANSYS yazılım programından faydalanılmıştır. Trafik dingil yükü ile yüklenmiş bir beton üstü asfalt kaplamanın davranışı simüle etmek için 3 boyutlu sonlu elemanlar modeli geliştirilmiştir. Önceki çalışmalara dayanarak, dört tabakalı bir kompozit kaplama modellenmiştir: asfalt tabaka, beton tabaka, temel ve zemin tabaka.

1.3. Varsayımlar ve Sınırlamalar

- Tüm tabakaların malzemeleri lineer elastisite ve izotropik olarak kabul edilmiştir.
- Trafik yükü, bir statik standart dingil yükü ile simüle edilmiştir.
- Isı etkisi dikkate alınmamıştır.
- Mevcut yol tabakaların tamamen yapışık olduğu kabul edilmiştir.
- Asfalt tabakasının altındaki kritik çekme gerilmeleri ve şekil değiştirmeleri analiz edilmiştir.

2. LİTERATÜR TARAMASI

2.1. Yol Kaplamaların İyileştirme Yöntemleri

Zamanla trafik yüklerinden, çevresel şartlardan ve iklim koşullardan dolayı yol kaplamaları bozulmaktadır. Yolun hizmet ömrünün uzatmak, performansını arttırmak, ve yapısal kapasitesini arttırmak iyileştirme gerekmektedir. Rehabilitasyon gerekli olup olmadığına ve hangi onarım yöntemi uygun olacağına hakkında araştırma yapılmalıdır. Bu nedenle rehabilitasyon yapılmadan önce, mevcut kaplamanın durumu, performansı hakkında bir değerlendirme yapılması gerekmektedir. Bunlar, yapısal ve işlevsel (fonksiyonel) değerlendirme olarak adlandırılır. Yapısal değerlendirme kaplamanın yükleme taşıma kapasitesini incelenmektedir. İşlevsel değerlendirme ise, yolun sürüş konforu, yüzey sürtünmesi, gürültü ve geometri gibi parametreler incelenmektedir. Değerlendirme yaptıktan sonra, kaplama tipi ve durumuna göre en uygun iyileştirme yöntemin olacağına karar verilir (Khazanovich vd., 2013). Yeni bir tabaka eklenmesi en yaygın onarım yöntemi olarak kabul edilir (Yang, 2004). Bu tabaka bir ince beton tabaka ya da bir asfalt tabaka olabilir. Kaplama tipine karar verilmesi, mevcut beton yolu değerlendirilmesine bağlıdır. Genellikle yüksek oranda bozulmuş beton yolları iyileştirilmesi için bir beton kaplama eklenmesinin en uygun yöntemi olduğunu kabul edilir (Smith, 2001). Az hasar görmüş ve hala hizmet ömrüne ulaşmamış bir beton yolu iyileştirmek ise bir asfalt kaplama sermesi en uygun yöntemidir. Tablo 2.1'de kaplamaları değerlendirme prosedürü göstermektedir ve Tablo 2.2'de rehabilitasyon seçenekleri için öneriler sunulmaktadır.

Tablo 2. 1. Mevcut kaplamaları değerlendirme yöntemleri (M-E PDG, 2008).

	Faktör	Değerlendirme
Yapısal	Mevcut hasarlar	<ul style="list-style-type: none"> • Yorulma hasarlar eksikliği: az veya yok, orta, çok; • Yük taşıma kapasitesi yeteneği: var, yok; • Kaplama kalınlığı belirlenmesi; • Derz/çatlak faylanmanın belirlenmesi.
İşlevsel	Pürüzsüzlük	Ölçme: çok iyi, iyi, fena değil, kötü, çok kötü
	Pürüzsüzlük eksikliğin nedeni	Alt tabaka hareketi, yerel hasar veya bozulma, diğer;
	Gürültü	Ölçme: memnun edici, kabul edilebilir, memnun edici değil
	Sürtünme	Ölçme: memnun edici, kabul edilebilir, memnun edici değil
Drenaj	İklim (nem ve sıcaklık)	Yıl boyunca nem, mevsimsel nem, az nem, derin don penetrasyonu, donma-çözünme döngüleri
	Nem mevcudiyeti arz eden hasarlar	Var, olabilir, yok
	Düzy ve altı drenaj sistemi	Ölçme: memnun edici, kabul edilebilir, memnun edici değil
Malzeme durabilitesi	Durabilite mevcudiyeti ile ilişki düzey hasarlar	Az veya yok, orta, çok
	Temel tabakası erozyon	Az veya yok, orta, çok

Tablo 2. 2. Kaplamaların değerlendirme sonucu ve uygun onarım teknikleri (M-E PDG, 2008).

Genel Durum	Kaplamanın Genel Durum Değerlendirmesi		Dikkate Alınması Gereken Rehabilitasyon Seçenekleri (Yeni tabaka eklenmesi ve eklenmemesi ile onarımı)
Yeterli (hizmet ömrü daha var)	Çok iyi	Çatlak yok, küçük tekerlek izi ve / veya küçük yüzey ilgili hasarlar; Yüzey çarpıklığı çok az	<input type="checkbox"/> Bir tabaka ekmeden yüzey onarımları. <input type="checkbox"/> Kaplama koruma stratejisi. <input type="checkbox"/> Yapısal olmayan iyileştirme. <input type="checkbox"/> Gelecekteki kamyon trafiği seviyeleri için tasarlanmış tabakanın eklenmesi.
	İyi	Sınırlı yük ve / veya yük ile ilgili olmayan çatlaklar, küçük ila orta dereceli tekerlek izi ve / veya orta derecede karışım ile ilgili hasarlar; bazı yüzey bozulmaları ve pürüzlülük.	<input type="checkbox"/> kaplama koruma stratejisi <input type="checkbox"/> Frezeleme ve yüzey onarımı olsun veya olmasın gelecekteki kamyon trafiği seviyeleri için tasarlanmış mevcut kaplama üstü tabakanın eklenmesi
Marjinal (Hizmet ömrü daha var ya da bitmiş olabilir)	Fena değil	Orta derecede yük ve / veya yüke bağlı olmayan çatlama, orta derecede tekerlek izi, orta miktarda karışımla ilgili hasarlar ve / veya bir miktar pürüzlülük (IRI > 1.9 m /km).	Tabaka eklenmeden Öncesi Tedaviler Önerilen. <input type="checkbox"/> yüzey onarımı olsun veya olmasın yapısal kaplama. <input type="checkbox"/> Tabaka eklenmeden önce yüzey katmanını çıkarın ve değiştirir. <input type="checkbox"/> Tabaka eklenmeden önce yerinde geri dönüşüm.
Yetersiz (Hizmet ömrü bitmiş)	Kötü	Yoğun yüke bağlı olmayan çatlama, orta derecede yüke bağlı çatlama, yüksek seviye tekerlek izi, yoğun karışımla ilgili hasarlar ve / veya yüksek pürüzlülük seviyeleri (IRI > 2.7 m /km).	Tabaka eklenmeden önce bakım onarım çözümleri yoksa, yeniden inşaat önerilir <input type="checkbox"/> yapısal kaplama ile yüzey onarımı. <input type="checkbox"/> Tabaka eklenmeden önce yerinde geri dönüşüm. <input type="checkbox"/> Yeniden inşaat
	Çok kötü	Yoğun Yüke bağlı çatlama ve / veya çok pürüzlü yüzeyler (IRI > 3.5 m /km).	Tabaka eklenmeden Öncesi Tedaviler yoksa yeniden inşaat önerilen <input type="checkbox"/> yapısal kaplama ile yüzey onarımı. <input type="checkbox"/> Tabaka eklenmeden önce yüzey katmanını çıkarın ve değiştirir. <input type="checkbox"/> Tabaka eklenmeden önce yerinde geri dönüşüm. <input type="checkbox"/> Yeniden inşaat

2.1.2. Asfalt Kaplama ile Beton Yol Rehabilitasyonu

Mevcut beton kaplama üstüne asfalt tabaka uygulanması, genel ve yaygın bir yöntemdir (Zhou vd., 2009). Ancak eski yolun hizmet ömrünü ulaşmaması ve halen görevi yapabilir olduğu için rehabilitasyon adını alır. Hasar görmüş beton yolu üstüne asfalt tabaka eklenilip yolun hizmet ömrünü uzatılır, sürüş konforunu artırılır, kayma direnci ve yolun yük taşıma kapasitesi artırılır (Khazanovich vd., 2013). Yani beton üstü asfalt tabaka eklenmesi hem yolun yapısal ve işlevsel fonksiyonları iyileştirilir. Ayrıca beton üstü asfalt tabaka serilmesi en ekonomik yöntem olup hızlı bir şekilde uygulanması en önemli ikinci avantajıdır.

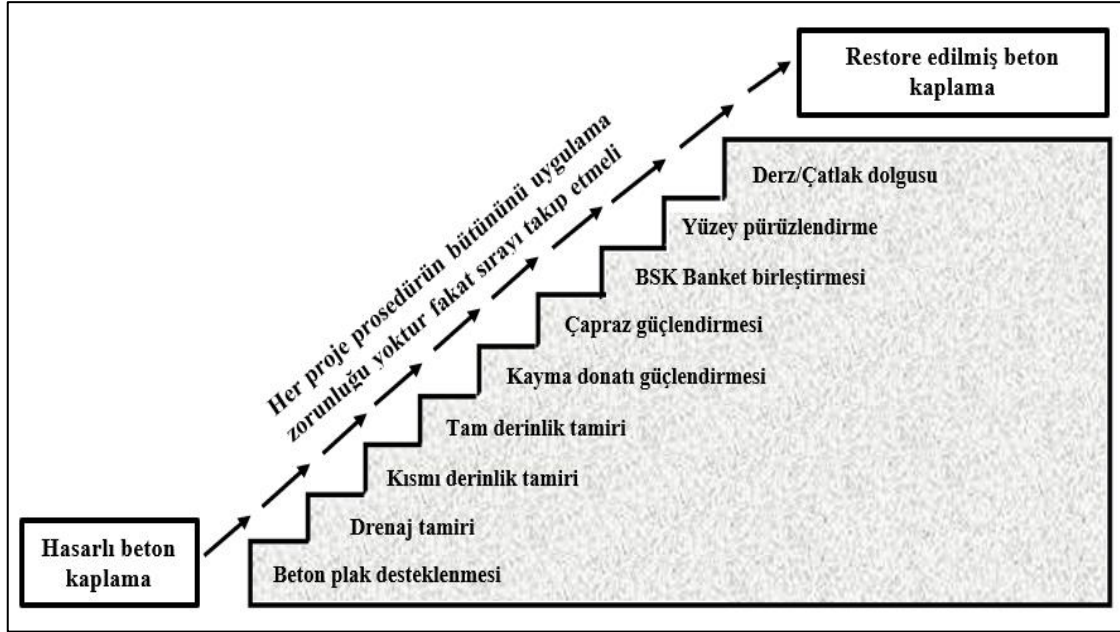


Şekil 2. 1. Beton üstü asfalt kaplama (Kentucky, USA).

2.1.3. Asfalt Kaplama Uygulaması Öncesi Yapılan Tamir

Asfalt kaplama yapılmadan önce mevcut beton kaplamada bulunan bozulmaların tamiri yapılmalıdır. Asfalt kaplama mevcut beton kaplamanın performansı arttırabilmesi altındaki beton plakanın durumuna da bağlıdır. Beton plakanın altındaki yetersiz drenajı, zayıf zemin taşıma gücü, beton plakalar arası yük aktarım verimliliği (LTE) asfalt kaplamanın performansını da dolaylı olarak etkileyecektir. Mevcut beton kaplamanın durum

değerlendirmesi ile başlayıp tamir edilip iyileştirme yapıldıktan sonra asfalt tabaka serimi yapılmalıdır. Dünyada birkaç tamir yöntemleri uygulanmaktadır. Amerikan Beton Yollar Birliği (ACPA) tarafından hazırlanmış beton kaplama asfalt kaplama uygulanması için tamir adımları ve metotları Şekil 2.2’de gösterilmektedir.



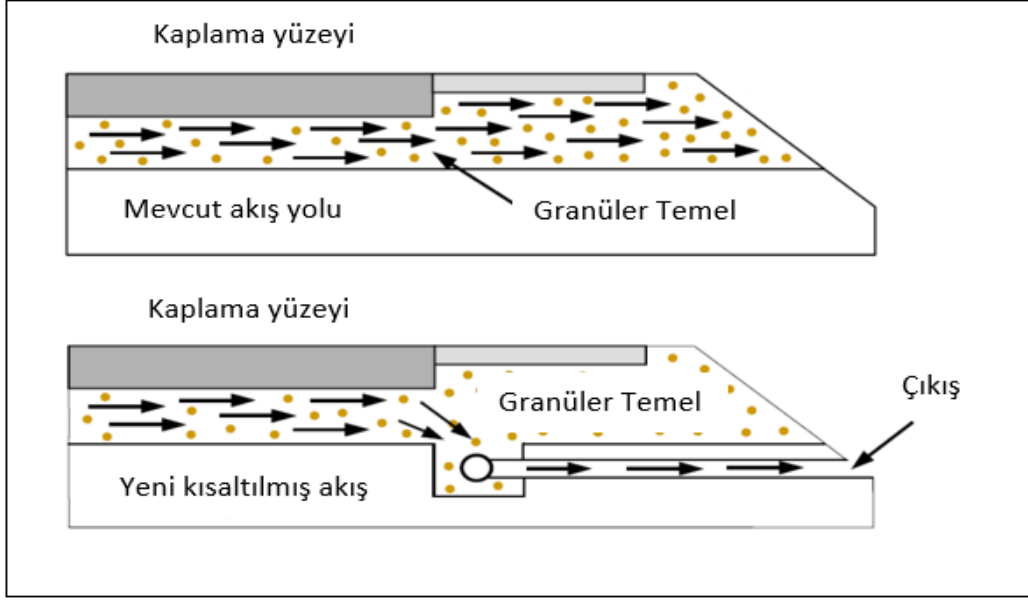
Şekil 2. 2. Asfalt kaplama uygulaması öncesi yapılan tamirler (Khazanovich vd., 2013).

- Beton plakalar altının desteklenmesi:

Yolun hizmeti sırasında, beton plakaların altında bazı boşlukların oluşması nedeniyle alttaki tabakadan (düşük CBR değeri) destek kaybeder. Zayıf yük aktarma, pompaj ve tabanın erozyonu, drenaj eksikliği, destek kaybına neden olan başlıca faktörlerdir. Destek, plakaların altına malzemenin yerleştirilmesini içeren beton plakaların stabilizasyonu ve beton plaka altına “Slab Jacking” adı ile de bilinen basınçlı beton püskürtülerek plaka kaldırılması ile çözüm üretilebilir (Harrington vd., 2014).

- Drenaj tamiri:

Drenaj bütün yol kaplama tipleri için önemli olduğunu bilinmektedir. Mevcut beton yollarda yeniden drenaj sistemi yapmak zor ve maliyetlidir. Bu nedenle bir beton yolun drenaj sistemi iyileştirmek için kenar drenaj uygulanmaktadır. Kenar drenaj uygulanarak beton tabakanın pompajı, faylanması ve derz sapmaları engellenebilir ve yolun ömrünü uzatılabilir (Darter vd., 1985; Yu vd., 1994). Kenar drenajları, taban tabakası içerisindeki suyun drenaj uzunluğu kısaltarak çalışır (Khazanovich vd., 2013).



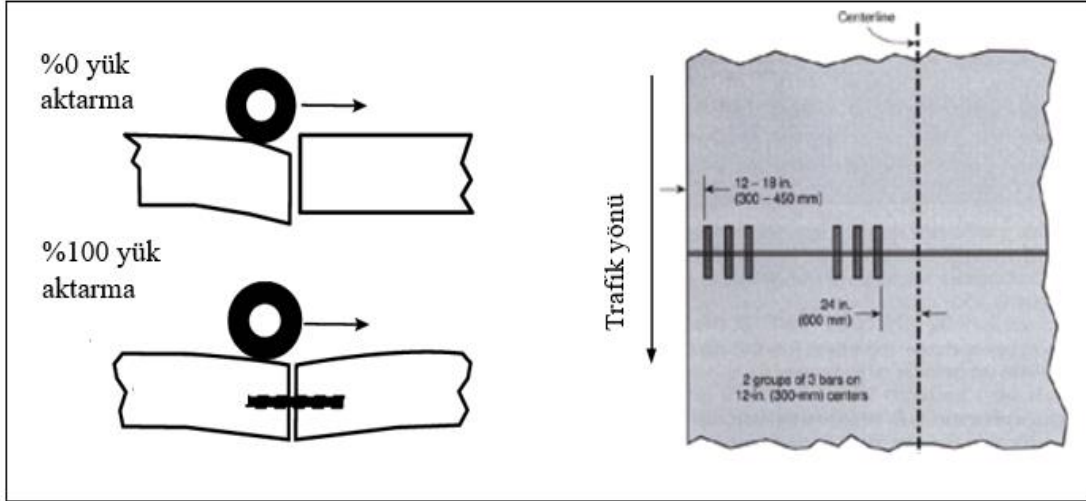
Şekil 2. 3. Yol kenar drenaj sistemi (Smith ve Hoerner, 2008).

- Beton plakalar arası yük transferinin artırılması (dowel bars retrofit DBR)

Beton plakaları arasında yeterli yük aktarımı sağlamak, pompalamayı ve ilgili arızaları önlemek için çok önemlidir. Yük aktarımı, kayma donatı (dowel bars) ve bağlantı donatı (tie bars) ile sağlanabilir. Ayrıca kayma donatı enine derzleri için kullanılmaktadır. Bağlantı donatı ise boyuna derzleri için kullanılmaktadır. Asfalt kaplama yerleştirmeden önce, beton plakalar arasında yeterli yük aktarımı olduğunda yansıma çatlaklar ihtimali azaltılabilmektedir. Birçok çalışma kayma donatı derz arası yük aktarımı sorununu ortadan kaldırılabildiğini gösterilmiştir. Ayrıca ACPA tarafından hazırlanmış kayma donatı çubukları mevcut beton plakalar arasında yerleştirmesi bir kılavuz vardır. Bu kılavuzu göre, kayma donatının uzunluğu en az 35 cm olmalıdır ve her beton plakanın içinde en az 15 cm 'si gömülmelidir. Kayma donatıları tekerlek yolu istikametinde 30 cm aralıklı enine derzleri noktalarına üç ila dört tane yerleştirilmesini tavsiye edilmektedir. Tablo 2.3' da kayma donatı çubuklarının boyutları gösterilmektedir (ACPA, 2006).

Tablo 2. 3. Kayma donatılarının boyutları (ACPA, 2006).

Beton plağın kalınlığı, mm(in)	Çap, mm (in)	Minimum uzunluğu, mm (in)	Aralık , mm (in)
<200 (8)	25 (1.0)	350 (14)	300 (12)
200to 240 (8 to 9.5)	32(1.25)	350 (14)	300 (12)
≥250 (10)	38 (1.5)	350 (14)	300 (12)



Şekil 2. 4. Kayma donatı fonksiyonu ve yerleşmesi (ACPA, 2006).

Kayma donatı yerleştirme prosedürü (Perkins vd., 2009)

- 1- Kayma donatı için testere yuvası
- 2- Kerf oluşturmak için betonu çıkarın ve suyla durulayın
- 3- Kumlama ve vakumlu temizleme yuvası
- 4- Mühür veya prime slotu; çatlakları ve derzleri kapatın
- 5- Kayma donatılarının ve derz dolgu malzemesini yerleştirilmesi ve hizalanması
- 6- Onarım malzemesini yerleştirilmesi



Şekil 2. 5. Kayma çubukların yerleşim prosedürü (Perkins vd., 2009).

2.1.4. Asfalt Kaplamanın Uygulaması

Beton üstü asfalt kaplama istenilen performansın alınabilmesi için tüm inşaat işlemleri dikkatli bir şekilde gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Uygun asfalt karışım seçiminden yerleştirme sıcaklığına ve sıkıştırmasına kadar dikkat edilmesi gereken birçok husus vardır (Khazanovich vd., 2013).. Yukarıda anlatıldığı gibi, asfalt tabakayı uygulamadan önce mevcut beton kaplamada bulunan problemlerin çözülmüş olması gerekmektedir. Bundan sonra, asfalt karışımı uygulanmadan önce beton yüzeyinin temizlenmiş üzerindeki toz ve birikintilerin kaldırılmış olması gerekmektedir. Sonra yapıştırma tabakası (tack-coat) uygulanması gerekmektedir. Yapıştırma tabakası asfalt ve mevcut beton tabakaların bağlantısı sağlar. Böylece bütün tabakalar beraber çalışmaktadır ve asfalt tabaka gelen trafik yükü altı tabakalarına doğru aktarılmaktadır (Al-Qadi vd., 2009).

Tack-coat suyla seyreltilmiş bir bitüm emülsiyon olup, nispeten emici olmayan kaplama tabakasına uygulanır. Yol kaplamanın tabakaları arasında uygun bağlanma sağlayarak monolitik bir yapısı sağlamak için kullanılır. Böylece birlikte trafik ve çevresel gerilmeler dayanabilirler. Doğru yapışma malzemesinin seçimi ve uygulaması, uygun

yapışma mukavemeti sağlamak için esastır(Al-Qadi vd., 2009). Çok fazla yapışkan kullanılması, ara yüzey kayması neden olabilir (Mohammad vd., 2012). Yapıştırma malzemesi uygulamasının miktarı, uygulanacağı yüzeye bağlıdır. Bir asfalt ve beton tabakaların arasında yeterli bir bağlanma için optimum yapışma oranını belirlemek için çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bir çalışmada, Paul ve Sherocman (1998) optimum tack-coat boyası uygulama oranını araştırmışlar. Bu çalışmalar göre uygulama oranının, yerleştirileceği yüzeyin tipine bağlı olarak 0,09-0,27 L / m² arasında değiştiğini bulunmuştur. Asfalt Enstitüsü (AI), tackcoat boyası uygulama oranı konusundaki spesifikasyonlar, bir kısım suyla seyreltilmiş bir emülsiyon için 0.23 ile 0.68 L / m² arasında değişmekte olup kullanım oranı 0.09 ila 0.23 L / m²'dir.

Tablo 2. 4. “Tack coat” uygulama oranı (Mohammad vd., 2012).

Kaplama durumu	Uyulama oranı (l/m ²)		
	kalıntı	Su katılmamış	Su katılmış (1:1)
Yeni asfalt karışım	0.14-0.18	0.23-0.32	0.45-0.59
Oksitlenmiş asfalt karışım	0.18-0.27	0.32-0.45	0.59- 0.91
Öğütülmüş asfalt yüzeyi	0.27-0.36	0.45-0.59	0.91-1.22
Öğütülmüş beton yüzeyi	0.27-0.36	0.45-0.59	0.91-1.22
Beton	0.18-0.27	0.32-0.45	0.59-0.91



Şekil 2. 6. “Tack-coat” uygulaması (Tom Kuenmen,2016).

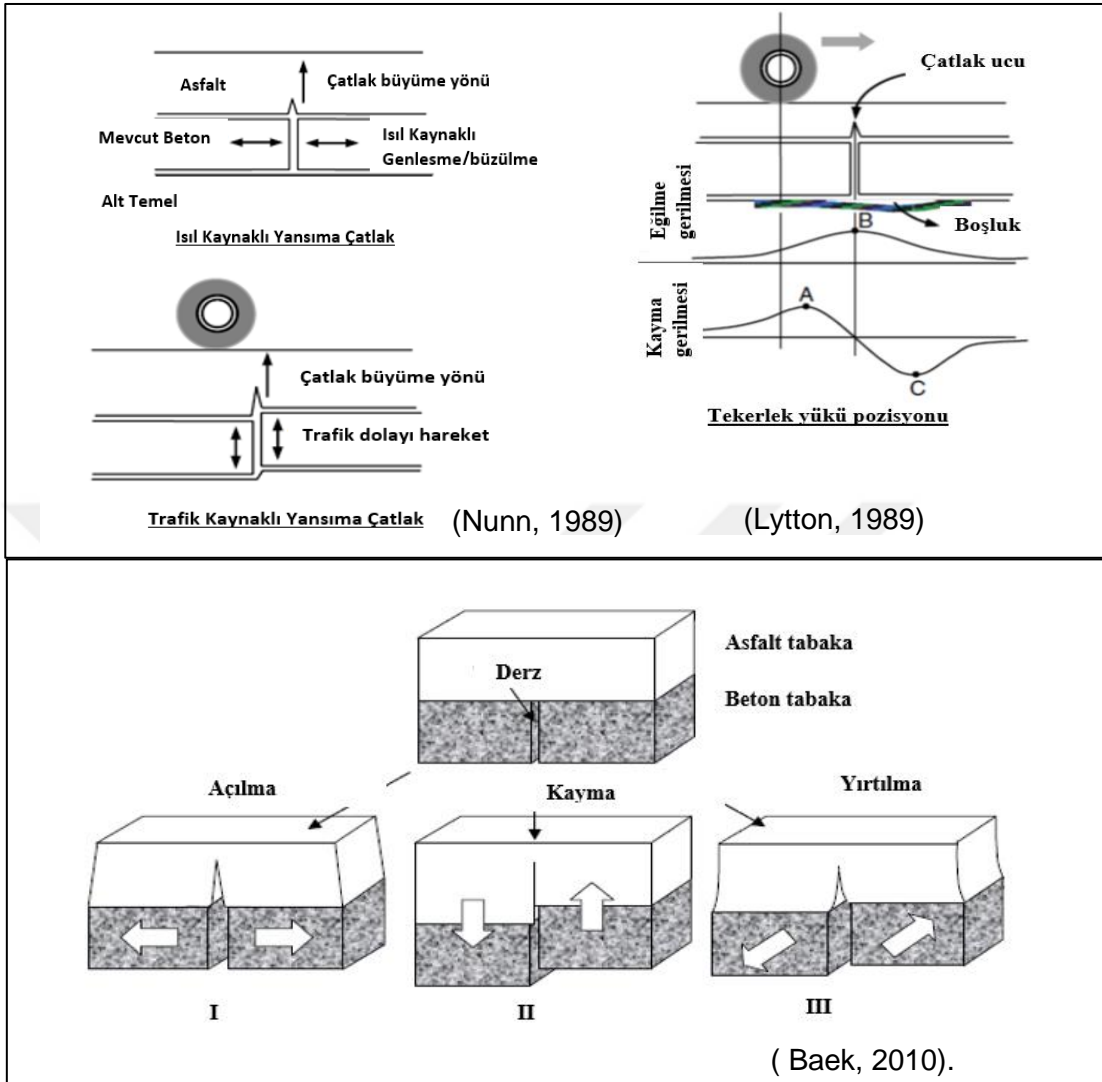
2.1.5. Beton Üstü Asfalt Kaplamalarda Yansıma Çatlakları

Asfalt tabaka ile hasar görmüş beton kaplamaların iyileştirilmesi en çok kullanılan yöntem olmasına rağmen, yansıma çatlakların olduğu yerlerde performansı, hizmet kalitesi ve servis ömrü önemli ölçüde düşmektedir.

Yansıma çatlaklar ve yorulma çatlaklar, enine ve boyuna derzli beton kaplama üstüne serilmiş ince asfalt kaplamalarda oluşmaktadır. Beton plakalarda trafik yükü ve günlük sıcaklık değişimlerinden dolayı deplasmanlar oluşmaktadır (Lytton vd., 2010). Derzler ve çatlakların olduğu yerlerde asfalt tabakanın altında bu hareketlerden kaynaklanan aşırı gerilmeler ve şekil değiştirmeler meydana gelmektedir. Çatlaklar asfalt tabakada temel olarak 3 farklı gerilme mekanizmasından oluşmaktadır: eğilme, kesme ve ısıl gerilmeler. Yansıma çatlama tüm bu mekanizmaların kombinasyonunun sonucudur. Trafik yükünün her döngüsü, günlük sıcaklık değişimlerinden etkilenen asfalt tabakada iki kesme artı bir bükme eylemi başlatır (Lytton, 1989; Nunn, 1989). Mevcut kaplamanın yapısı, geometrisi, asfalt kaplamanın mukavemeti, derzler ve çatlaklardaki yük aktarım özellikleri, yansıma çatlak başlangıçlarını ve ilerlemelerini etkileyen önemli faktörlerdir.

Kırılma mekanik teorisinde yukarıda belirtilen eylemler üç yükleme moduna göre sınıflandırılır (Majidzadeh ve Kaufmann, 1970). Mod I (açma modu), yükleme normal olarak çatlak düzlemine uygulandığında başlayan ve çatlak düzlemine dik olarak yayılan çatlaktır. Moda II ve moda III ile çatlaklar düzlemine paralel olarak yük uygulandığında çatlaklar düzlemsel kesme yönünü başlatır. Beton üstü asfalt kaplamalarda moda I hem ısı hem de trafik yükü tarafından tetiklenebilir. Trafik yükünden dolayı beton plakalarda dikey hareketler olup moda II de neden olabilir. Moda III ise, plakaların yanal hareketi ile tetiklenebilir (Baek, 2010). Kaplamalarda hem trafiğe hem de sıcaklık yüklemesine maruz kaldıklarından, karışık mod yansıma çatlaklar gelişebilir.

Genellikle trafik yükü kaynaklı gerilmeler ısıl gerilmelerden daha hızlı oluşmaktadır ve daha çok zarar vermektedir. Ayrıca soğuk havalarda (sıfır altı sıcaklık) asfalt kaplamalar da esneme kabiliyetini kaybetmekte ve bundan dolayı trafik yükleri arasında gerilmeler birikmektedir. Yansıma çatlaklar düşük sıcaklıkta meydana gelme olasılığı, asfalt daha esnek olduğu ve yük geçtikten sonra hızlı bir şekilde rahatlayabileceği orta ve yüksek sıcaklığa kıyasla daha yüksektir (Baek, 2010).



Şekil 2. 8. Yansımaya çatlakların mekanizmaları.

2.1.6. Yansımaya Çatlaklarına Sebep Olan Parametreler

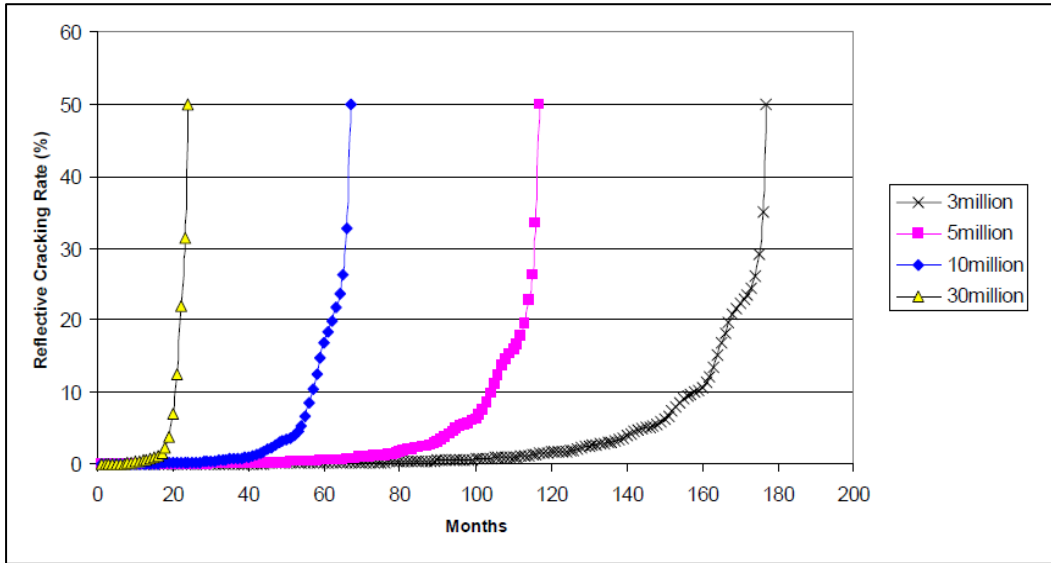
Yansımaya çatlakların oluşması etkileyen birçok parametre vardır: kaplama kalınlığı ve karışım özellikleri, mevcut kaplamanın durumu, taban / alt taban destek durumu, çevresel faktör ve trafik hacmi (Nam vd., 2014).

TDOT (Texas Ulaştırma Müdürlüğü) (Zhou vd., 2009), laboratuvar ve saha çalışmalarına dayanan bir asfalt kaplama tasarımı ve analiz yazılımı geliştirerek beton üstü asfalt ya da beton kaplama performansı hakkında kapsamlı bir analiz gerçekleştirmiştir. Çalışma, asfalt kaplamasını karakterize eden girdi değeri parametrelerine, mevcut kaplama

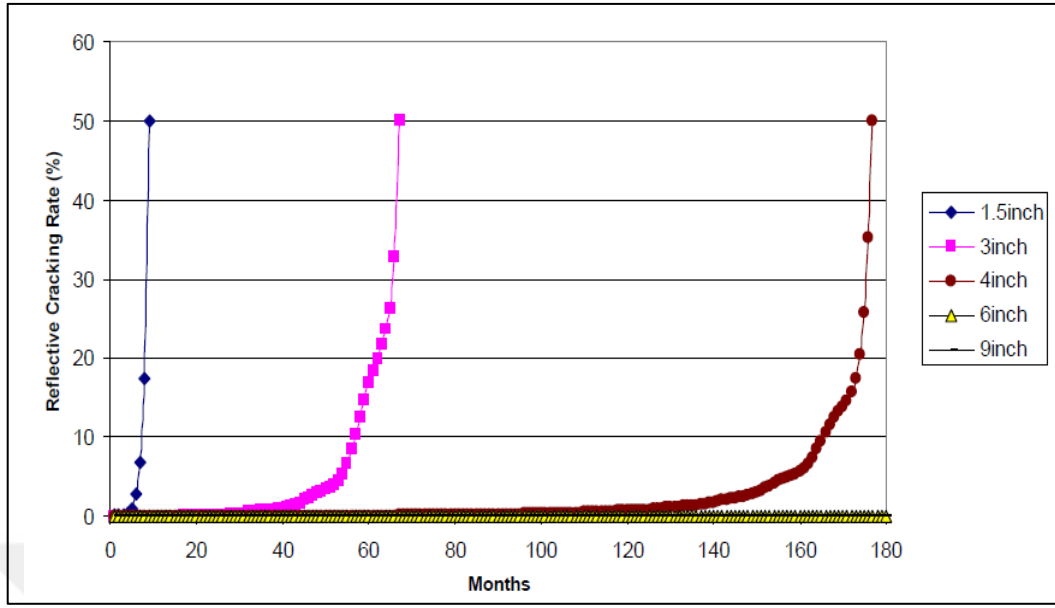
malzemesine, katmanlara, farklı trafikteki tasarım özelliklerine ve iklim koşullarına duyarlılık analizini içermektedir.

- Çok etkili parametreler: 1) trafik yükleme seviyesi, 2) iklim, 3) asfalt kaplama kalınlığı, 4) yük aktarım verimliliği, 5) asfalt kaplama karışım tipi ve 6) mevcut temel katman modülü.
- Orta etkili parametreleri: 1) asfalt bağlayıcı tipi, 2) beton plaka kalınlığı, 3) beton plaka boyutu ve 4) beton plakasının genleşme katsayısı.
- Az etkili parametreler: 1) asfalt kaplamaların ısıl genleşme katsayısı, 2) mevcut beton modülü, 4) mevcut temel tabakası kalınlığı ve 5) zemin tabakanın modülü.

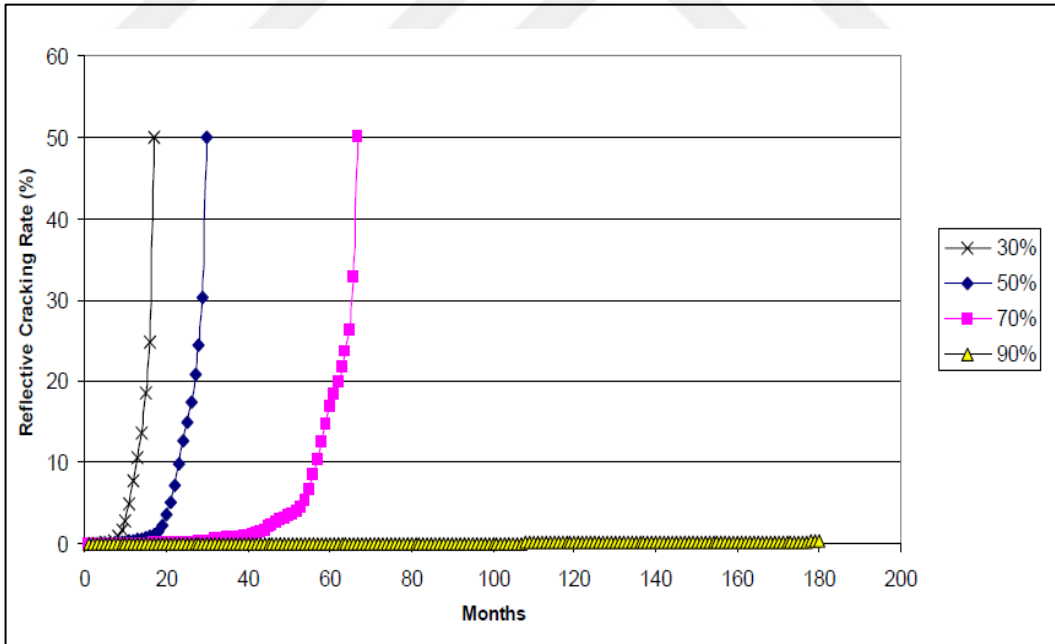
Şekil 2.10 ila Şekil 2.12 JPCP beton üstü asfalt kaplamada trafik yüklerinin, LTE ve kaplama kalınlıklarının yansıma çatlakları üzerindeki etkilerini göstermektedir.



Şekil 2.9. Farklı trafik hacimi için zamanla yansıma çatlak oranı.



Şekil 2. 10. Farklı asfalt kalınlığı için zamanla yansımaya çatlak oranı.



Şekil 2. 11. Farklı LTE için zamanla yansımaya çatlak oranı.

2.1.7. Yansıma Çatlakların Önleme/Azaltma Teknikleri

Kaplamaların içerisinde oluşan çatlaklar sürüş kalitesinin düşmesine ve güvenli olmayan koşullara neden olmaktadır. Suyun çatlakların içerisinden alt tabakaların içine sızması, üst yapının yapısal kapasitesinin düşmesine ve ardından servis kalitesini ve yolun dayanıklılığını düşürerek bakım süresi ve maliyetinde bir artışa neden olmaktadır. Bu sorunları önlemek için birçok teknikler geliştirilmiştir.

2.1.7.1. Mevcut Beton Plakaların Kırılması Tekniği

Mevcut beton kaplamada hasarların seviyesi yüksek olduğunda, serilecek asfalt kaplamanın erken bozulmasını önlemek için yapılacak geleneksel ön kaplama onarımı yeterli değildir (Thompson, 1999). Böylece, bir alternatif olarak, mevcut kaplamayı küçük beton parçalarına ayrılarak yapılacak yeni asfalt tabakasının getirebilmektedir. (Khazanovich vd., 2013). Kırılma tekniğinde “crack-and-seat” ve “rubblization” en kullanılan yöntemlerdir. Yansıma çatlakları önlemek veya azaltmak için çok etkili yöntemlerdir (Yang, 2004).

- “Crack and seating”

Derzli donatısız beton kaplamalar (JRCP) için “Crack and seat” veya derzli donatılı beton kaplamalar (JRCP) için “break and seat” yönteminde, mevcut beton plakaları bölünmektedir, alt kısımlardaki boşlukları ortadan kaldırmaktadır ve sonra beton plakaların üzerinde asfalt beton yerleştirmektedir (Yang, 2004). Bunun temel amacı, genellikle 0.6 ila 1.8 m uzunluğunu olan plakaların kısaltılarak günlük sıcaklık değişimlerinden kaynaklanan yatay hareketleri azaltmaktır (Ceylan vd., 2005). Böylece, yük aktarımı plakaların arasında kısmen tutulmuş olup yansıma çatlak oluşma olasılığı azaltmış olabilmektedir. Illinois ulaştırma müdürlüğün tarafından yürütülen bir izleme çalışmasına göre, “crack and seat” yansıma çatlaklar olayının geciktirmesine neden olmaktadır, ama onları kalıcı olarak ortadan kaldırmaz. Ancak, mevcut beton plakaları desteklenen alt tabakası düzgün ve elastisite modülü çatladıktan sonra 100 MPa'dan fazla olduğunda, “crack and seat” metodu çok pozitif etkili olabilmektedir (Corley vd., 1995).

Bu teknikle ilgili tek sorun, tabakaların yapısal kapasitelerini azaltabilmesidir. Dolayısıyla, bu azalmanın telafi etmek için asfalt kaplama kalınlığının artırılması gerekmektedir (Ceylan vd., 2005). Ancak, projenin maliyeti artıracaktır. Bu nedenle “crack and seat” tekniğinin maliyet açısından ve yansıtıcı çatlakların oluşumunu geciktirmek için geleneksel bir kaplamaya göre daha iyi olacağını tespit etmek için bir maliyet analizi

yapılması gerekmektedir. Beton plakaların kırması için, ağır yükler kaldırıp betonun üzerinde düşüren çekiçler ve şahmerdan gibi araçlar kullanarak yapılabilmektedir (Ceylan vd., 2005).

- “Rubblization”:

“Rubblization”, beton plakaların çok küçük parçalara bölünerek yapılan bir tekniktir. Nominal parça boyutları 75 ila 200 mm arasındadır (Nam vd., 2014). Bu yöntemin amacı, yapılacak yeni asfalt kaplaması (asfalt overlay) için, mevcut hasarlı beton tabakasından bir sağlam temel tabakasına dönüştürülmektir. “Rubblization” görmüş bir beton tabaka, kırmataş bir tabakanın yaklaşık 1.5 ila 3 katı kadar sağlamdır (PCS, 1991). Böylece derzler veya çatlaklar civarında meydana gelmiş olacağı aşırı gerilmeler kaldırmış olabilir. Ancak, yapısal kapasitesini azaltılmış olabilir, ama bu sorun kalın bir kaplama yapılarak çözüm olabilmektedir (Galal vd., 1999). Mevcut kaplamanın durumu ,hasar seviyesi, kullanılan ekipmanın tipi, hava koşulları, trafik seviyesi ve kaplamanın kalınlığı rubblization performansını etkilemektedir (Ceylan vd, 2005).


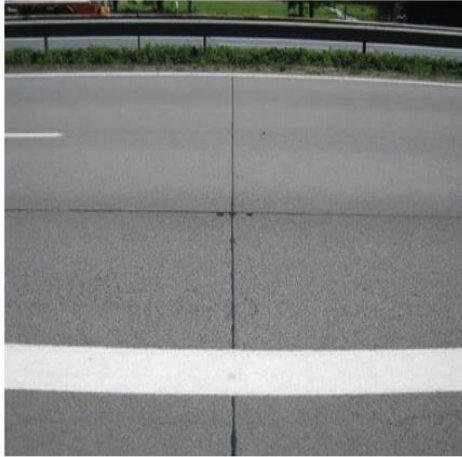
Iowa Üniversitesi'nden yapılan bir araştırmaya göre “rubblization”, zayıf alt tabaka sahip olan kaplamalar için ideal bir çözüm değildir. Bu sorun çözmek için, drenaj sistemi bozuk ise “rubblization” yapmak yerine kenar drenler yerleştirmeye tavsiye edilmiştir (Ceylan vd, 2005). Thompson (1999), asfalt ile kaplanan “rubblization” görmüş beton tabakalar bir değerlendirme yapmış ve sonuç olarak tabakanın yapısal dayanımında korunmuş olmuştur. Michigan ulaştırma müdürlüğü, “rubblization” görmüş bir beton üzerinde yerleştirilen asfalt hizmet ömrünün yaklaşık 14 yıl olduğunu belirtmiştir.



Şekil 2. 7. Beton plakaların “Rubblization” sonrası sıkıştırması (Ceylan, 2005).

2.1.7.2. Derz Kesimi Ve Derz Dolgusu “Sawing-and-sealing”

Bu teknik, asfalt ile kaplanan beton tabakası yansıma çatlakların genişlemesini kontrol etmek için, beton plakaların derzleri tam üstüne keserek gerçekleştirilmektedir (Marquart, 2001). Asfaltın yerleştirilmesinden önce, eski kaplamanın derzleri belirlenir ve işaretlenir. Asfalt tabakası yaptıktan sonra, derzler tebeşir ile yeniden belirlenir ve hassasiyetle kesilir. Daha sonra kesimler temizlenip sızdırmazlık bir malzeme uygulanır (Dhakal vd., 2016). Herhangi bir su sızıntısını önlemek için, sızdırmazlık işlemi iyi bir şekilde yapılması gerekir, (Al-Qadi vd, 2006). Elseifi ve diğerleri (2011) tarafından yapılan bir çalışmada, “saw and seal” uygulanmış olan toplam 15 kısmi beton üstü asfalt kaplama performansını değerlendirmiş. Çalışmayı 6 ila 14 yıla kadar sürdürmüştür. Sonuçta, 1 ila 12 yıl hizmet ömrü arasında, test kısmilerin %87'sinin olumlu yanıt verdiği belirlenmiştir.

<p>1.2-in. SMA over 10.3-in. JPC (widened slab) 16.4-ft joint spacing</p>	<p>Germany, south of Munich A93 47 million trucks over 13 years in outer lane</p>	<p>1995 New SMA/JPC construction</p>	<p>2008: Excellent performance over 13 years. All transverse and longitudinal joints sawed and sealed. Minor rutting. No additional reflection cracking or midslab cracking. Some SMA patching at transverse joints for unknown reasons.</p>
			

Şekil 2. 8. “Saw and seal” uygulanmış olan Almanya’da bir beton üstü asfalt kaplama (Rao, 2013).

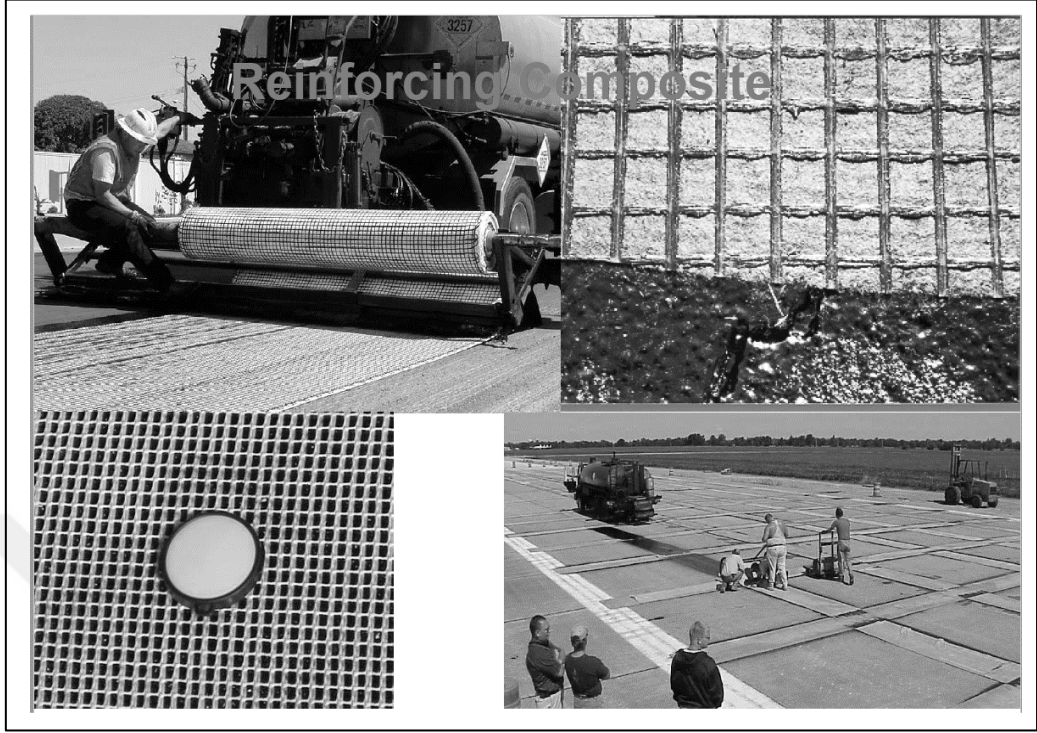
2.1.7.3. Geosentetikler

Son yıllarda, geosentetik malzemeler, yansımaya çatlakların azaltılması için asfalt ile beton tabakaların arasında ara tabaka veya güçlendirme malzemesi olarak yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Geosentetik malzemeler, geotekstilleri, geogridleri ve geocompozitleri içermektedir. Beton üstü asfalt kaplaması yapılmadan önce, beton kaplamaların güçlendirme amacıyla özellikle çatlaklar ya da derzlerin olduğu yerlerde gerilmeler minimize etmek amacıyla geosentetikler kullanılabilir. Ek olarak, geomanbranlar ara katman olarak kullanıldığında, nem bariyer görevi yapacaklarında dolayı tabakaların drenaj kalitesini artırabilmektedir (Nam vd., 2014). Yapılan birçok çalışmada, geosentetik malzemelerin kullanımı ile, genleşme hızını azaltarak yansımaya çatlakların başlamasını geçiktirmek için uygun bir teknik olduğu çeşitli çalışmalarla gösterilmiştir (Abdessemed vd., 2015; Dhakal vd., 2016; Gregory vd., 2001). Daha iyi sonuçları elde etmek için geosentetiklerin aşırı çekme gerilmeler olacağı yerlerde yerleştirilmesi önerilmektedir (Virgili vd., 2009).

Amini (2005), Mississippi ulaştırma müdürlüğü için yapılan çalışmada, beton üstü asfalt kaplamalarda yansımaya çatlaklar azaltmak amacıyla geosentetiklerin etkinliği araştırılmıştır. Araştırmalar Mississippi'de beş ilçede gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarında, 5 cm'den büyük kalınlıklarda yapılan asfalt tabakaların daha iyi performans gösterdiği görülmüştür. Ek olarak, geosentetiklerin sıcak bölgelerde daha etkili olduğu bulunmuştur. Sıcak bölgelerde, geosentetikler ısıya bağlı olarak gelişen çatlakları durduramayacağı, ancak yansımaya çatlakların sayısının azaltmış olduğunu belirlemişlerdir.

Nejad ve diğerleri (2015) tarafından, tekrarlanan yükler altında beton üstü farklı geosentetik türleri ile güçlendirilen asfalt tabakada yansımaya çatlakların üzerinde laboratuvar çalışması gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlarda, geosentetik ile güçlendirmesinin, asfalt kaplamalarda çatlağı oluşturmak için uygulanacak yük tekrar sayısının arttırıldığı görülmüştür.

Fallah ve Khodaii (2015), asfalt betonu ile yapılan kaplamalarda yansımaya çatlakların azaltılması için iki farklı geogrid ("glassgrid" ve "polyester grid") performansı üzerine laboratuvar çalışmaları yapmışlardır. Çalışmalarının sonucunda, asfalt tabakanın altındaki gerilmeleri azaltmasında "glassgrid" (yüksek mukavemetli geogrid) polyester'den daha etkili olduğunu bulmuşlardır. Başka çalışmada, Gonzalez ve diğerleri (2015) tarafından altı tür geosentetik karşılaştırılarak aynı kanaate ulaşılmıştır.



Şekil 2. 9. Geosentetik arazi uygulaması (Al-qadi vd., 2008).

2.1.7.4. Asfalt Kaplamanın Kalınlığını Artırılması

Yansıma çatlağının azaltılması için asfalt kalınlığının artırılması metodu, deneyimlerden geliştirilen ampirik yöntemlerdir. Kalın asfalt kaplaması, derzlerde ve çatlaklarda zayıf yük transfer etkisini azaltarak gerilmelerin seviyesinin azaltılmasına katkıda bulunmaktadır. Kalın asfalt kaplamanın diğer bir faydası, asfalt betonunun tabakası izole ederek sıcaklık değişimini azaltılmaktadır. Böylece beton tabakanın genişlemesi veya büzülmesini önlenmiş olabilmektedir (Nam vd., 2014). Beton üstü asfalt kaplama kalınlığının belirlenmesi; kullanılacak kaplama malzemesinin özelliklerine, mevcut beton tabakasının koşullarına, iklim koşullarına, trafik yüklerine ve yansıma çatlağın azaltılmasında kullanılacak teknik yöntem gibi birçok faktörlere bağlıdır (Zhou vd., 2009). Her türlü kaplamada, yatay hareket nedeniyle ortaya çıkan derz çatlakları için kalın bir asfalt kaplamanın uygulanması gerekmektedir. Gülen ve Brown (1984) tarafından Geogia bölgesinde, asfalt ile kaplanan beton tabakaların üzerine yaptıkları çalışmada elde edilen sonuçlar, asfalt tabakanın kalınlığı arttıkça (en az 10 cm önerilmiştir) yansıma çatlakların oluşumunun önemli ölçüde azaldığı görülmüştür.

2.2. Yol Kaplama Mekanistik Analizi

Kaplamaların yapısal tepkilerinin mekanik analizi, trafik ve termal yüklerden dolayı yolda oluşan gerilme, şekil değiştirmeler ve yer değiştirmeler hesaplanmasından ve daha sonra bu tepkilerinin kaplama yapısının performansına çevrilmesinden oluşur (Papagiannakis ve Masad, 2008). Mekanizmanın mekanistik tasarımı veya analizi, bir kaplama yapısının, elastik veya viskoelastik bir alt zemin üzerine dayanan çok katmanlı bir yapı olarak modellenebileceğini varsayar. Buna göre, kaplama yapısının içindeki veya altındaki herhangi bir yerdeki trafik yüklemesi ve/veya termal etkisi nedeniyle kaplamanın tepkilerini (gerilme, şekil değiştirme ve yer değiştirme) hesaplamak mümkündür (Yang, 2004). Mekanik modelin doğru sonuçlar verebilmesi için ise ampirik (arazi veya laboratuvar deneylerle) kalibre edilmesi gerekir.

Yolun mekanik davranışını anlamak için saha ölçümünden hızlandırılmış yol testi (APT) araçları ile katmanlı elastik model ve sonlu elemanlar yöntemi (FEM) gibi sayısal analizlere kadar çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Sonlu elemanların kullanımının avantajı, kaplama performanslarını etkileyen tüm parametrelerin kolayca incelenmesidir ve net bir görüntüsü sağlamasıdır. Kullanıcının analizde yapısal (kalınlık), malzeme özellikleri, sıcaklıklar, trafik yükü ve aynı zamanda kaplamanın tabakaların arasındaki bağ gibi tepkilerini etkileyebilecek tüm parametrelerin çeşitliliğini göz önünde bulundurmasını sağlar. Bunlar da nispeten kısa bir sürede ve daha az çabayla gerçekleştirilebilir.

2.2.1. Katmanlı Elastik Analizi (Layered Elastic Analysis, LEA)

Yol kaplamanın elastik analizi, dış yüklerinden dolayı oluşan gerilmeleri ve şekil değiştirmeleri hesaplayabilen bir prosedürdür. LEA kullanımındaki ana varsayımlar, tabakaların malzemeleri lineer, elastik ve izotropik olarak kabul edilmesidir. Kaplamanın üstyapı tabakaların sınırlı bir derinliğe sahip olurken, zemin tabakası sonsuz derinliğe sahiptir. Tüm tabakalar yatay yönde sonsuzdur (Yang, 2004). Yüzey yükleme, dairesel bir alana uygulanan dikey bir basınçla gösterilebilir. Esnek ve rijit kaplamalar analizi için çeşitli LEA programları vardır. En yaygın olanları:

- CHEVRON: (Chevron araştırma şirketi tarafından geliştirilenmiş Warren ve Dickman (1963) elastisite teorisi üzerine kurulmuş. On tekerlek yük'e kadar ve on tabakadan fazla kabul edebilir.

- DAMA: (Huang ve Witczak, 1981) malzemelerin lineer olmayan davranışlarını hesaba katan, güçlendirilmiş bir Chevron sürümüdür. DAMA programı, tek veya çift

tekerlekli yük altında beş katmana kadar çok tabakalı kaplama sistemini analiz etmek için kullanılabilir.

- KENPAVE: Bu program, hem esnek (KENLAYER) hem de rijit kaplamalar (KENSLAB) analiz için program desteği olan Yang (Kentucky Üniversitesi, 1985) tarafından geliştirilmiştir. KENPAVE, tek, çift, çift tandemli tekerlek yüküne maruz kalan dairesel bir yük altında çok tabakalı bir kaplama için bir çözüm içerir. Her tabaka, lineer elastik, lineer olmayan elastik veya viskoelastik olarak modellenebilir. 19 Tabakaya kadar olan bir kaplama tepkileri hesaplamak ve 190 noktaya kadar çıktı üretmek için kullanılabilir.

- EVERSTRESS: (Sivaneswaran vd., 2001), bu program Washington Üniversitesi tarafından geliştirilmiştir. Program, dairesel bir yük altında Çok tabakalı bir elastik sistemdeki gerilmeleri, şekil değiştirmeleri ve yer değiştirmeleri hesaplayabilir. 5 tabaka, 20 yüke ve 50 değerlendirme noktasına kadar bir kaplama analiz edebilir ve bağlanmamış malzemelerin gerilme duyarlı özelliklerini dikkate alabilir.

2.2.2. Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM)

Sonlu elemanlar yönteminin, kaplama yapılarının gerilme-şekil değiştirme analizlerini modellemek, anlamak ve tahmin etmek için uygun bir araç olduğu kanıtlanmıştır (Yang, 2004). Sonlu elemanlar yöntemi, son yıllarda kaplamaların analizi için yaygın olarak kullanılan bir araç haline gelmiştir. Kompozit kaplamalar gibi karmaşık mühendislik problemleri analitik metotlarla analiz edilmesi çok zordur. FEM, aks yükü, konumu, aks yükü seviyesi, çok tabakalı ve plakalar, tabakaların ara yüz koşulları gibi çeşitli girdi parametrelerini dikkate alarak kaplamanın birleşik trafik ve ısı yüklemesi altındaki davranışlarının analizi için güçlü bir araçtır. Çok tabakalı asfalt, beton, temel, zemin tabaka modellemesinden ve aralarındaki temasları oluşturduğundan kaplama problemini çözmek için FEM gibi gelişmiş sayısal prosedürün kullanılması gerekir.

Sayısal prosedür, analiz modelini sonlu elemanlar olarak adlandırılan bir takım elemanlara ve düğümlere bölmeyi ifade eder. Sonlu elemanlar yöntemi, entegrasyon formülasyonları vasıtasıyla, her eleman için ayrı ayrı çözümler toplanarak elde edilen tam bir sonuçla sonuçlanan cebirsel denklemler yaratır (Moaveni, 1999). İyi tanımlanmış malzeme özellikleri, modeli oluşturan her tabakada uygulanır. Cheun ve Zienkiewicz (1965) yılında sonlu elemanlar ile kaplama analizi ilk uygulayanlardı.

Yol kaplama analizi için iki boyutlu (2B) ve üç boyutlu (3B) sonlu eleman programları mevcuttur. ILLAB200, ELSYM, MICHPAVE gibi 2D yazılımlar sınırlı seçenekler sunar ve derzli beton üstü asfalt kaplama gibi karmaşık yapılarını modelleyemez. Bu nedenle, daha

kapsamlı ve doğru sonuçlar için farklı seçenekler sunan ABAQUS, ANSYS ve SolidWorks gibi 3B sonlu elemanları yazılım programları mevcuttur. Bu çalışmada, 3B SE yazılımı ANSYS 16.0, beton üstü asfalt kaplama, asfalt ile beton tabakaların arasında bağlanma koşulundaki tepkisini, asfalt kalınlığını ve modülünü, kaplamanın performansını etkileyen diğer faktörleri incelenmek için kullanılmıştır.

2.2.3. Literatürde Mekanistik Analizi Çalışmaları

Yoo ve Al-Qadi (2008), asfalt kaplamalarda yorulma çatlaklarını araştırmak için sonlu elemanlar yaklaşımını kullanmışlar. Çalışmada lastik konfigürasyonu, asfalt tabakanın kalınlığı, tekerlek yükü ve tekerlek hızı gibi değişkenler üzerinde durmuşlar. Sonlu elemanlar çıktıları, Virginia akıllı yol test ölçümlerine karşılaştırılmış. Çalışma, asfalt kaplamanın altındaki kritik gerilmeleri, düşey doğrultuda çekme şekil değiştirme ve kesme şekil değiştirme değerleri, düşük araç hızında (8km / saat) ve orta (25 ° C) veya yüksek (40 ° C) asfalt kaplama sıcaklıklarında hesaplanmıştır. Kaplama yüzeyinin pürüzsüz olması ve araç dinamikleri sabit olması, asfalt yüzeyine yakın düşey kesme şekil değiştirme ve asfalt tabakanın altındaki (yüzeyden 38 mm) çekme şekil değiştirme düşük asfalt sıcaklığında (5° C) yüksek hızda (105 km / saat) düşük hızlardakilerden (8 km / saat) daha büyük tepkiler ile sonuçlanmıştır. Araştırma, yüzeye yakın düşey şekil değiştirmelerin alttan-yukarı "bottom-up" yorulma çatlamaının sebebi olduğu gösterilmiştir; lastik kenarı yivinin yakınındaki yüzey çekme şekil değiştirmelerin yukardan-aşağıya "top-down" çatlamaının sebebi olduğu gösterilmiştir.

Mustaque (2010), bozulmuş asfalt kaplamanın üzerine uygulanan beton kaplamanın davranışını 3 boyutlu SolidWorks sonlu elemanlar programı ile araştırmış. Çalışmada farklı tabaka kalınlıkları, farklı asfalt modülü değerleri; beton ve asfalt tabakaların bağlanma koşullarını dikkate alarak, beton kaplamada oluşan gerilmeleri incelenmiştir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar, ara yüz bağlanma koşulunun asfalt üstü ince beton kaplamanın davranışını etkileyen en önemli faktör olduğu gösterilmiştir. Beton kalınlığının veya mevcut asfalt kalınlığının ve asfalt elastisite modülünün artmasının beton kaplamada çekme gerilmelerinin azalmasına neden olduğu gösterilmiştir.

Hu ve Walubita (2011), kaplama katmanlarının tamamen yapışmış ve tamamen ayrılmış durumlarını simüle etmek için 3 boyutlu sonlu elemanlar modeli geliştirmişler. Ara yüz elemanı olarak esnek, yarı rijit ve rijit temel tabaka malzemelerin kullanılması durumunda şekil değiştirmeleri incelemişler. Sonuç, tabakaların bağlanma koşulunun,

aşınma tabakasının altındaki oluşan şekil değiştirmelerin önemli ölçüde etkilediğini göstermişlerdir.

Matthew (2015), ABAQUS programı kullanarak, asfalt ile eski asfalt kaplama ile iyileştirilmiş bir yolda uygulanan yapışma tabakasının etkisini analiz etmişler. Çalışmada, yeni ve mevcut asfalt tabakalar arasındaki ara yüz yapışma koşullarının yeni tabakanın altındaki çekme gerilmeleri üzerindeki etkisi üzerinde duruldu. İlk olarak, doğrudan uygulanan yük altında ölçülen boyuna şekil değiştirmenin, yükleme süresinden bağımsız olarak modelleme ile tahmin etmişler. Modellenmiş şekil değiştirme, tamamına yakını elastisite bölge civarından oluşmuştur.

Liu ve Hao (2012), asfalt ara tabakanın mekaniksel özelliklerinin değerlendirdi. Liu ve Hao, sırasıyla enine doğrultudaki maksimum çekme ve kayma gerilmelerinin asfalt tabakanın altındaki çatlama ölçütleri olarak ilişkilendirmişlerdir. Asfalt-asfalt ve asfalt-temel tabakası ara yüzler için çeşitli yapıştırma yöntemleri düşünülmüştür. Sonuçlar, tabakaların ara yüzleri tamamen mekanik olarak analiz edildiğinde ve tasarım yaklaşımlarında olduğu gibi tamamen yapışık olarak ele alınmadığında gerilmelerin ve şekil değiştirmelerin önemli ölçüde yeniden dağıldığını gösterdi. Çalışmaları, daha doğru tasarım çıktıları elde etmek için uygun katman ara yüz modellemesinin önemini göstermiştir.

Sobhan ve Tandon (2011), geosentetiklerle güçlendirilmiş asfalt kaplamadaki yansıma çatlakların gelişimini laboratuvar ortamında çalışmışlar. Çalışmada asfalt ile beton arasındaki temas etkisi, asfalt kaplamanın kalınlığı, mukavemeti (modülü) ve geosentetik malzemeye güçlendirme etkilerini incelenmişler. Yazarlar, yapışık olmayan asfalt/betonun yapışık olandan daha yüksek gerilmeler oluşturduğu ve gerilmelerin seviyesinin yol yapısına bağlı olduğu sonucuna varmışlar. Ayrıca, kalın, esnek bir asfalt kaplamanın, ince sert asfalt kaplamanın yansıma çatlaklar azaltmada daha iyi performans gösterdiğini buldular. Geosentetik malzemenin kaplamanın altına yerleştirilmesinin kaplamanın gerilme düzeyini düşürdüğünü tespit etmişler.

Ozer, Al-Qadi, Wang ve Leng (2012), bir asfalt tabaka ve beton kaplama arasındaki ara yüz bağ koşulunun etkisini araştırmak için sonlu elemanlar ve saha deney çalışmaları gerçekleştirdiler. Çalışma sonucu, kaplama sıcaklığı arttıkça, kaplama tepkileri üzerindeki ara yüz bağlama etkisinin arttırıldığını göstermiştir. Ayrıca, asfalt/beton bağ durumunun, asfalt tabakanın altındaki gerilmeleri önemli ölçüde etkilediği gözlemlenmiştir. Asfalt ve beton tabakaların arasındaki sürtünme arttıkça, kaplamanın altındaki gerilmelerin azaldığı tespit etmişler.

Ghauch ve Abou-Jaoude (2013), farklı parametreler, alt taban ve taban gücü, taşıt hızı, bindirme kalınlığı ve katsayısı dikkate alınarak derzli beton kaplama üzerine serilmiş asfalt tabakanın tepkilerini araştırmak amacıyla ABAQUS ile iki boyutlu sonlu elemanlar modeli geliştirmişler. Çalışmada kaplama sıcaklığının ve asfalt karışım malzemesinin visko-elastik özellikleri modelde dikkate alınmıştır. Araştırılan tepkiler ise, asfalt tabakanın altındaki çekme ve kayma gerilmeleri olmuştur. Analiz sonuçları, aracın hızı, temel ve zemin tabakaların modülleri artıkça asfalt tabakanın altında oluşan çekme ve kayma gerilmelerin azaldığını tespit etmişlerdir.

Shen, Zhang, Wang ve Huang (2017), beton kaplama üstü esnek kaplamalarında yüzeyden başlayan çatlakları araştırmak için 3D FEM'i kullandı. Çalışmada, asfalt tabakasının çatlamasına sebep olan kritik faktörler araştırılmış ve değerlendirilmiştir. Analiz sonuçları derzli beton üzerindeki asfalt kalınlığının ve modülüs değerinin kaplamada oluşan gerilmeler üzerinde büyük etkilerinin olduğunu göstermiştir. Çatlak veya derz beton üstüne kalın bir asfalt tabakanın yerleştirilmesi durumunda beton plakaları hareketlerinin önemli ölçüde engellenebileceği belirtilmiştir.

3. YÖNTEM

3.1. Sonlu Elemanlar Modellemesi

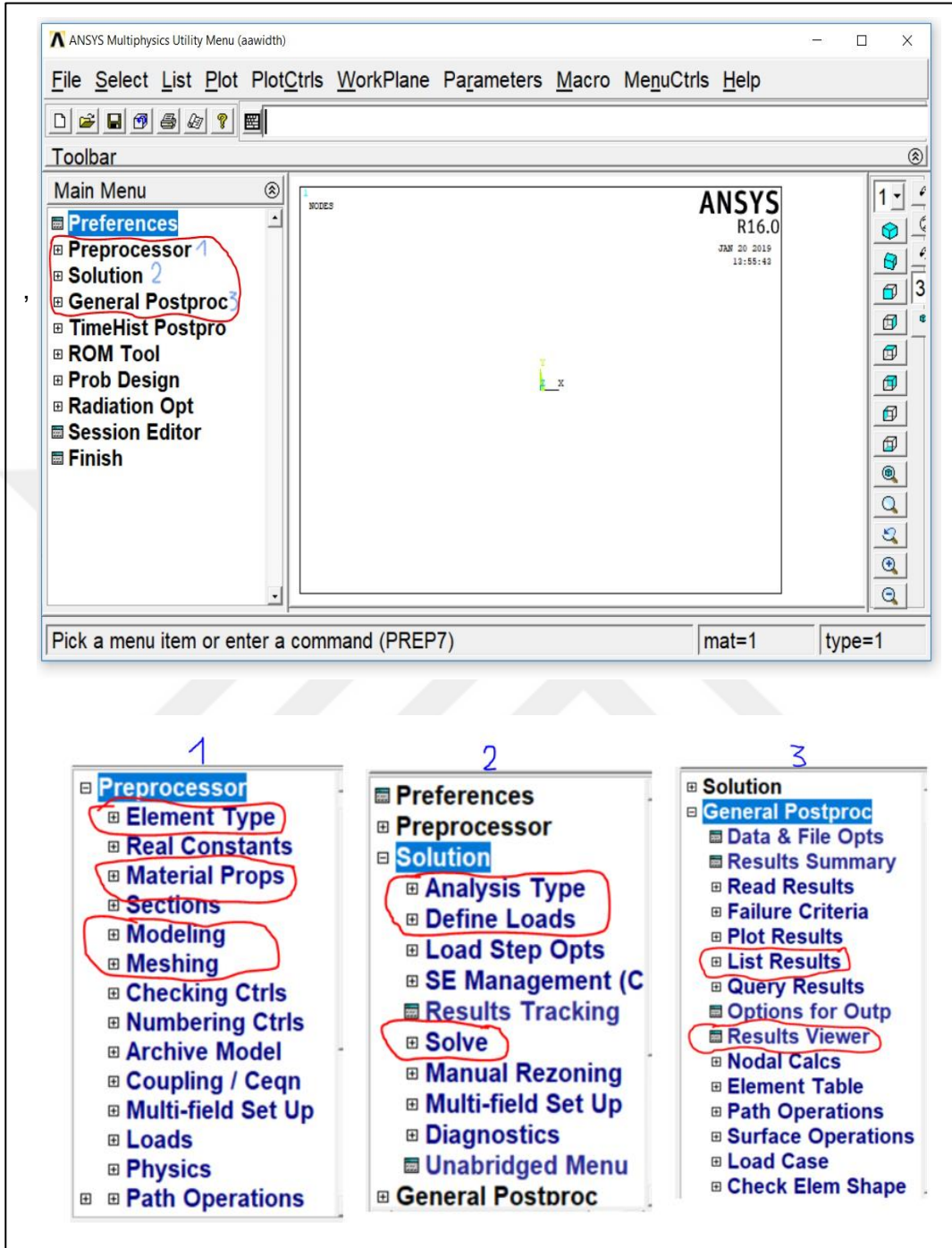
Bu çalışmanın amacına ulaşmak için, 3B (3 boyutlu) sonlu elemanlar modeli geliştirilmiştir. 3B sonlu eleman programı ANSYS programı yararlanarak trafik dingil yükü ile yüklenmiş bir derzli donatısız beton üstü asfalt kaplamanın davranışı simüle edilmiştir. Yansıma çatlaklar asfalt tabakada oluşan gerilmeleri bağlı olduğundan dolayı, bu çalışmada asfalt tabakanın altında meydana gelen çekme yatay gerilmeleri incelenmesi amaçlanmıştır. ANSYS ile kaplamaların özellikleri kolayca değiştirilip gerilmelerin değişimlerini incelenmektedir.

3.1.1. ANSYS

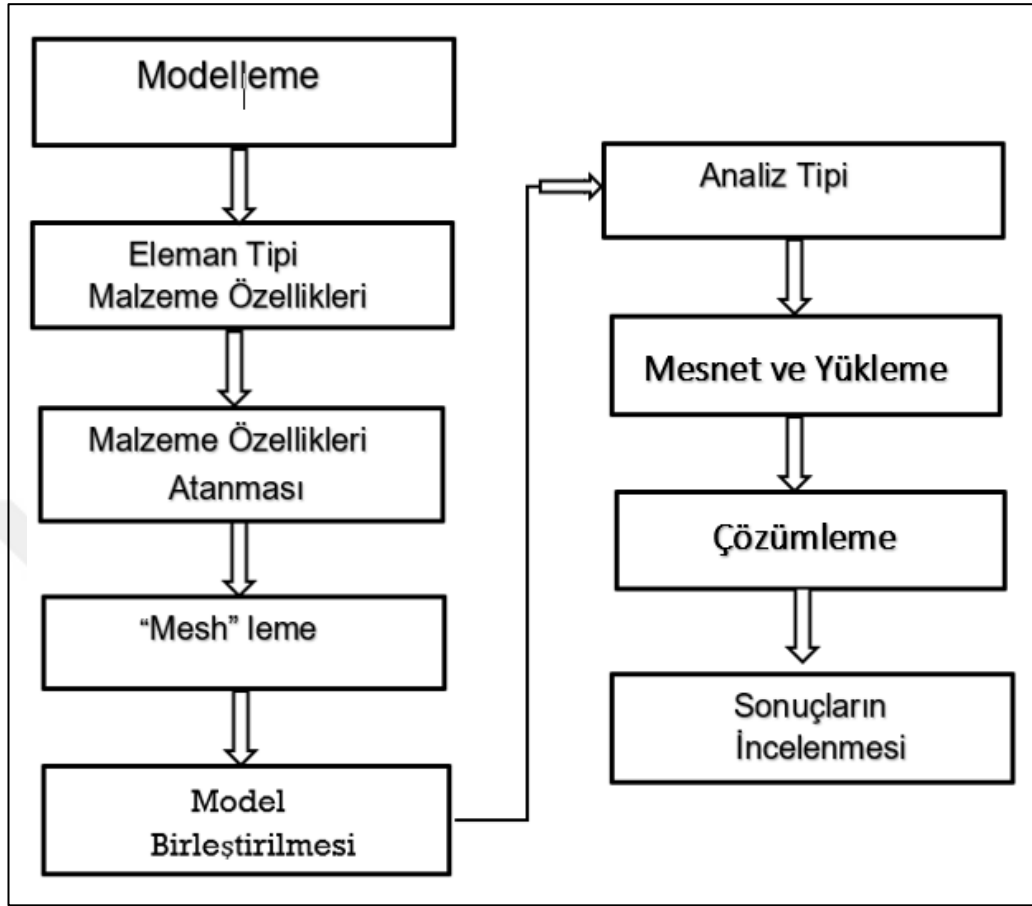
ANSYS sonlu eleman paket programı, İnşaat Mühendisliği disiplini içerisinde yer alan önemli mühendislik yapıların (bina, köprü, yol kaplama, baraj vb) statik, dinamik, lineer ve lineer olmayan davranışlarının belirlenmesi için kullanılan genel bir mühendislik yazılımıdır. ANSYS sonlu eleman programı ile herhangi bir mühendislik yapısının ve/veya taşıyıcı sistem elemanının sonlu eleman modelinin oluşturması, analizleri yapılarak yapısal davranışın elde edilmesi için genelde üç aşamaya bölünür (Altunışık vd, 2018).

- Preprocessor: geometrik modelin oluşturulması, eleman tipi seçimi, kesit ve malzeme özellikleri tanımlaması, ilgili parametrelerin atanması, sonlu elemanlara ayırma gibi birçok işlem yapılabilmektedir.
- Solution: analiz tipinin belirlenmesi, yüklerin atanması, mesnet koşullarının tanımlanması ve analizlerin gerçekleştirilmesi gibi birçok işlem yapılabilmektedir.
- General postprocess: analiz sonuçları elde edilmesi, dosyaya yazdırılması, kontur diyagramı şeklinde görüntülenmesi gibi birçok işlem yapılabilmektedir.

Şekil 3.1 ANSYS APDL ara yüzünü göstermektedir.



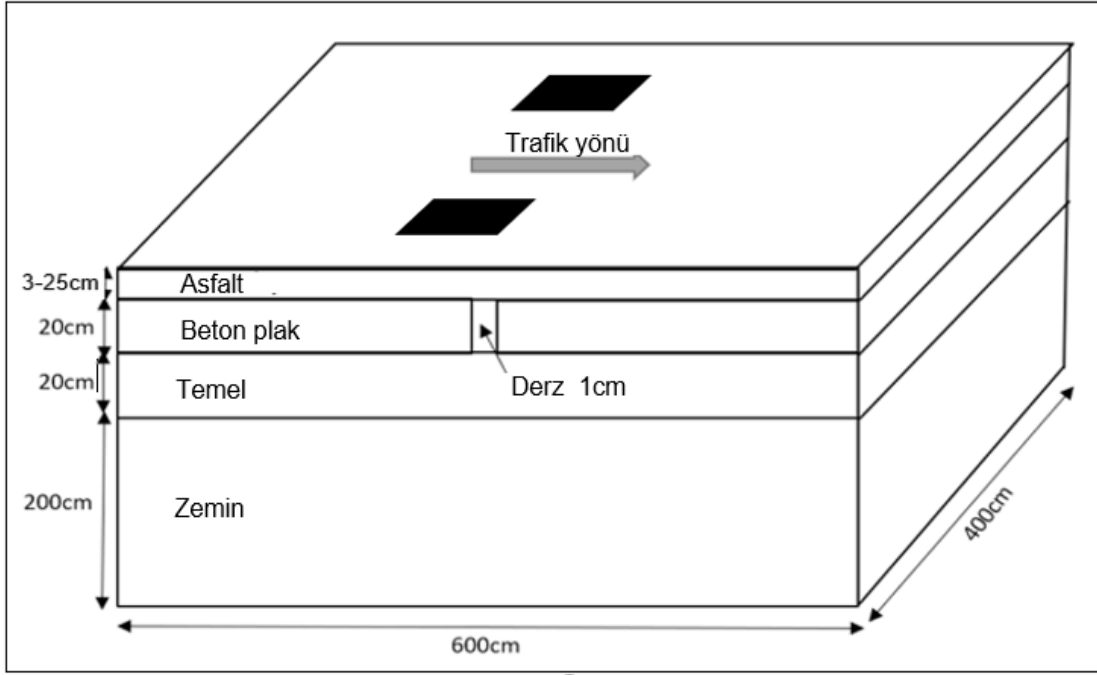
Şekil 3. 1. ANSYS APDL ara yüzü.



Şekil 3. 2. Sonlu elemanlar analizi akış diyagramı.

3.1.2. Geometrik Model

Bu çalışmada önceki çalışmalar dayanarak tipik dört tabakalı bir beton üstü asfalt kaplama seçilmiştir. Beton yollarda, bir plaka (slab) uzunluğu 4-6 m civarındadır. Ancak kritik yerleri plakaların kenarında olduğundan dolayı ve analiz süresi kısaltılmak için sadece iki yarım plaka (her birisi 3 m) modellenmiştir ve arasında bir boşluk açılıp 1 cm kalınlığında bir derz oluşturulmuştur. Böylece 6 m boyuna yönü (trafik yönü) ve 4 m enine yönü bir beton üstü asfalt kaplama modellenmiştir. Mevcut beton kaplamanın toplam kalınlığı 2.4 m olarak: 0.2 m beton plaka kalınlığı, 0.2 m temel tabakası ve 2 m zemin tabakası seçilmiştir. Bu çalışmanın amaçlarından biri asfalt kalınlığının asfalt kaplamada oluşan gerilmeleri üzerindeki etkisini araştırmak olduğundan, 3 ila 25 cm arasında değişen farklı asfalt tabaka kalınlıkları dikkate alınmıştır. Ayrıca, derz açma etkisini değerlendirmek için derz genişliği de 0 ila 2 cm arasında değiştirilmiştir.



Şekil 3. 3. Kaplama modeli.

3.1.1. Eleman Tipi ve Malzeme Özellikleri

Kompozit kaplama tabakaların modellemek için hem sekiz düğüm nokta (node) eleman (aynı zamanda tuğla eleman olarak da bilinir) hem de 20 düğüm katı nokta eleman kullanılabilir. Sekiz düğümlü eleman ile analiz yapmak daha az zaman alır. Bununla birlikte, 20 düğümlü eleman, hesaplama kaynağı için daha yüksek bir gereksinime rağmen, daha doğru sonuçlar sağlar. Kumara vd. (2003), Florida çalışmalarında asfalt üstü çok-ince beton kaplama tabakaların modellemek için 20 düğümlü elemanlar kullanmıştır, Cable ve diğerleri, (2005) ve Matthew (2015) hesaplamalı olarak ekonomik sekiz düğümlü katı eleman kullanmıştır. Bu çalışmada 20 düğümlü SOLID186 elemanı kullanılmıştır.

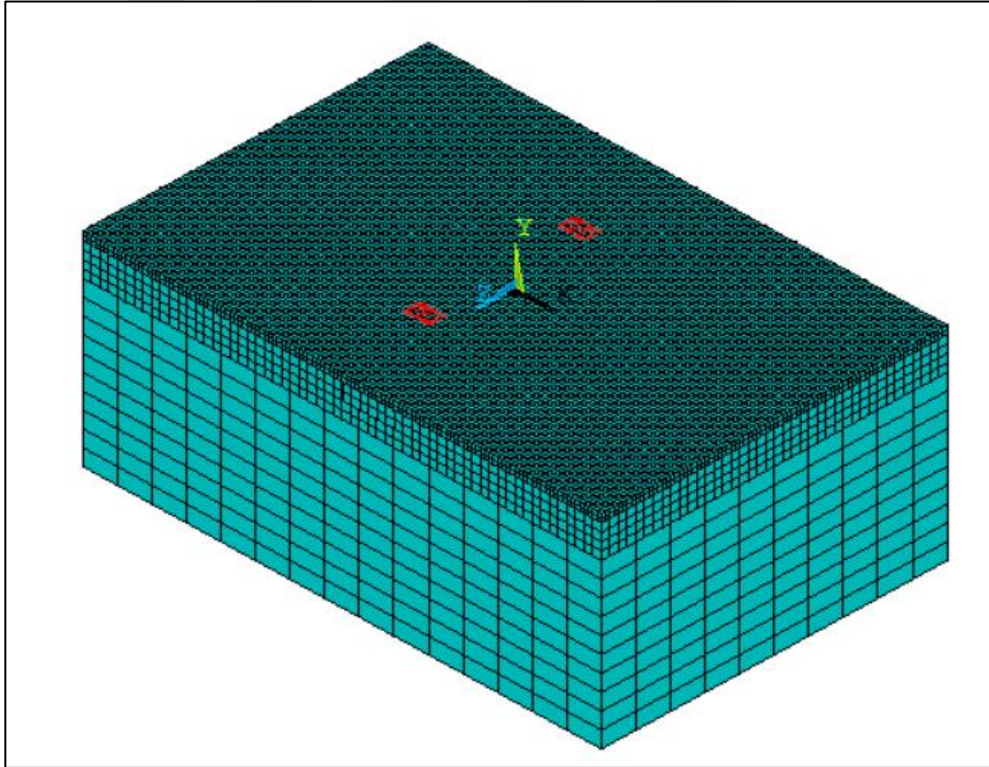
Tüm tabakaların malzeme özellikleri lineer, elastik ve izotropik olarak modellemiştir (elastisite modülü ve Poisson oranı ile tanımlanan malzeme) (Sobhan ve Tandon, 2011; Lytton vd., 2010). Asfalt tabakanın elastisite modülü sıcaklığa bağlı olduğundan dolayı (sıcak havalarda düşük elastisite modül ve soğuk havalarda yüksek elastisite modül) ve asfalt karışım özelliklerine bağlı olduğundan dört farklı asfalt modülü dikkate alınmıştır. Üç farklı beton modülü de dikkate alınmıştır. Tablo 3.1'de, tabakaların malzeme özellikleri verilmektedir.

Tablo 3. 1. Kaplamanın malzeme özellikleri.

Tabaka	Elastisite modülü, MPa	Poisson oranı
Asfalt	2000,3500,5000,10000	0.35
Beton	34000, 28000, 20000	0.20
Temel	250	0.40
Zemin	150	0.45

3.1.2. Sonlu Elemanlara Ayırma (Meshing)

Modelin sonlu eleman boyutu ve kalitesi, sonucun doğruluğunu etkiler. Araştırmalar, ince mesh analiz etmek için çok zaman gerektirse de daha doğru sonuçlar verdiğini göstermiştir. Bu çalışmada, üst tabakalar için ince ve zemin tabaka için nispeten kaba bir “mesh” kullanılmıştır (Williamson, 2015).



Şekil 3. 4. Model “mesh”i.

3.1.3. Tabakaların Ara Yüz Temaslarının Modellenmesi

Bu çalışmanın temel amaçlarından biri de, asfalt tabakanın ile mevcut beton kaplama arasındaki temas yüzlerinin durumunun gerilmeler ve şekil değiştirmeler üzerindeki etkilerini incelemektir. ANSYS sonlu elemanlar programında ara yüzey temaslar çift (Pair) elemanlarıyla temsil edilir. "node – surface" veya "surface – surface" opsiyonları kullanılabilir. Bu çalışmada, yüzey – yüzey "surface – surface" temas opsiyonu kullanılmıştır. Yüzey – yüzey temas modellemek için, birkaç seçenek bulunmaktadır. Bunlar, "standard", "rough", "bonded", "always bonded" ve "no separation". Bu çalışmada, tam bağlı ara yüzler için "always bonded" seçilmiş, yapışık olmayan yüzeyler için ise "standard" ve sürtünme katsayısı sıfır (No friction) atayarak modellenmiştir. Bu modelde, mevcut kaplamadaki tüm tabakaları tam yapışık yani "always bonded" olarak modellenmiş. Asfalt/beton teması yapışık "bonded" ve yapışık olmayan "standard" (sürtünme katsayısı sıfır) olarak modellenmiştir (Ansys Ins, 2013).

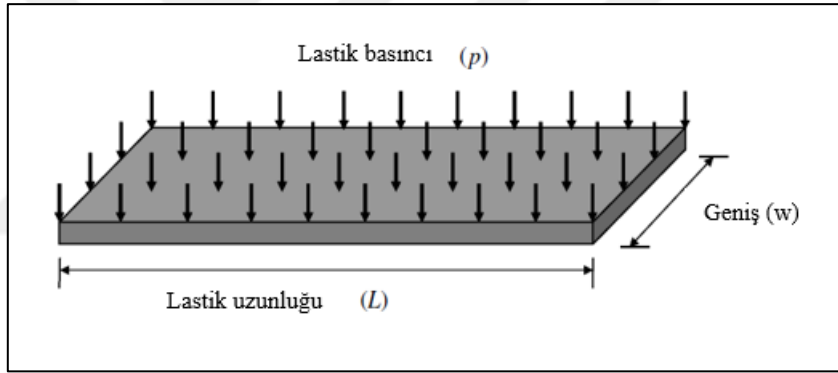
3.1.4. Mesnetleme ve Yükleme

Bu modelin mesnetlemesi en alttaki tabakanın tüm düğümler her doğrultuda ankastre tutturulurken, yanlardaki düğümler X ve Z yönünde yatay hareketi engellemek için sabitlenmiştir (Williamson, 2015).

Varsayılan trafik yükü, 689 KPa lastik basıncıyla 80 KN'lik standart bir dingil yüküdür (Lytton vd., 2010). Bu çalışmada tek lastik temas alanına yakın boyutlara sahip dikdörtgen alanlara uygulanan eşit yayılı basınç olarak etki ettirilmiştir. Standart bir dingil yükünün tipik özellikleri Tablo 3.2'de verilmiştir. Bu çalışma için statik bir dingil yükü tek lastik seçildi. Lastik uzunluğu aşağıdaki gibi belirlenebilir.

Tablo 3. 2. Standar dingil yükleri (Lytton vd., 2010).

Dingil Tipi	Tekerlek	Tekerlek genişliği in. (m)	Başınç PSI(KPa)	Dingil yükün ağırlığı lb. (KN)
Tek	Tek	7.874 (0.18)	40 (276) 120 (827)	3,000 – 40,000 (13.3 – 177.9) 1000lb de bir
	Çift	8.74 (0.20)	120 (827)	
Tandem	Tek	7.874 (0.18)	120 (827)	6,000 – 80,000 (26.6 – 355.8) 2000lb de bir
	Çift	8.74 (0.20)	120 (827)	
Tridem	Tek	7.874 (0.18)	120 (827)	12,000 – 102,000 (53.4 – 453.7) 3000lb de bir
	Çift	8.74 (0.20)	120 (827)	
Quadrem	Tek	7.874 (0.18)	120 (827)	12,000 – 102,000 (53.4 – 453.7) 3000lb de bir
	Çift	8.74 (0.20)	120 (827)	

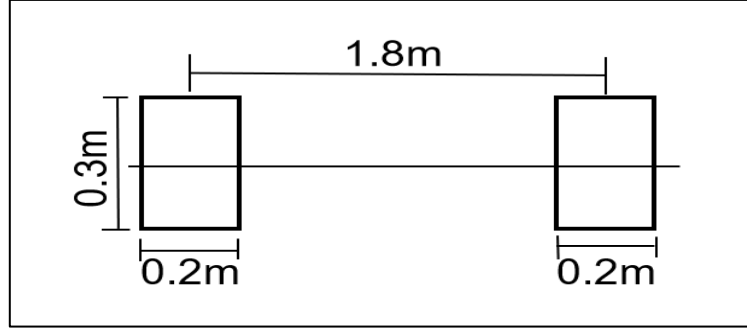


Şekil 3. 5. Kaplama yüzeyine uygulanan basınç (Lytton vd., 2010).

Bu çalışma için statik bir dingil yükü tek lastik seçildi. Lastik uzunluğu aşağıdaki gibi belirlenebilir:

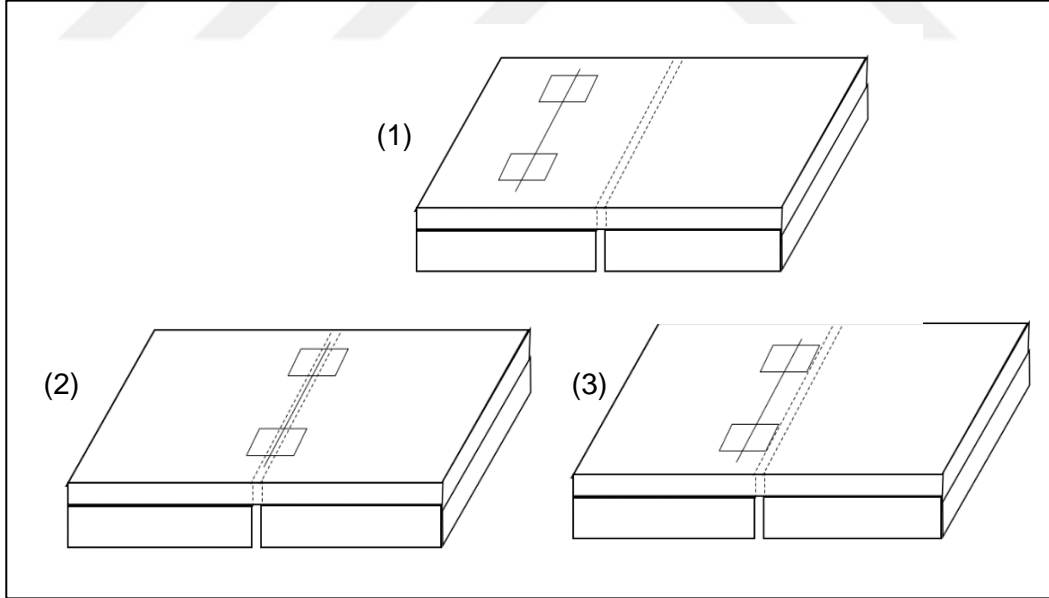
$$\text{Lastik Uzunluğu (m)} = \frac{\text{lastik yükü (N)}}{\text{lastik basıncı (Pa)} \times \text{lastik genişliği (m)}} \quad (3.1)$$

Tabloda verilen ve Formül 3.1'e konulan lastik genişliğinin değerini kullanarak, 0.3 m x 0.2 m'lik lastik temas alanı dikkate alınmıştır. Lastiklerin merkezden merkeze uzaklığı 1,80 m seçilmiştir.



Şekil 3. 6. Dingil yükü ve tekerlek boyutları.

Dingil yükünün kaplamada oluşan gerilmeleri üzerindeki kritik pozisyonunu bulmak için, dingil yükü Şekil 3.7'de gösterildiği gibi beton tabakadaki derzler, bağlantıya göre kaplama yüzey üzerinde üç farklı pozisyonda yerleştirilmiştir. İlk olarak, dingil yükü, beton plakanın ortasının üstüne yerleştirilmiş, sonra tam derz üstüne yerleştirildi ve son olarak yükü derz kenarında dingil yükü yerleştirilmiş, kaplamanın genişliğine göre ortalanmıştır.

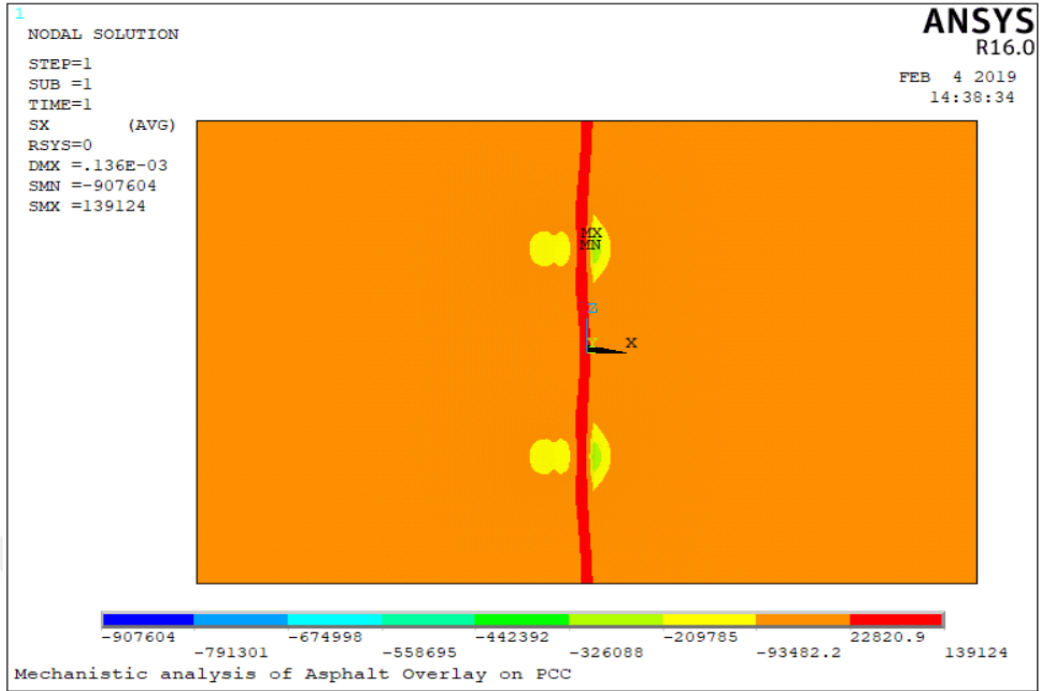


Şekil 3. 7. Dingil yükü pozisyonları.

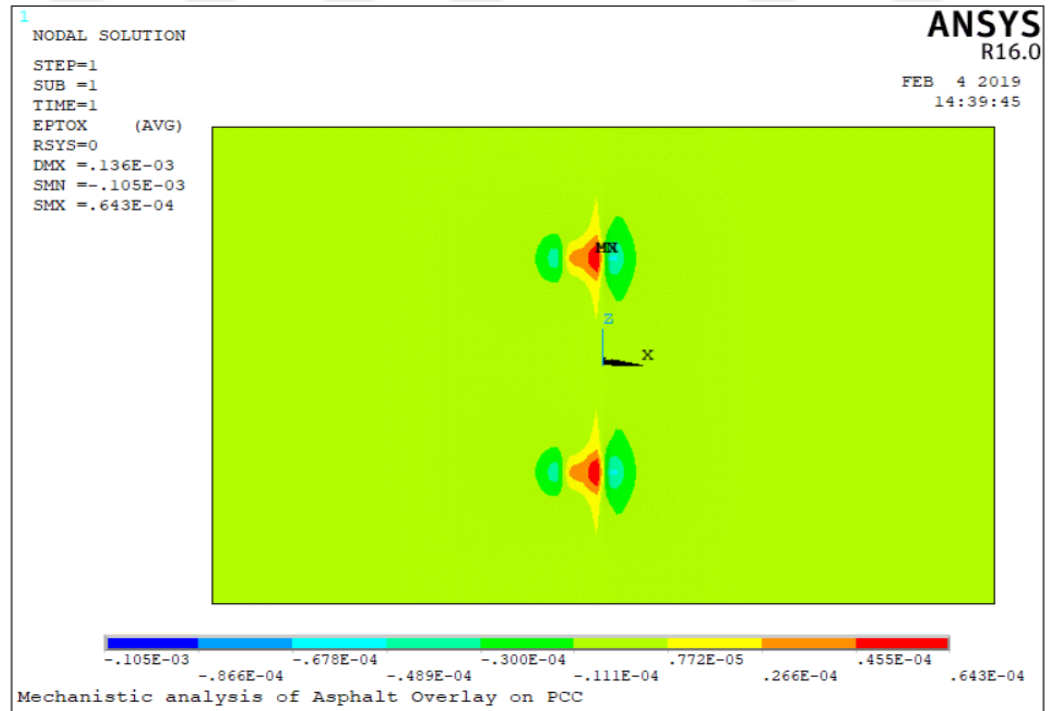
4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmanın amacı, ANSYS yazılımını kullanarak statik bir trafik dingil yükü ile yüklenmiş beton üstü asfalt kaplama yapısının mekanik tepkilerini temsil edecek bir 3B sonlu elemanlar geliştirmektir. İncelenen tepkiler, asfalt kaplamanın altındaki maksimum yatay çekme gerilmeler (tensile stress) ve şekil değiştirmeler (tensile strain). Dingil yükü üç farklı pozisyona yerleştirildi. Bununla birlikte, kritik pozisyonun derzin kenarındaki yerleştirildiği yükü olduğunu tespit edildi. Ayrıca, bu pozisyonda, boyuna çekme gerilme (longitudinal tensile stress) ve boyuna şekil değiştirme (longitudinal tensile strain) enine olandan daha kritik olduğu gösterilmiştir. Bu nedenle, derz kenarı yüklemesi altındaki gerilmeler incelenmiştir.

Kritik gerilmeleri, farklı asfalt kalınlığı, asfalt modülü, mevcut beton modülü, derz boyutu, asfalt ve beton tabakaların arasındaki ara yüz bağ koşulu (yapışık/yapışık olmayan) için hesaplandı. Çalışmanın sonunda kayma donatı etkisi de analiz edildi. Tüm parametrelerin etkisi farklı asfalt kalınlıklarda gerçekleştirilmiştir. Tüm bu parametrelerdeki değişimlerin göz önüne alındığında, bu çalışma toplam 58 modelin analiziyle sonuçlandı. Asfalt tabakanın altındaki boyuna çekme gerilme ve şekil değiştirmeler kontur diyagramları sırasıyla Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de gösterilmektedir. Şekillerdeki farklı renkler, farklı gerilme seviyelerini temsil eder. Örneğin, kırmızı yüksek (çekme +) gerilmeyi temsil ederken mavi renk ise en düşük (basınç -) gerilmeyi temsil etmektedir.



Şekil 4. 1. Asfalt tabakanın altında boyuna yatay gerilme kontur diyagramı.



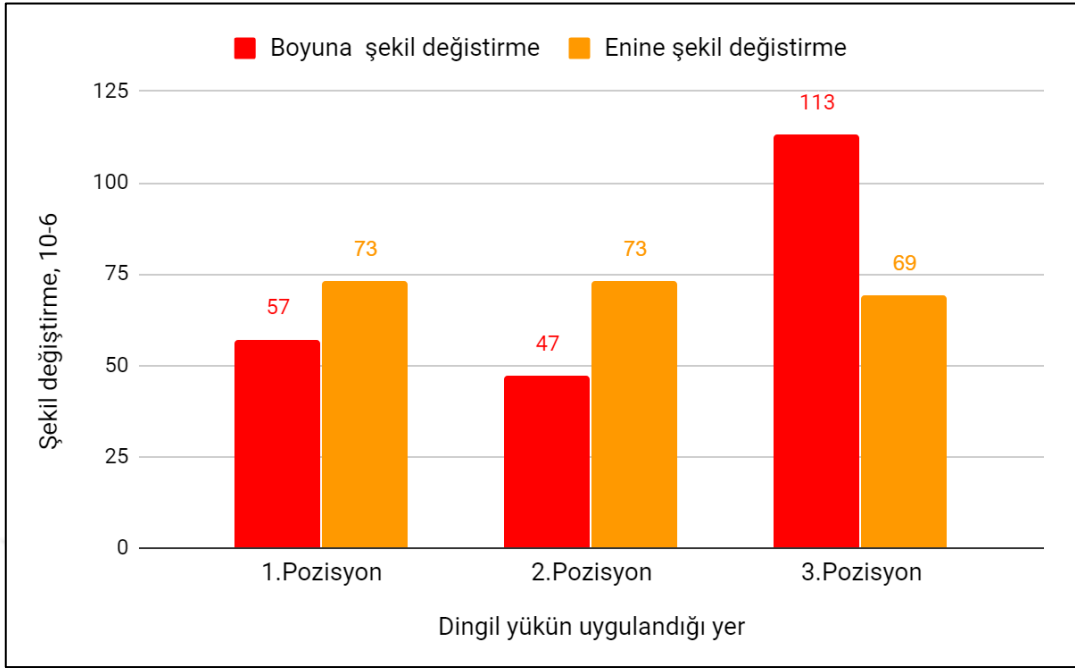
Şekil 4. 2. Asfalt tabakanın altında boyuna şekil değıştirme kontur diyagramı.

4.1. Kritik Dingil Yükün Konumu

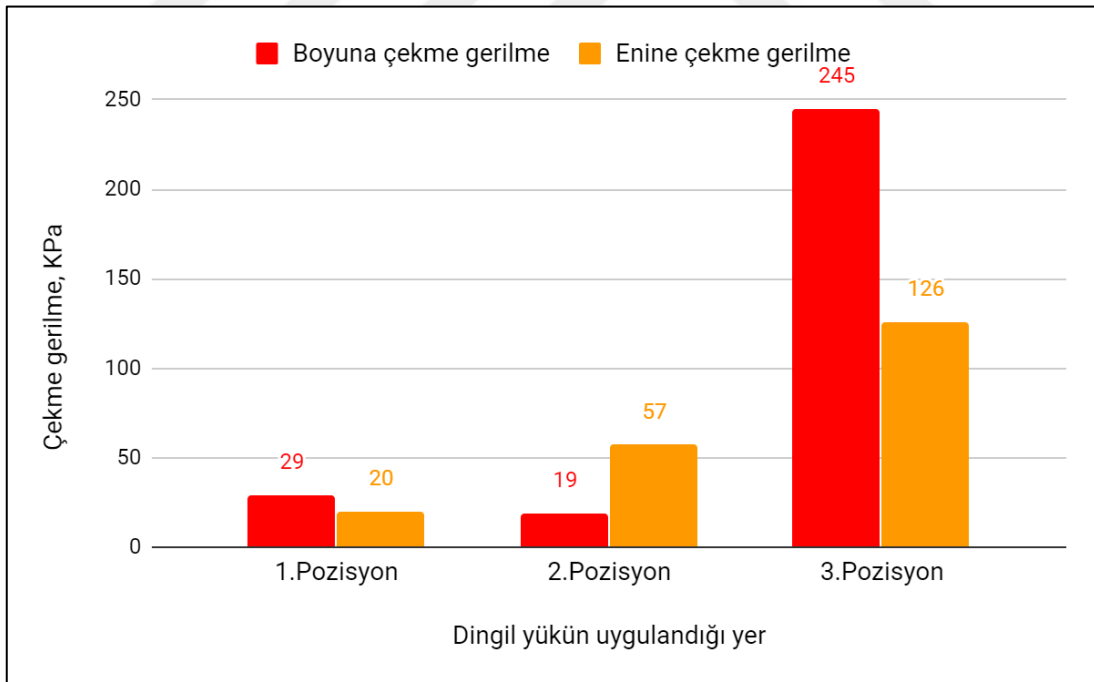
Beton üstü asfalt tabakanın altında maksimum kritik gerilmeleri belirlemek için trafik dingil yükü beton tabakada üç farklı pozisyona yerleştirilmiştir. Dingil yükünün derz üzerindeki etkisinin anlaşılması amacıyla, dingil yükü, derzden uzak bir pozisyona yerleştirildi. Şekil 4.3 ve Şekil 4.4, farklı dingil yük konumları için asfalt kaplama altındaki çekme gerilmeleri ve şekil değiştirmeleri göstermektedir.

Analiz sonuçları, dingil yükünün kritik pozisyonunun yükün derzin kenarında uygulandığı zaman olduğunu göstermiştir. Bu pozisyonda, boyuna (X-doğrultusu) çekme gerilme ve şekil değiştirmenin enine doğrultudakinden (Z-doğrultusu) daha kritik olduğu anlaşılmıştır. Ayrıca bu pozisyonda sırasıyla X-doğrultusundaki (ϵ_x) ve Z-doğrultusundaki (ϵ_z) çekme şekil değiştirme için 113.10^{-6} ve 69.10^{-6} değerlerine ulaşılmıştır. X-doğrultusundaki (σ_x) ve Z-doğrultusundaki (σ_z) çekme gerilmeleri sırasıyla 245 KPa ve 126 KPa bulunmuştur. Farklı pozisyonlardaki X-doğrultusundaki çekme şekil değiştirme 73.10^{-6} (ilk iki pozisyon için) ve 113.10^{-6} bulunmuştur. X doğrultusundaki çekme gerilmeleri ise sırasıyla 19, 29 ve 245 KPa birinci, ikinci ve üçüncü pozisyonlar için bulunmuştur. Çekme gerilmeleri, dingil yükünün uygulama yeri şekil değiştirmeden daha duyarlı olduğunu gösterilmiştir. Ayrıca dingil yükünün uygulama yerine bağlı olarak X-doğrultusundaki gerilme büyüklüğünün değişimi varyasyonunda %92 değişim görülmüştür. X-doğrultusundaki çekme şekil değiştirme büyüklüğünün değişimi ise %64 olarak bulunmuştur.

İlerdeki çalışmalarda “gerilme” asfalt tabakanın altında X-doğrultusundaki çekme gerilmeleri temsil ettiği ve “şekil değiştirme” asfalt tabakanın altında X-doğrultusundaki çekme şekil değiştirme temsil etmektedir.



Şekil 4. 3. Asfalt tabakanın altında şekil değiştirme-dingil yükü pozisyonu ilişkisi.



Şekil 4. 4. Asfalt tabakanın altında çekme gerilme - dingil yükü pozisyonu ilişkisi.

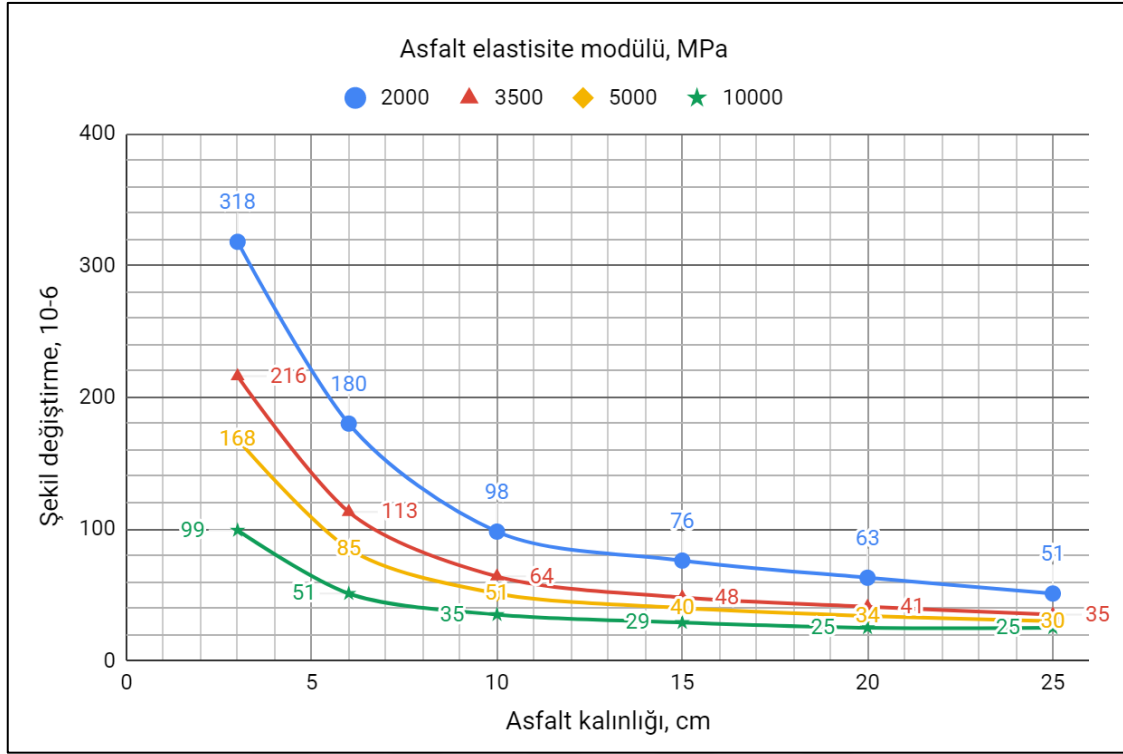
4.2. Asfalt Kaplama Kalınlığının ve Modülünün Etkisi

Şekil 4.5 ve Şekil 4.6, farklı asfalt modülü ve asfalt tabaka kalınlıkları için asfalt tabakanın altında oluşan gerilme ve şekil değiştirmelerdeki değişimleri göstermektedir. Asfalt elastisite modülü 2000 MPa, 3500 MPa, 5000 MPa ve 10000 MPa ve asfalt tabakanın kalınlığı 3 cm, 6 cm, 10 cm, 15 cm, 20 cm ve 25 cm olarak seçilmiştir. Asfalt ve beton tabakaların yapışık olarak, asfalt kalınlığı ve modülü değerlerindeki değişikliklerinden dolayı şekil değiştirmeler $25 \cdot 10^{-6}$ ila $318 \cdot 10^{-6}$ arası değiştiği ve çekme gerilmelerinin ise 25 KPa ila 768 KPa arası değiştiği tespit edilmiştir. Beton üstü asfalt kaplamalarda, asfalt tabakanın kalınlığı ve modülü değişimlerden dolayı kaplamanın mekanik tepkileri etkisini gösterdiğini görüyoruz. Bu sonuç beton üstü asfalt kaplamanın performansı asfalt tabakasının özelliklerine çok bağlı olduğunu gösterilmiş.

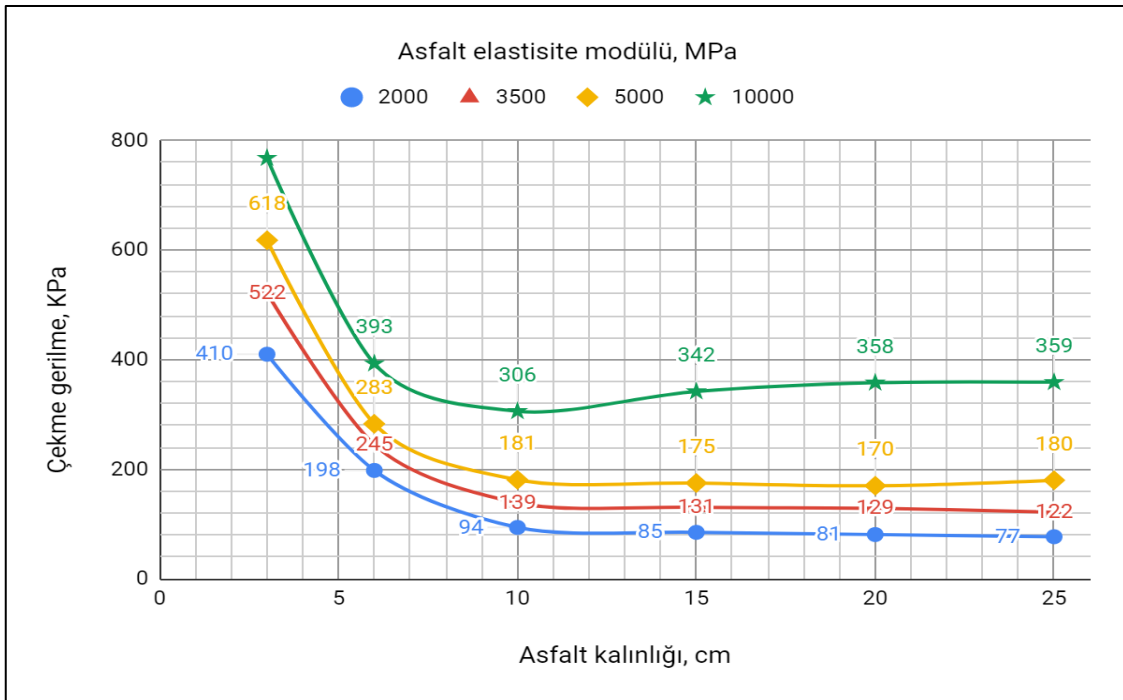
şekil değiştirme söz konusu olduğunda, asfalt modülü değerleri aynı tabakalar için, asfalt tabakanın kalınlığını artırıldığında şekil değiştirmelerin azaldığı tespit edilmiştir. Bunun tersi de geçerlidir, yani asfalt malzeme modülü arttıkça kaplamanın altındaki şekil değiştirme değerleri de azalır. Örneğin, asfalt modülünü 2000 MPa'dan 10000 MPa'ya yükseltirken, 10 cm'lik bir asfalt tabaka kalınlığı için, şekil değiştirmenin yaklaşık % 64 azaldığı hesaplanmıştır. Diğer taraftan, asfalt tabakanın kalınlığını 3 cm'den 25 cm'ye yükseltilmesi durumunda 3500 MPa'lık asfalt modülü için, şekil değiştirme yaklaşık % 84 azalmıştır. Grafikten görüleceği üzere, asfalt kalınlığı 10 cm'den büyük olduğunda, asfalt modülündeki değişime bağlı olarak şekil değiştirmelerin azaldığı belirtilebilir. Örneğin, asfalt modülünü 2000 MPa'dan 10000 MPa'ya yükseltilmesi durumunda 6 cm'lik bir asfalt kalınlığı için türün büyüklüğü yaklaşık %71 azalırken, 20 cm için yaklaşık %60 azalır.

Çekme gerilmesi için genelleme yapılacak olursa, asfalt kalınlığını artarken gerilme büyüklüğü azalır diyebiliriz. Bununla birlikte, şekil değiştirme farklı olarak, asfalt modülü arttığında çekme gerilme büyüklüğü artar. Örneğin, asfalt kalınlığını 3 cm'den 25 cm'ye yükselterek 3500 MPa'lık bir asfalt modülü için, çekme gerilme büyüklüğü yaklaşık % 70 oranında azalır. Öte yandan, asfalt modülünü 2000 MPa'dan 10000 MPa'ya yükseltirken 10 cm'lik bir AC kalınlığı için çekme gerilme % 225 artmaktadır.

Sonuç olarak, düşük modüle sahip kalın bir asfalt tabaka, yüksek modüle sahip ince asfalt kaplamaya göre çekme gerilimi açısından daha iyi performans sağlayabileceği anlaşılmaktadır.



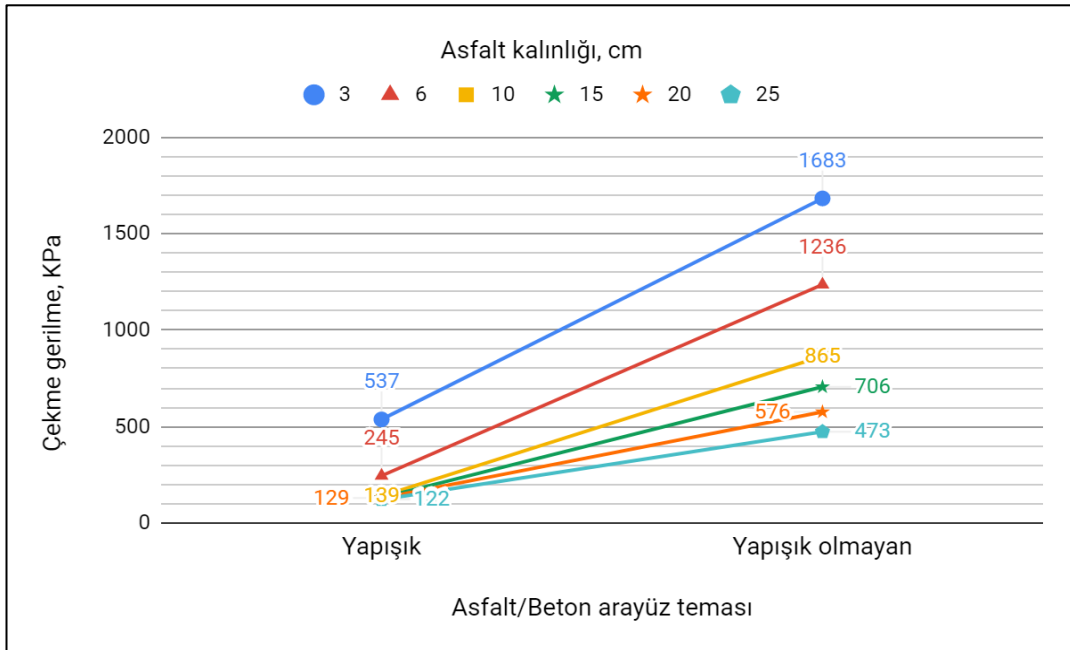
Şekil 4. 5. Farklı asfalt modülleri için, asfalt tabakanın altında boyuna şekil değıştirme- asfalt kalınlığı ilişkisi.



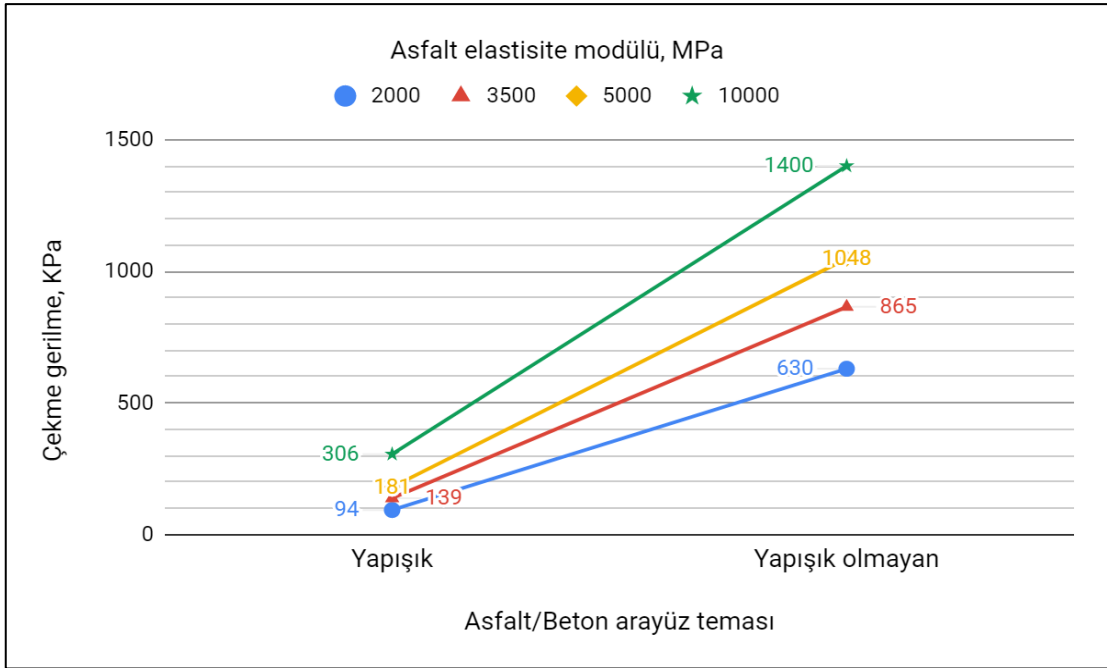
Şekil 4. 6. Farklı asfalt modülleri için, asfalt tabakanın altında boyuna çekme gerilme - asfalt kalınlığı ilişkisi.

4.3. Asfalt ve Beton Tabakaların Arasındaki Bağın Etkisi

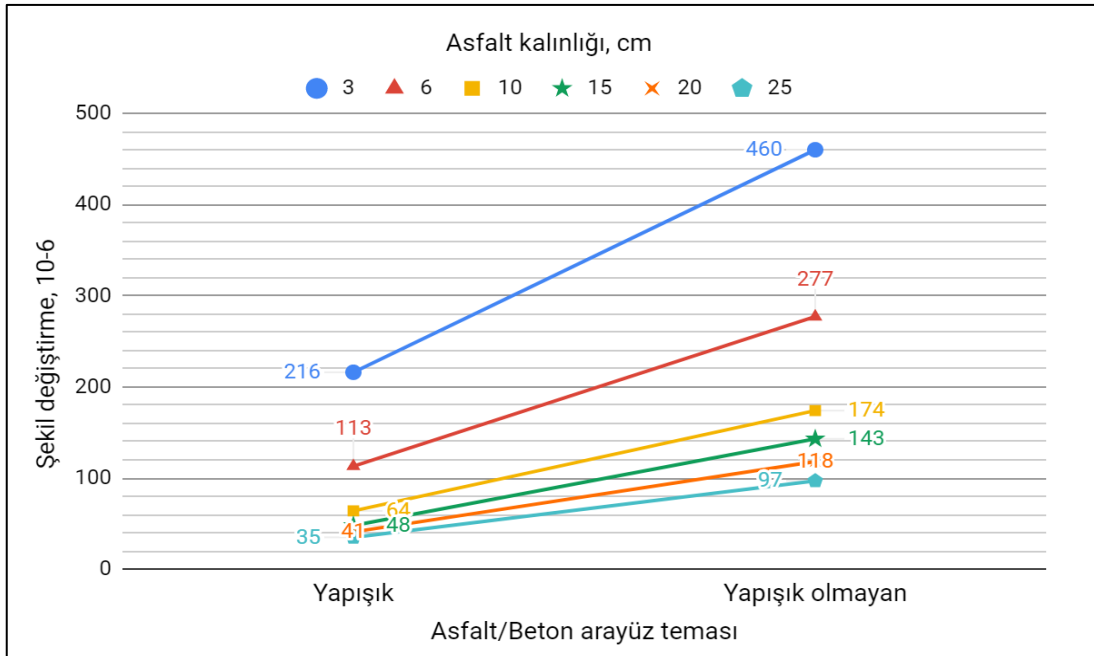
Bu çalışmanın amaçlarından birisi de asfalt ile beton tabakaların arasındaki bağın trafik yüklerinden dolayı oluşan gerilmeler üzerindeki etkisini araştırmaktır. Asfalt/beton ara yüz bağlantı koşulu (yapışık /yapışık olmayan), kaplamanın performansını etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Yapışık asfalt ve mevcut beton kaplama bir tek yapı gibi davranır ve yüklerin önemli bir bölümünü beton tabakası taşır. Oysaki yapışık olmayan beton yalnızca asfalt kaplaması için bir temel sağlar. Asfalt/beton arasındaki bağ koşulunun, asfalt tabakanın altındaki gerilme ve şekil değiştirme üzerindeki etkisi, Şekil 4.7 ile Şekil 4.10'da göstermektedir. Bu çalışmanın sonuçları, yükün neden olduğu gerilme ve şekil değiştirmelerin asfalt kalınlığı veya modülünden bağımsız olarak asfalt/beton arasındaki bağ koşulundan önemli ölçüde etkilendiğini göstermiştir. Asfalt ile beton tabaka tam yapışık durumdan yapışık olmayan duruma geçişte asfalt altındaki çekme gerilmenin değeri asfalt modülüne ve kalınlığına bağlı olarak en az % 213 ve % 570'a kadar yükselmiştir. Şekil değiştirme ise en az % 113 ve % 198'e yükselmiştir. Örneğin, 6 cm ve 3500 MPa'lık bir asfalt tabaka için, yapışık ve yapışık olmayan asfalt/beton ara yüzleri sırasıyla, şekil değiştirme değerleri için $113 \cdot 10^{-6}$ ve $277 \cdot 10^{-6}$ ve çekme gerilme değerleri 245 KPa ve 1236 KPa olarak hesaplanmıştır.



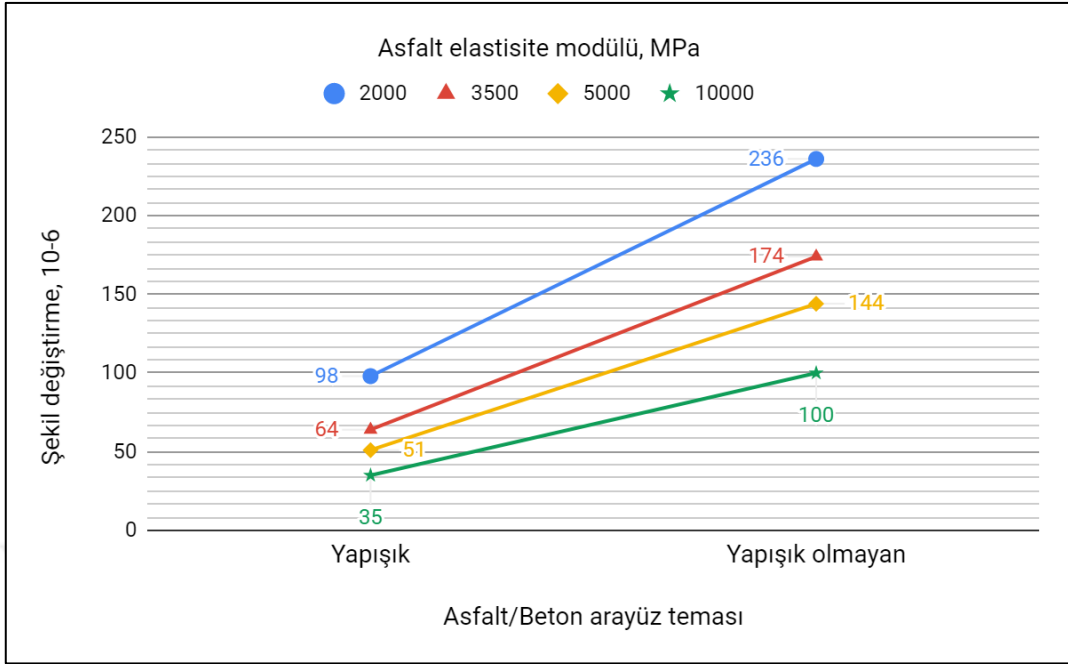
Şekil 4. 7. 3500 MPa asfalt modülü ve farklı asfalt kalınlıkları için, asfalt tabakanın altında boyuna çekme gerilme - asfalt/beton ara yüz temas durumu (yapışık yapışık olmayan) ilişkisi.



Şekil 4. 8. 10 cm asfalt kalınlığı ve farklı asfalt modülleri için, asfalt tabakanın altında boyuna çekme gerilme - asfalt/beton arayüz temas durumu ilişkisi.



Şekil 4. 9. 3500 MPa asfalt modülü ve farklı asfalt kalınlıkları için, asfalt tabakanın altında boyuna şekil değiştirme - asfalt/beton arayüz temas durumu ilişkisi.

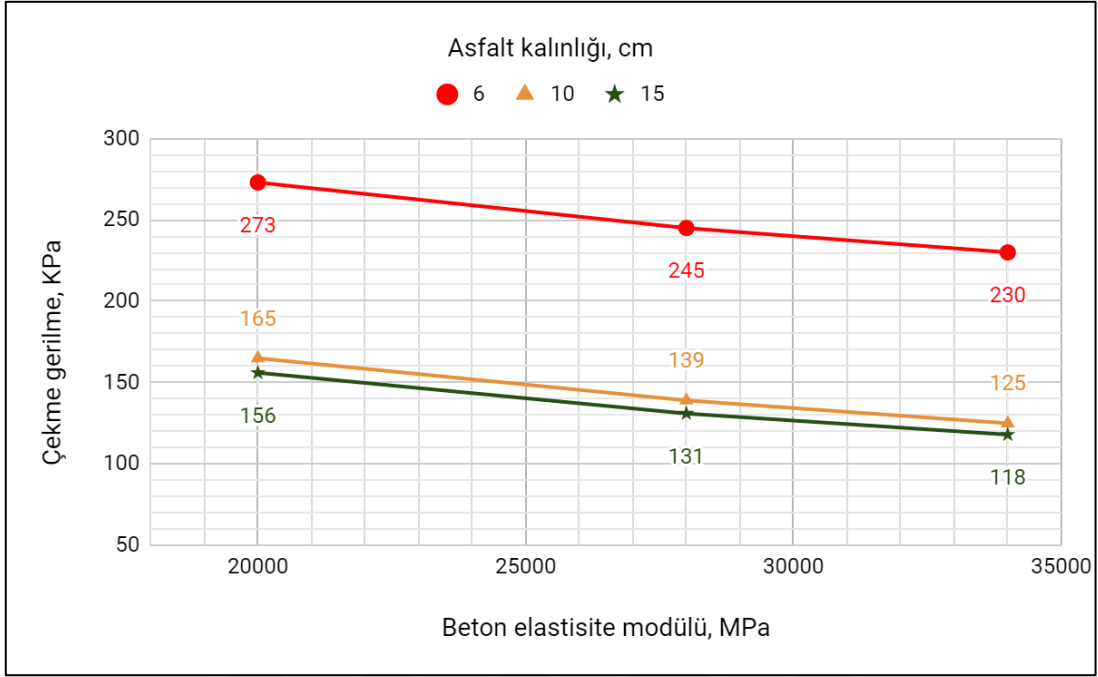


Şekil 4. 10. 10 cm asfalt Kalınlığı ve farklı asfalt modülleri için, asfalt tabakanın altında boyuna şekil değiştirme - asfalt/beton arayüz teması durumu ilişkisi.

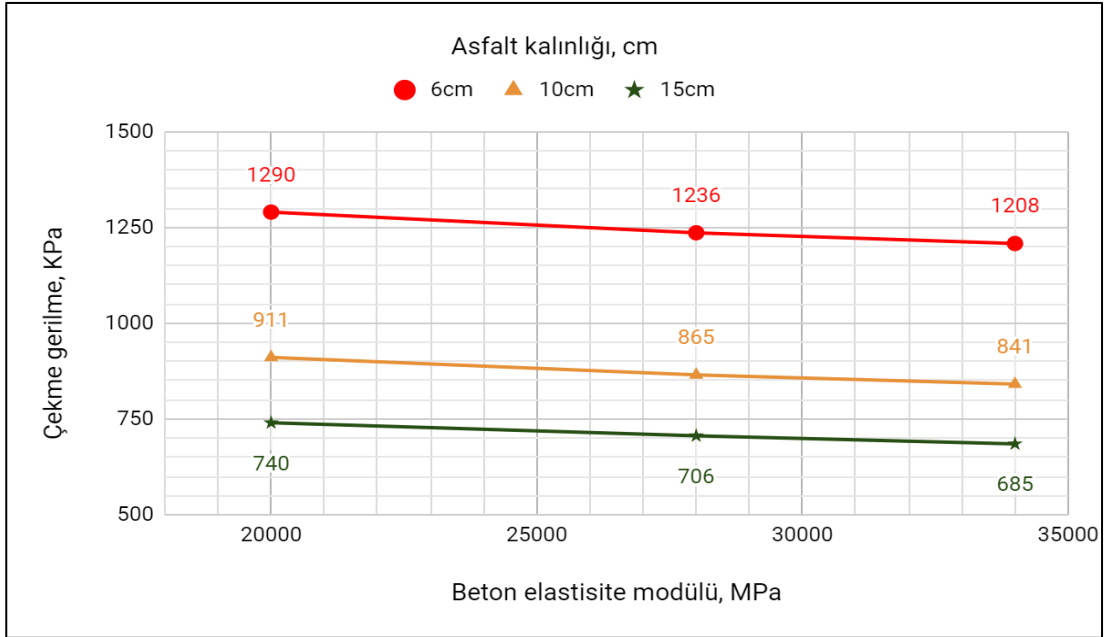
4.4. Beton Plaka Modülünün Etkisi

Mevcut beton kaplamanın mukavemetinin etkisi incelenmesi üç farklı beton modülü ile gerçekleştirilmiş: 20000 MPa, 28000 MPa ve 34000 MPa. Bu incelenme yapılırken, farklı asfalt/beton bağ durumları, farklı asfalt kalınlıkları (6 cm, 10 cm ve 15 cm) dikkate alınmıştır. Asfalt modülü 3500MPa imiş. Beton modülünün asfalt tabakanın altında çekme gerilme ve şekil değiştirme üzerindeki etkisi, Şekil 5.11 ile Şekil 5.14'te göstermektedir. Analizin sonuçları, beton modülünü azaltarak yapışık ve yapışık olmayan ara yüzler için asfalt tabakasının altındaki gerilme ve şekil değiştirmelerin arttığını göstermiştir. Yapışık asfalt/beton göre karşılaştırma yapıldığında; yapışık olmayan asfalt/beton kaplamalarda betonun modülündeki değişimin, gerilmelere olan etkisinin daha az olduğu tespit edilmiştir. Bunun sebebi, bu şartlar altında asfalt ile beton tabakaların yük aktarmaları çok az dolayısıyla beton tabakanın özellikleri asfalttaki gerilmeleri daha az etkilemektedir. Çekme gerilme, şekil değiştirme beton modülündeki değişimlerden önemli ölçüde etkilenmektedirler. Beton modülünün 34000 MPa'dan 20000 MPa'ya düşürülmesiyle yapışık asfalt/beton için, çekme gerilme değeri 6 cm asfalt için % 19, 10 cm ve 15 cm AC için % 32 artış gözlemlenmiştir. Yapışık olmayan asfalt/beton için 6 cm asfalt için %7 artmıştır, 10 cm ve 15 cm AC için % 8 artmıştır. şekil değiştirmenin ise yapışık asfalt/beton

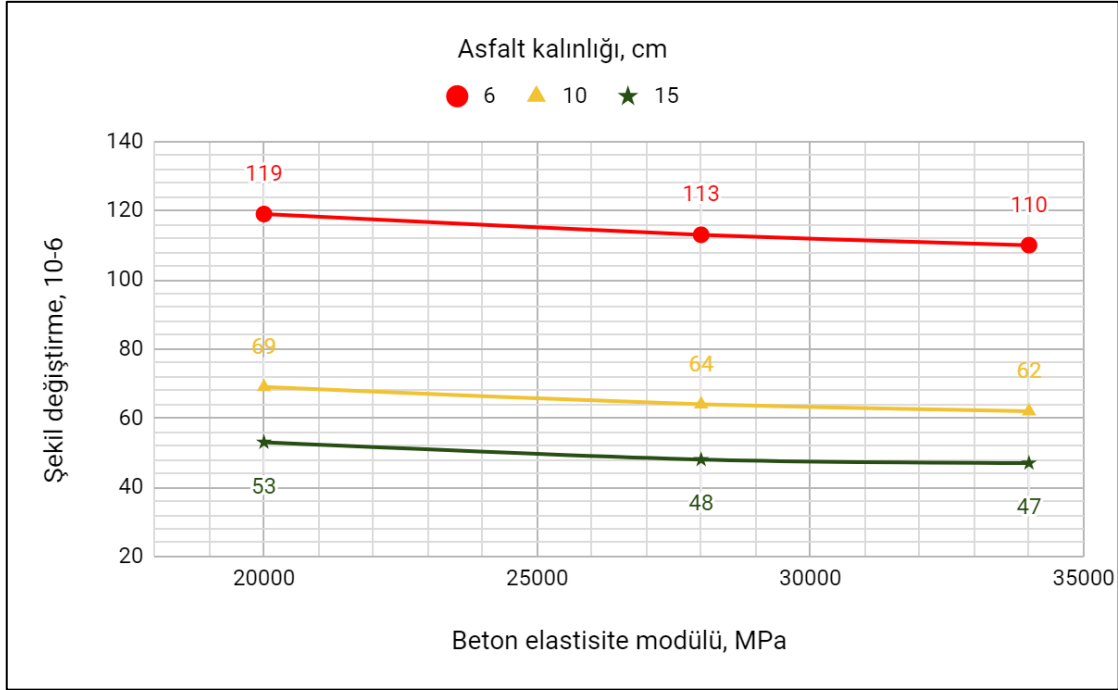
için, 6 cm, 10 cm ve 15 cm asfalt kalınlığı için sırasıyla % 8, % 11 ve % 13 artmıştır. Yapışık olmayan asfalt/beton ise, 6 cm asfalt kalınlığı için % 6, 10 cm ve 15 cm için % 7 artmıştır.



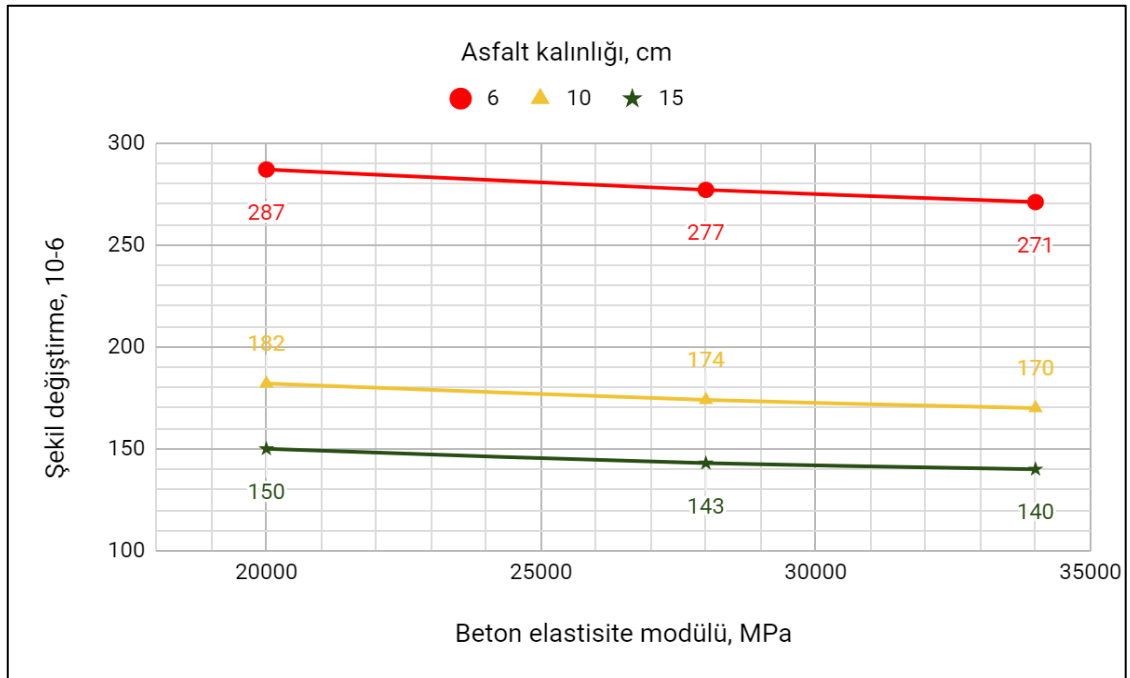
Şekil 4. 11. Yapışık asfalt/beton, farklı asfalt kalınlıkları için, asfalt tabakanın altında boyuna çekme gerilme - beton modülü ilişkisi.



Şekil 4. 12. Yapışık olmayan asfalt/beton, farklı asfalt kalınlıkları için, asfalt tabakanın altında boyuna çekme gerilme - beton modülü ilişkisi.



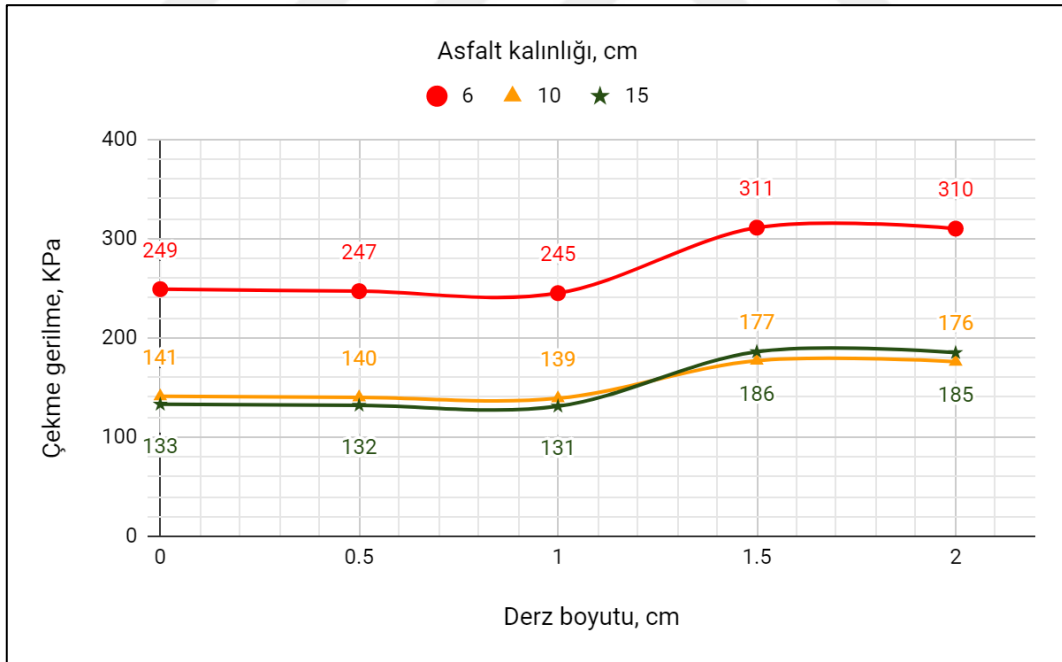
Şekil 4. 13. Yapışık asfalt/beton, farklı asfalt kalınlıkları için, asfalt tabakanın altında boyuna şekil değıştirme - beton modülü ilişkisi.



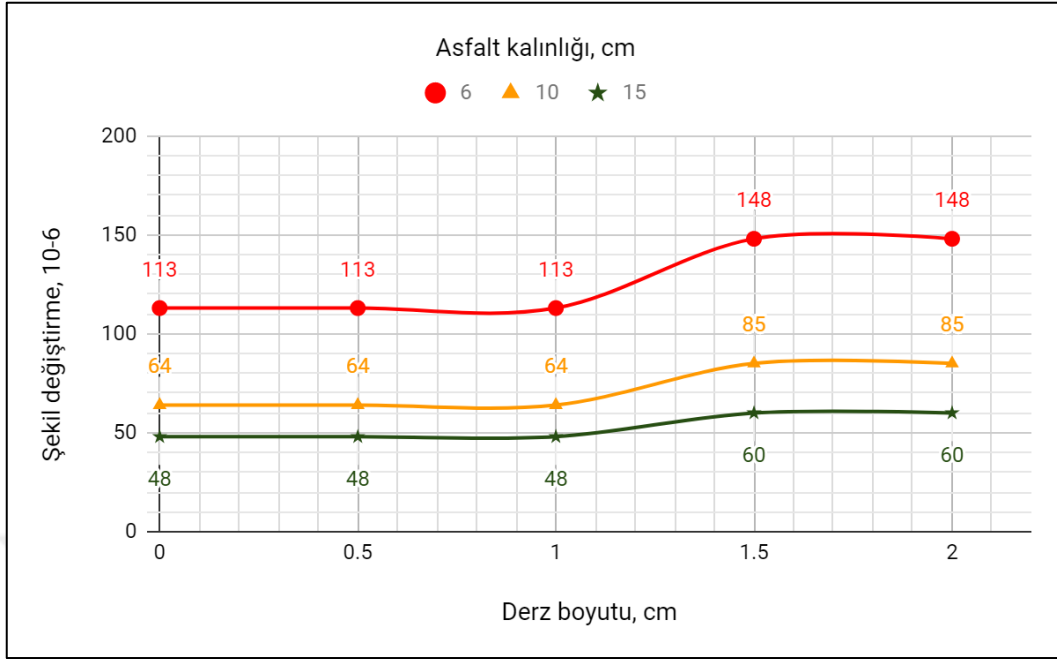
Şekil 4. 14. Yapışık olmayan asfalt/beton, farklı asfalt kalınlıkları için, asfalt tabakanın altında boyuna şekil değıştirme - beton modülü ilişkisi.

4.5. Beton Plakaların Derz Boyutunun Etkisi

Şekil 4.15 ve Şekil 4.16, derz boyutunun etkisini, asfalt tabakanın altındaki çekme gerilme ve şekil değiştirme açısından, 3500MPa asfalt modülü, yapışık asfalt/beton, ve farklı asfalt kalınlıkları için göstermektedir. Şekil 4.15 ve Şekil 4.16'da gösterildiği gibi, derz boyutu 0 cm'den 1 cm'ye yükseltirken, tüm gerilmelerin değerleri aynı kalınlık için değişmedi. Şekil değiştirme değeri, sırasıyla 6 cm, 10 cm ve 15 cm asfalta tabaka kalınlığı için $113 \cdot 10^{-6}$, $64 \cdot 10^{-6}$ ve $48 \cdot 10^{-6}$ olarak bulundu. Bununla birlikte, derzi genişliği 1 cm den 1.5 cm veya 2 cm'ye çıkarıldığında, şekil değiştirme değerleri 6 cm, 10 cm ve 15 cm asfalt kalınlığı için sırasıyla %24, %33 ve %25 artmıştır. Derzi genişliği 1cm den 2 cm'ye çıkarıldığında, çekme gerilme değeri 6 cm için % 27, 10 cm ve 15 cm asfalt kalınlığı için %42 artmıştır. Dolayısıyla, trafik yükü nedeniyle bir beton üstü asfalt kaplamasının altındaki gerilmeleri azaltmak için, beton kaplamanın çatlak veya derzlerin 1 cm'den daha geniş olmamasında fayda vardır. Bununla birlikte, ısı (termal) gerilmelerin de dikkate alınması önemlidir, çünkü derzler zaten bunlar için yapılmaktadır.



Şekil 4. 15. Farklı asfalt kalınlıkları için, asfalt tabakanın altında boyuna çekme gerilme-derz boyutu ilişkisi.



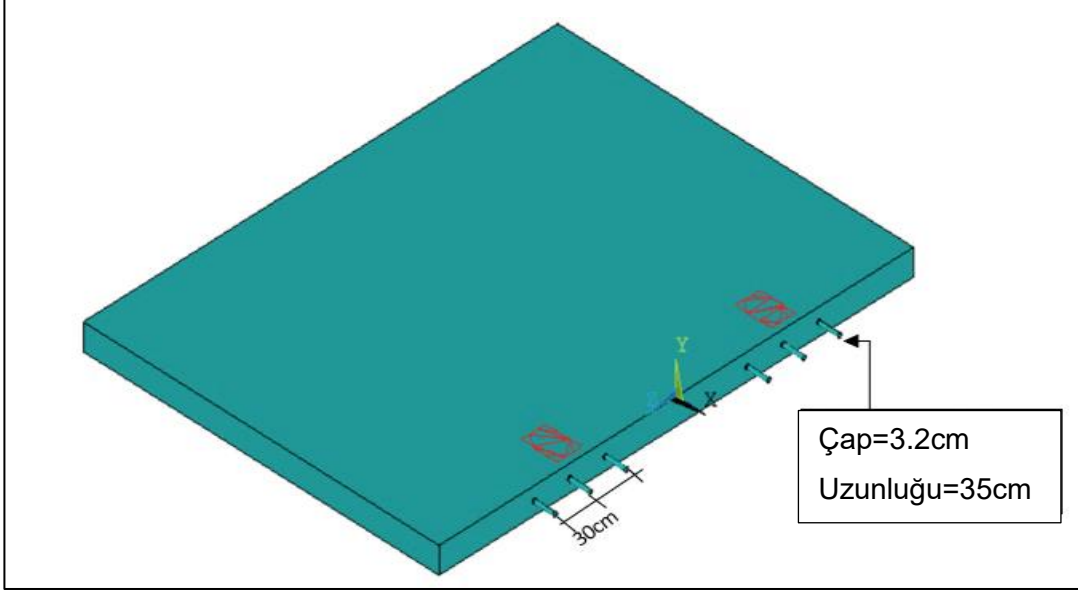
Şekil 4. 16. Farklı asfalt kalınlıkları için, asfalt tabakanın altında boyuna şekil değişim-derz boyutu ilişkisi.

4.6. Beton Plaka Arası Kayma Donatılarının Kullanımının Etkisi

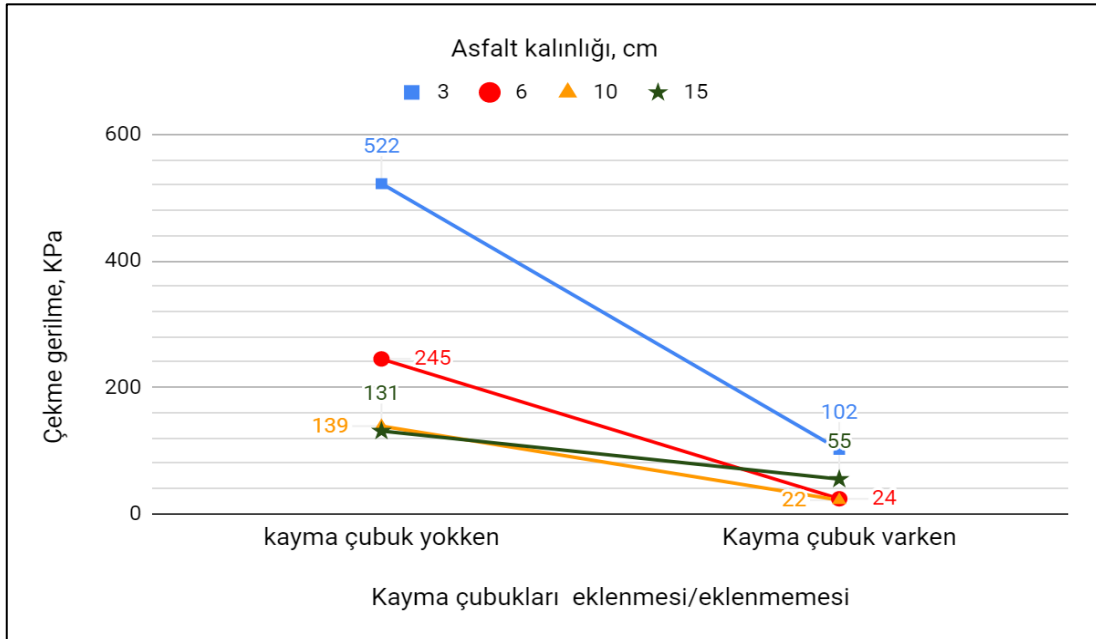
Trafik yükünden dolayı mevcut beton plakaların dikey hareketler oluşumundan dolayı asfalt tabakanın altında aşırı çekme gerilmeler meydana gelmektedir. Kayma donatıları, bu dikey hareketleri azaltmak ve ayrıca plakaların arasında yeterli yük transferi sağlamak için kullanılır ve böylece yansıma çatlakların oluşma ihtimalini azaltır. ACPA'nın önerilerine dayanarak (ACPA, 2006), sonlu eleman analizi için kayma donatıları tekerlek geçiş yeri altında yerleştirilmiştir. Bu çalışmada kayma donatıları, 200 GPa elastisite modülü ve 0,3 Poisson oranı ile lineer, elastik ve izotropik bir malzeme olarak, 286 SOLID elemen ile modellenmiştir (Shoukry vd., 2002). Kayma donatısının pozisyonu ve boyutları Şekil 4.17'de gösterilmektedir. Kayma donatıları beton plakaların kalınlığı ortasına yerleştirilmiştir.

Analiz sonuçları, kayma donatıların tekerlek yollarına yerleştirilmesinin, asfalt kaplamanın altındaki çekme gerilme ve şekil değişimi önemli ölçüde azalttığını göstermiştir (Şekil 4.18 ve Şekil 4.19). Kayma donatılarının yerleştirilmesi, asfalt tabakanın kalınlığına bağlı olarak çekme gerilme ve şekil değişimi değerleri yaklaşık %80 ila %90 ve yaklaşık %23 ila %50 oranında sırasıyla azalmasına neden olmuştur. Örneğin, 6 cm asfalt kaplama için, kayma donatısının yerleştirilmesiyle (yapışık asfalt/beton, 3500 MPa

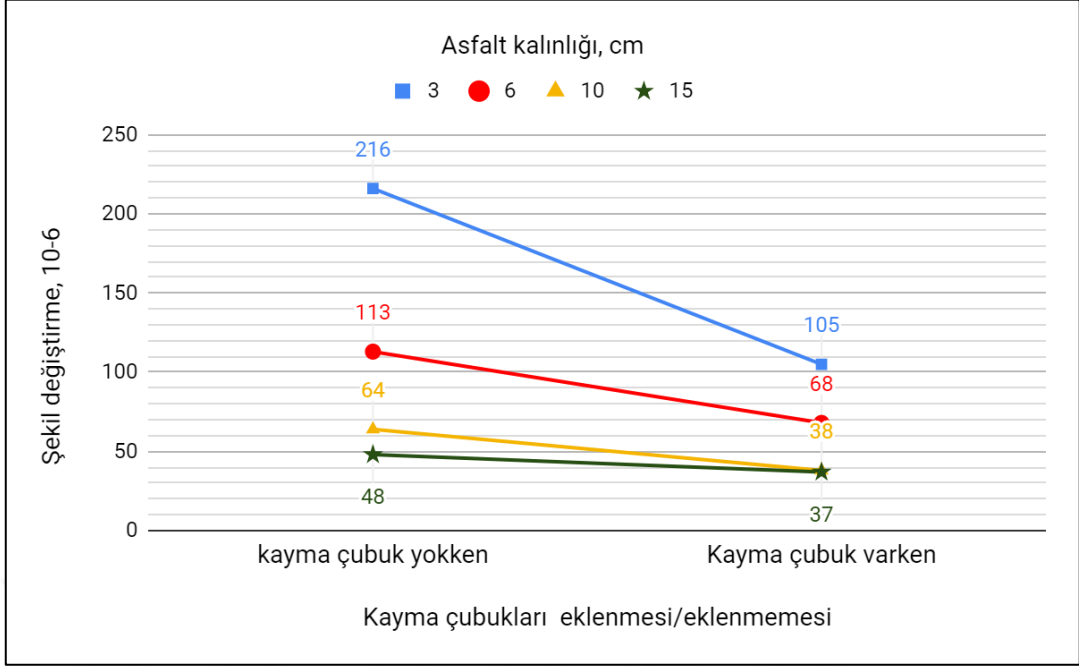
asfalt modülüsü) çekme gerilme değeri çarpıcı bir şekilde 245 KPa'dan 24 KPa'ya düşmüş ve şekil değiştirme $113 \cdot 10^{-6}$ 'den $68 \cdot 10^{-6}$ 'e azalmıştır.



Şekil 4. 17. Kayma donatılarının modeli.



Şekil 4. 18. Farklı asfalt kalınlıkları için, asfalt tabakanın altında boyuna çekme gerilme - kayma donatıları ilişkisi.



Şekil 4. 19. Farklı asfalt kalınlıkları için, asfalt tabakanın altında boyuna şekil değişim-kayma donatları ilişkisi.

4.7. Parametrelerin Gerilmelere Etki Seviyelerinin Karşılaştırılması

Bu kısımda araştırmada kullanılan değişken parametrelerin beton üstü asfalt kaplamanın performansına yani asfalt tabakanın altında çekme gerilme ve şekil değiştirmelere olan etki düzeylerini karşılaştırılmıştır. Kullanılan parametreler sırasıyla; asfalt kalınlığı ve modülü, asfalt/beton arası bağ durumu, beton kaplama modülü, derzin boyutu ve kayma donatılarının yerleşmesi. Karşılaştırmaları gerçekleştirmek için, aşağıdaki prosedürü izlenmiştir.

- Her bir parametrenin Tablo 4.1 gösterildiği gibi bir referans değeri atılmış.
- Belirli bir parametrenin etkisini belirtirken diğer parametreler sabit tutulmuş.
- İncelenen olan parametrenin oluşturduğu en küçük gerilme değeri ve en büyük gerilme değeri değişim oranı formül 4.1 ile hesaplanmıştır.
- Her bir parametrenin etkisi üç farklı asfalt kalınlığı (6, 10 ve 15 cm) için belirtilmiştir.

$$Değişim \% = \frac{Max.gerilme - Min.gerilme}{Max.gerilme} \times 100 \quad (4.1)$$

Tablo 4. 1. Kaplamanın parametrelerin girdi arakları.

Parametre	Referans	Değişim
Asfalt kalınlığı	6cm,10cm,15cm	3cm - 25cm
Asfalt elatisite modülü	3500MPa	2000MPa - 10000MPa
Asfalt/beton bağı	Yapışık	Yapışık – Yapışık olmayan
Beton elatisite modülü	28000Mpa	20000Mpa - 34000 MPa
Derz boyutu	1cm	0cm - 2cm
Kayma donatı	Yok	Yok - Var

Örnek: 10 cm asfalt kalınlığı için, beton kaplamanın modülü 20000 MPa dan 34000 MPa çıkarıldığında, çekme gerilmeleri 165 MPa dan 125 MPa düşmüştür. Bu sebepten dolayı oluşan değişim oranı.

$$Değişim \% = \frac{165-125}{165} \times 100 = 24\%$$

Her bir parametrenin farklı asfalt kalınlıkları için oluşturduğu değişim oranları Tablo 4.2 de gösterilmektedir. Tablo 4.2'de görülebileceği gibi, incelenen tüm parametreler beton üstü asfalt kaplananda oluşan gerilmelerine farklı bir seviyede etkilenmiştir.

Tablo 4. 2. Gerilmelerin değişim oranları hesaplanması.

Parametre		Değer				% Değişim oranı	
		Çekme gerilme, KPa		Şek.değiştirme, 10 ⁻⁶		Çekme gerilme KPa	Şekil değiştirme 10 ⁻⁶
		Max	Min	Max	Min		
Asfalt kalınlığı		522	122	216	35	77	84
Asfalt modülü	6cm	393	198	198	51	50	74
	10cm	306	94	98	35	69	64
	15cm	342	85	76	48	75	37
Asfalt/beton bağı	6cm	1236	245	277	133	80	52
	10cm	865	139	174	64	84	63
	15cm	706	131	143	48	81	66
Beton Modülü	6cm	273	230	119	110	16	8
	10cm	165	125	69	62	24	10
	15cm	156	118	53	47	24	11
Derz Boyutu	6cm	311	149	148	113	52	24
	10cm	177	141	85	64	20	25
	15cm	186	131	60	48	30	20
Kayma donatı	6cm	245	24	113	68	90	40
	10cm	139	22	64	38	84	41
	15cm	131	55	48	37	58	23

- Asfalt tabaka kalınlığı: Bu çalışma, şekil değiştirmeyi en fazla etkileyen parametrenin asfalt kalınlığı olduğunu tespit edilmiştir. Asfalt kalınlığındaki değişiklerin asfalt kaplamanın altında oluşan şekil değiştirmede yaklaşık %84'lük bir değişim oranına neden olmuştur. Çekme gerilme de %77 gibi önemli bir düşüşe sebep olmuştur.
- Asfalt elastisite modülü: asfalt kalınlığına bağlı olarak, şekil değiştirme değişim oranı %37 ila %74 ve çekme gerilme değişimi %50 ila %75 bulunmuştur. Ancak çekme gerilme ve şekil değiştirme tam tersi bir şekilde etkilendi. Bir arada, çekme gerilme için asfalt modülü artıkça değerini da artırır ama şekil değiştirme değeri azalır. Diğer arada, asfalt kalınlığı artıkça asfalt modülünün çekme gerilme üzerine etki seviyesi artar ama şekil değiştirme üzerine etki seviyesi azalır.
- Asfalt/beton arası bağ: bu parametre, çekme gerilme (en fazla) ve şekil değiştirme değerleri üzerinde çok etkisinin olduğu tespit edilmiştir. Yapışık ve yapışık olmayan asfalt/beton tabakaları gerilmelere oluşturan değişim oranı asfalt kalınlığına bağlı olarak çekme gerilme ve şekil değiştirme sırasıyla %80 ila %84 ve %52 ila %66 neden olmuştur. Yapışık asfalt/beton'da meydana gelen gerilmeler yapışık olmayan duruma göre çok küçük değerlerde kalmıştır.

- Mevcut beton elastisite modülü: bu parametrenin gerilmeler üzerine etkisi öncekilerden daha az olduğunu bulunmuştur. Asfalt kalınlığına bağlı olarak çekme gerilme ve şekil değiştirme değişim oranları sırasıyla %24 ila %16 ve %8 ila %11 bulunmuş. Beton modülü arttıkça gerilmelerin değerleri azaldığı görülmüştür.
- Derz boyutu: derz boyutu değişimlerden dolayı çekme gerilme ve şekil değiştirme üzerine değişim oranları, asfalt kalınlığına bağlı olarak sırasıyla %52 ila %20 ve %20 ila %25 bulunmuş.
- Kayma donatısı: beton plakaların arasında kayma donatıları eklenmesi, gerilmelerin değerleri önemli ölçüde azaltmıştır. Kayma donatılarının eklenmesi çekme gerilmelerin değişim oranı %58 ila %90 kaydedildi. şekil değiştirme ise %23 ila %40 değişim oranı kaydedildi. Asfalt kalınlığı arttıkça Kayma çubukları etkisi azalır.

Bu karşılaştırmalara dayanarak, mekanistik açısından beton üstü asfalt kaplamanın performansı üzerine en etkili parametrelerin sırasıyla asfalt kalınlığı, asfalt/beton arasındaki bağ koşulları (yapışık, yapışık olmayan), kayma donatıları (yük aktarma oranı), ve asfalt elastisite modülü olduğunu söylenebilir. Dolayısıyla, bir beton üstü asfalt kaplama projesi gerçekleştirirken bu parametreler dikkatine alınmalı.

Literatürde, beton üstü asfalt kaplamalarda oluşan yansıma çatlakları ve asfalt tabakanın altında meydana gelen gerilmeler ile ilişkili olduğunu gösterir çalışmalar mevcuttur. Texas Üniversitesi'nden (Zhou vd, 2009), beton ve asfalt üstü asfalt kaplama tasarımlarına yardımcı olmak için kapsamlı bir mekanistik-ampirik (saha, laboratuvar ve mekanik dayalı) programı geliştirdi. Farklı parametrelerin zamanla yansıma çatlak seviyesi oranı üzerindeki etkisini araştırdılar. Çalışmanın sonunda, yansıma çatlaklar oluşumundaki etkileriyle ilgili olarak parametreyi üç gruba (Ana, orta, küçük) ayırdılar. Bu nedenle bu çalışmadaki incelenmiş parametrelerin gerilmelere üzerindeki etkisini ile aynı parametrelerin Texas Üniversitesinin çalışması yansıma çatlaklar üzerindeki etkisi karşılaştırıldı. Bu karşılaştırma Tablo 4.3'te gösterilmektedir. Tablo 4.3 görüldüğü gibi, incelenmiş parametreler asfalt tabakanın altında oluşan çekme gerilme/şekil değiştirme üzerine etkisi ve yansıma çatlakları oranı üzerine etkisi uyumaktadır. Dolayısıyla, bu karşılaştırmaya dayanarak, asfalt tabakanın altındaki gerilmelerin analiz edilmesinin, beton üstü asfalt kaplama yansıma çatlakları oluşumunu tahmin etmek için uygun bir yöntem olduğu sonucuna varılabilir.

Tablo 4. 3. Bu çalışma ile Zhou vd (2009) 'nin çalışması Karşılaştırma

Parametre	Bu çalışma	Zhou vd.(2009)
	Gerilmelere etki seviyesi	Yansıma çatlaklar oranına etki seviyesi
Asfalt kalınlığı	Ana	Ana
Asfalt modülüsü	Ana	Ana
Asfalt/beton bağı	Ana	-
Beton modülüsü	Küçük	Küçük
Derz boyutu	Orta	-
Kayma donatı	Ana	Ana
Trafik hacmi	-	Ana
İklim	-	Ana

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Bu çalışma, asfalt kalınlığı, asfalt elastisite modülü, asfalt/beton arası bağ (yapışık, yapışık olmayan), mevcut beton elastisite modülü, derz boyutu ve kayma donatısı parametrelerinin beton üstü asfalt kaplamalarda yansıma çatlaklarının oluşumunda sebep olan gerilmeler üzerine etkileri mekanistik analizlerle değerlendirilmiştir. Çalışmanın amacını ulaşmak için, ANSYS yazılım programı kullanılarak 3 boyutlu beton üstü asfalt kaplama sonlu elemanlar modeli geliştirilmiştir. Yansıma çatlakların oluşması asfalt tabakanın altında meydana gelen gerilmelere bağlı olduğundan dolayı sonlu elemanlar modeli ile asfalt tabakanın altında çekme gerilme ve şekil değiştirme incelenmiştir.

Asfalt tabakanın altındaki çekme gerilme ve şekil değiştirme sırasıyla 22 KPa ila 1683 KPa ve $25 \cdot 10^{-6}$ ila $460 \cdot 10^{-6}$ arasında değişmiştir. İncelenen tüm parametreler, kaplamanın performansını farklı bir seviyede etkilenmiştir. Asfalt tabakanın altındaki çekme gerilme ile şekil değiştirme her bir parametre için farklılık göstermiştir. Kaplamanın özelliklerinin değişmesinde çekme gerilmelere daha duyarlı olduğu tespit edilmiştir. Bu tez kapsamında yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmaktadır:

- Trafik dingil yükü altında asfalt kaplamada maksimum gerilmeleri yük derz kenarında iken oluşmuştur. Boyuna çekme gerilmeleri enine doğrultudaki çekme gerilmelerinden daha büyük olduğunu bulunmuştur. Dingil yükünün uygulama noktasına ilişkin olarak çekme gerilme şekil değiştirmeden daha duyarlı olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca dingil yükünün uygulama yeri değişimden dolayı boyuna çekme gerilmenin değişim oranı % 92, şekil değiştirme ise % 64 .
- Asfalt ve beton tabakalar yapışık olarak, asfalt kalınlığı 3 cm ila 25 cm ve modülü 2000 MPa ila 10000 MPa aralığında, şekil değiştirme $25 \cdot 10^{-6}$ ila $318 \cdot 10^{-6}$ arası değişmiş ve gerilme için ise 25 KPa ila 768 KPa arası. Genel olarak, asfalt kalınlığındaki artış, çekme gerilme ve şekil değiştirme düşüğe sebep olmuştur. Asfalt elastisite modülündeki artışı ise, şekil değiştirme azalırken çekme gerilme artışa sebep olmuştur.
- Asfalt ile mevcut beton kaplama arasındaki bağ, beton üstü asfalt kaplamanın performansını etkileyen en önemli faktörlerden biri olarak bulunmuş. Asfalt/beton temas yüzeyleri yapışık durumdan yapışık olmayan durumuna geçişte, asfalt

kalınlığına bağlı olarak, asfalt tabakanın altındaki çekme gerilme büyüklüğü %213 ila %570 aralığında artışlar göstermiştir. şekil değiştirme ise, %113 ila %198 aralığında artışlar gözlemlenmiştir.

- Beton plakaların arasında kayma donatılarının eklenmesi ile, gerilme değerlerinin önemli ölçümde azaldığı görülmüş. Kayma donatılarının eklenmesi çekme gerilme değişim oranı asfalt kalınlığına bağlı olarak %50 ila %90 kaydedildi. şekil değiştirme ise %23 ila %50 değişim oranı kaydedildi. Asfalt kalınlığı artıkça Kayma çubukları etkisi azalır.

- Mevcut beton elastisite modülünü azaltmasını, çekme gerilme ve şekil değiştirme yapışık ve yapışık olmayan asfalt/beton için artmıştır. Bununla birlikte, beton modülü, yapışık olmayan asfalt/beton gerilmeler üzerinde daha az etkiye sahiptir. Çekme gerilme beton modülündeki farklılıklara daha duyarlıdır. Beton modülünün 34000 Mpa'dan 20000 Mpa'ya düşürülmesiyle asfalt kalınlığına bağlı olarak, çekme gerilme, yapışık asfalt/beton için %19 ila % 32 artarken, yapışık olmayan asfalt/beton için %8 oranında artmıştır. şekil değiştirme ise, yapışık asfalt/beton için %8 ila %13 arasında artarken, yapışık olmayan asfalt/beton için bu artış %7 oranında kalmıştır.

- Derz boyutu 1 cm'den 2 cm'ye genişletilmesi durumunda, asfalt tabakanın kalınlığına bağlı olarak, çekme gerilme büyüklüğü yaklaşık %27 ila % 42 ve şekil değiştirme %24 ila %33 arası artmıştır.

- Beton üstü asfalt kaplamanın performansı üzerine bu tez çalışmasında göz önünde bulundurulan parametreler sıralandığında; sırasıyla asfalt kalınlığı, asfalt/beton arasındaki bağ durumu, kayma donatıları (yük aktarma oranı), ve asfalt elastisite modülü olduğu anlaşılmıştır.

- Asfalt tabakanın altındaki gerilme/şekil değiştirme analiz edilmesinin, beton üstü asfalt kaplamalarda yansıma çatlakları oluşumunu tahmin etmek için uygun bir yöntem olduğu gösterilmiştir.

5.2. Öneriler:

- 1- Beton üstü asfalt kaplamanın gerçek davranışını belirlemek için sahada deneysel çalışmalar yapılmalı ve bu çalışmadaki bulgularla karşılaştırılabilir.
- 2- Isı ile trafik yükü kombinasyonunun etkisi araştırılmalıdır.
- 3- Temel ve zemin tabakaların koşullarının etkisi araştırılabilir.
- 4- Kaplamanın tepkilerinin hareketli bir dingil yükü altında hesaplanması ve malzemelerin gerçek davranışlarının (visko-elastik,plastik...) sonlu elemanlar çalışmasında göz önüne alınması, gerçek durumun daha iyi bir simülasyonunu sağlayacaktır.



6. KAYNAKLAR

- Abdessemed, M., Kenai, S., and Bali, A., 2015. Experimental and Numerical Analysis of the Behavior of an Airport Pavement Reinforced by Geogrids, Construction and Building Materials, 94, 547–554.
- Altunışık, A.C., Günaydın M., Genç A.F., Okur, F.Y., 2018. İnşaat Mühendisliğinde ANSYS Uygulamaları, Dynamic Academy, Trabzon, Turkey.
- Al-Qadi, I. L., Fini, E. H., Elseifi, M. A., Masson, J.-F., and McGhee, K. M., 2006. Viscosity Determination of Hot-Poured Bituminous Sealants, Managing and Maintaining Highway Structures and Pavements, 74–81.
- Al-Qadi, I.L., Carpenter, S.H., Leng, Z., Ozer, H. and Trepanier, S., 2009. Tack Coat Optimization for HMA Overlays: Accelerated Pavement Test Report, Illinois.
- American Concrete Pavement Association (ACPA), 2006. Concrete Pavement Field Reference—Preservation and Repair. Skokie, IL.
- Amini, F., 2005. Potential Applications of Paving Fabrics to Reduce Reflective Cracking. Jackson State University, prepared for Mississippi Department of transportation, FHWA/MS-DOT-RD-05-174.
- ANSYS, I., 2013. ANSYS Mechanical APDL Element Reference (Vol. 15317), Canonsburg.
- Baek, J., 2010. Modeling reflective cracking development in Hot-Mix Asphalt Overlays and Quantification of Control Technique, University of Illinois.
- Baek, J., Al-qadi, I. L., and Buttlar, W. G., 2008. Reflective Cracking Control, In Special Joint Conference North Central Hot Mix Asphalt Conference Illinois Bituminous Paving Conference. University of Illinois, Urbana-Champaign.
- Cable, J. K., Fanous, F. S., Ceylan, H., Wood, D., Frentress, D., Tabbert, T., and Gopalakrishnan, K., 2005. Design and Construction Procedures for Concrete Overlay and Widening of Existing Pavements. CTRE Project 04-169, FHWA DTFH6(Report), 150.
- Ceylan, H., Coree, B. J., Gopalakrishnan, k. Mathews, R. and Kota, T., 2005. Rehabilitation of Concrete Pavements Utilizing Rubblization and Crack and Seat Methods, Iowa State University, CTRE Project 02-106.
- Corley-Lay, J. B., Hearne, T. M., and Wu, S. S., 1995. Deflection Study and Design of Crack and Seat Pavement Rehabilitation. Transportation Research Record, 1513, 47–53.
- Darter, M. I., Becker, J. M., Snyder, M. B. and Smith, R. E., 1985. Portland Cement Concrete Pavement Evaluation System, NHRP, Report 277, Washington, DC.

- Dhakai, N., Elseifi, M. A., and Zhang, Z., 2016. Mitigation Strategies for Reflection Cracking in Rehabilitated Pavements – A synthesis, International Journal of Pavement Research and Technology, 9,3, 228–239.
- Elseifi, M.A., Bandaru R., Zhang, Z., 2011. Field Evaluation and Cost-Effectiveness of the Saw and Seal Method to Control Reflection Cracking in Composite Pavements, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2227.
- Fallah, S., and Khodaii, A., 2015. Reinforcing Overlay to Reduce Reflection Cracking; An Experimental Investigation, Geotextiles and Geomembranes, 43,3, 216–227.
- Francois, F. B., Larson, T. D., Pennsylvania, S., Borchert, J. R., Braun, R. P., Dustin, A. G., and Manheim, M. L., 1982. Minimizing Reflection Cracking of Pavement Overlays, National Cooperative Highway Research Program, National Research Council, Washington,DC.
- Fujie Zhou, Sheng Hu, Xiaodi Hu, and T. S., 2009. Mechanistic-Empirical Asphalt Overlay Thickness Design and Analysis System (Vol. 7), FHWA/TX-09/0-5123-3, Texas Department of Transportation Research and Technology Implementation Office Austin, Texas.
- Galal, A. K., Coree, B., J., Haddock, E., J., and T. D. W., 1999. Structural Adequacy of Rubblized Portland Cement Concrete Pavement. Transportation Research Record, 1684.
- Ghauch, Z. G., & Abou-Jaoude, G. G., 2013. Strain Response of Hot-Mix Asphalt Overlays in Jointed Plain Concrete Pavements Due to Reflective Cracking, Computers and Structures, 124, 38–46.
- Gonzalez-Torre, I., Calzada-Perez, M. A., Vega-Zamanillo, A., and Castro-Fresno, D., 2015. Experimental Study of the Behavior of Different Geosynthetics as Anti-Reflective Cracking Systems Using a Combined-Load Fatigue Test, Geotextiles and Geomembranes, 43(4), 345–350. <https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2015.04.001>
- Gregory, S., Cleveland, J., W., B., and Lytton, R. L., 2001, Geosynthetics in Flexible and Rigid Pavement, FHWA/TX-02/1777- 1, Texas Department of Transportation Research and Technology Implementation Office.
- Hossain, M. and Sultana, S., 2010. Extending Asphalt Pavement Life Using Thin Whitetopping, Kansas State University, Manhattan.
- Hu, X., and Walubita, L. F. (2011). Effects of Layer Interfacial Bonding Conditions on the Mechanistic Responses in Asphalt Pavements, Journal of Transportation Engineering, 137, 1.
- Kumara, W., Tia, M., Wu, C.-L., and Choubane, B., 2003. Evaluation of Applicability of Ultrathin Whitetopping in Florida. Transportation Research Record, 1823,1, 39–46.
- Khazanovich, L., Lederle, R., Tompkins, D., Harvey, J. and Signore, J., 2013. Guidelines for the Rehabilitation of Concrete Pavements Using Asphalt Overlays, 5,149.
- Lytton, R. L., 1989. Use of Geotextiles for Reinforcement and Strain Relief in Asphalt Concrete, Geotextiles and Geomembranes, 8,3, 217–237.

- Lytton, R. L., Hu, S., Luo, R., Tsai, F.L., Lee, S. I. and Zhou, F., 2010. Models for Predicting Reflection Cracking of Hot-Mix Asphalt Overlays, National Highway Research Program, NHRP Report 669, Texas University, Texas.
- Mohammad, L.N., Elseifi, M.A., Bae, A., Patel, N., Button, J. and Scherocman, J.A., 2012. Optimization of Tack Coat for HMA Placement, NCHRP Report 712, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C.
- MEPDG, 2008. Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide: A Manual Practice, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.
- Majidzadeh, K., Kaufmann, E. M. and Ramsamooj, D. V., 1970. Application of Fracture Mechanics in The Analysis of Pavement Fatigue, Association of Asphalt Paving Technologists Proc.
- Marquart, M., 2001. Evaluation of Saw and Seal over the Overlaid Existing Concrete Joints, North Dakota Department of Transportation, Project NH-3-002,040,212.
- Nam, B., Golestani, B., Noori, M., Tatari, O., Jinwoo. A.N., 2014. Investigation of Reflective Cracking Mitigation Techniques, 153p, University of Central Florida.
- Nunn, M., 1989. An Investigation of Reflection Cracking in Composite Pavements in the United Kingdom, Proceedings of 1st International RILEM Conference on Reflective Cracking in Pavements, Assessment and Control, Liege University, Belgium.
- Ozer, H., Al-Qadi, I. L., Wang, H., and Leng, Z., 2012. Characterization of Interface Bonding Between Hot-Mix Asphalt Overlay and Concrete Pavements: Modelling and in-situ response to accelerated loading, International Journal of Pavement Engineering, 13,2, 181–196.
- Papagiannakis, A.T., and Masad, A.E., 2008. Pavement Design and Materials, John Wiley and Sons, Inc., New Jersey.
- PCS (Pavement Consultancy Services), 1991. Guidelines and Methodologies for the Rehabilitation of Rigid Highway Pavements Using Asphalt Concrete Overlays, Maryland.
- Perkins, S. W., Christopher, B. R., Cuelho, E. L., Eiksund, G. R., Schwartz, C. S., and Svano, G., 2009. A Mechanistic-Empirical Model for Base-Reinforced Flexible Pavements, International Journal of Pavement Engineering, 10,2, 101–114.
- Peshkin, D. G., Smith, K.L., Wolters, A., Krstulovich, J., Multhrop, J. and Alvarado, C., 2011. Guidelines for The Preservation of High-Traffic-Volume Roadways, Strategic Highway Research Program, SHRP 2 Report S2-R26-RR-2, Washington, D.C.
- Rao, S., Darter, M., Thompkins, D., Vancura, M., Khazanovich, L., Signore.J... Vandembossche, J., 2013. Composite Pavement Systems: Volume 1 HMA/PCC composite pavements, Transportation Research Board, Washington, D.C.
- Shen, S., Zhang, W., Wang, H., and Huang, H., 2017. Numerical Evaluation of Surface-Initiated Cracking in Flexible Pavement Overlays With Field Observations. Road Materials and Pavement Design, 18,1, 221–234.

- Shoukry, S. N., William, G. W., and Riad, M., 2002. Characteristics of Concrete Contact Stresses in Doweled Transverse Joints, International Journal of Pavement Engineering, 3,2, 117–129.
- Sivaneswaran, N., Picce, L. M. and Maheoney, J. P., 2001. Everstress Version 5.0 (Layered Elastic Analysis Program), Washington State Department of Transportation.
- Smith, K., Hoerner, T. and D., 2008. Concrete Pavement Preservation Workshop, Washington, D.C.
- Smith, K., Harrington, D., Pierce, L., Ram, P. and Smith, K., 2014. Concrete Pavement Preservation Guide. Federal Highway Administration, FHWA-HIF-14-0142.
- Sobhan, K. and Tandon, V. (2011). Mitigating Reflection Cracking in Asphalt Overlays using Geosynthetic Reinforcements, Road Materials and Pavement Design, 0629, 37–41.
- Smith, T., 2001. Concrete Pavement Rehabilitation, Transportation and Public Works Cement Association of Canada.
- Thomas E. F., 2002. Evaluation Of Concrete Slab Fracturing Techniques In Mitigating Reflective Cracking Through Asphalt Overlays, Virginia Transportation Research Council Report No. VTRC 03-R3 , Charlottesville, Virginia.
- Thompson, 1999. Hot Mix Asphalt Overlay Design Concepts for Rubblized Portland Concrete Cement Pavements, Transportation Research Record, 1684, 147–155.
- Virgili, A., Canestrari, F., Grilli, A. and Santagata, F. A., 2009. Repeated load test on bituminous systems reinforced by geosynthetics, Geotextiles and Geomembranes, 27,3, 187–195.
- West, R. C., Zhang, J. and Moore, J., 2005. Evaluation of bond strength between pavement layers, National Center for Asphalt Technology, NCAT Report 05-08, 63, Alabama.
- Williamson M.J., 2015. Finite Element Analysis of Hot-Mix Asphalt Layer Interface Bonding, Kansas State University, Manhattan, Kansas.
- Williams, R. C., Chen, C. and Buss, A., 2015. Reflective Crack Mitigation Guide for Flexible Pavements, Iowa Highway Research Board and the Iowa Department of Transportation, IHRB Project TR-641, Ames, Iowa.
- Yang, H., 2004. Pavement Analysis and Design, Prentice Hall, Ed., second, New Jersey.
- Yoo, P. J., and Al-Qadi, I. L., 2008. The Truth and Myth of Fatigue Cracking Potential in Hot-Mix Asphalt: Numerical Analysis and Validation. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 549–590.
- Yu. T., Peshkin, D., Smith, K., Darter, M., Whiting, D. and Delaney, H., 1994. Concrete Rehabilitation Users Manual, Washington, D.C.
- Zhou, F., Hu, S., Hu, X. and Scullion, T., 2009. Mechanistic Empirical Asphalt Overlay Thickness Design and Analysis System, Texas Transportation Institute, The Texas A&M University System, FHWA / TX-09 / 0-5123-3, 7,2.

7. EKLER

Ek 1: Asfalt tabakanın altında ANSYS gerilme çikişi.

```
PRINT EPTO NODAL SOLUTION PER NODE
***** POST1 NODAL TOTAL STRAIN LISTING *****
Power Graphics Is Currently Enabled

LOAD STEP= 1 SUBSTEP= 1
TIME= 1.0000 LOAD CASE= 0
NODAL RESULTS ARE FOR MATERIAL 1

THE FOLLOWING X,Y,Z VALUES ARE IN GLOBAL COORDINATES

NODE EPTOX EPTOY EPTOZ EPTOXY EPTOYZ EPTOXZ
636 0.96517E-06-0.49027E-06-0.31126E-07 0.16940E-09 0.17072E-07-0.21101E-11
639 0.95260E-06-0.48886E-06-0.21017E-07 0.16835E-09-0.16619E-07 0.33208E-11
.....
***** POST1 NODAL TOTAL STRAIN LISTING *****

LOAD STEP= 1 SUBSTEP= 1
TIME= 1.0000 LOAD CASE= 0
NODAL RESULTS ARE FOR MATERIAL 1
THE FOLLOWING X,Y,Z VALUES ARE IN GLOBAL COORDINATES

NODE EPTOX EPTOY EPTOZ EPTOXY EPTOYZ EPTOXZ
MINIMUM VALUES
NODE 37835 37843 39277 37851 37129 50023
VALUE -0.50650E-04-0.17819E-03-0.38385E-04-0.71406E-04-0.66132E-04-0.55672E-04

MAXIMUM VALUES
NODE 37841 39271 37845 37839 51449 38567
VALUE 0.64318E-04 0.39166E-04 0.68250E-04 0.18999E-03 0.66132E-04 0.55672E-04
```

Ek 2: Asfalt tabakanın altında ANSYS şeil değiştirme ikişi.

PRINT S NODAL SOLUTION PER NODE

***** POST1 NODAL STRESS LISTING *****

Power Graphics Is Currently Enabled

LOAD STEP= 1 SUBSTEP= 1

TIME= 1.0000 LOAD CASE= 0

NODAL RESULTS ARE FOR MATERIAL 1

THE FOLLOWING X,Y,Z VALUES ARE IN GLOBAL COORDINATES

NODE	SX	SY	SZ	SXY	SYZ	SXZ
636	3844.6	71.215	1261.6	0.21959	22.130	-0.27354E-02
639	3808.8	71.693	1284.6	0.21823	-21.543	0.43047E-02

***** POST1 NODAL STRESS LISTING *****

LOAD STEP= 1 SUBSTEP= 1

TIME= 1.0000 LOAD CASE= 0

NODAL RESULTS ARE FOR MATERIAL 1

THE FOLLOWING X,Y,Z VALUES ARE IN GLOBAL COORDINATES

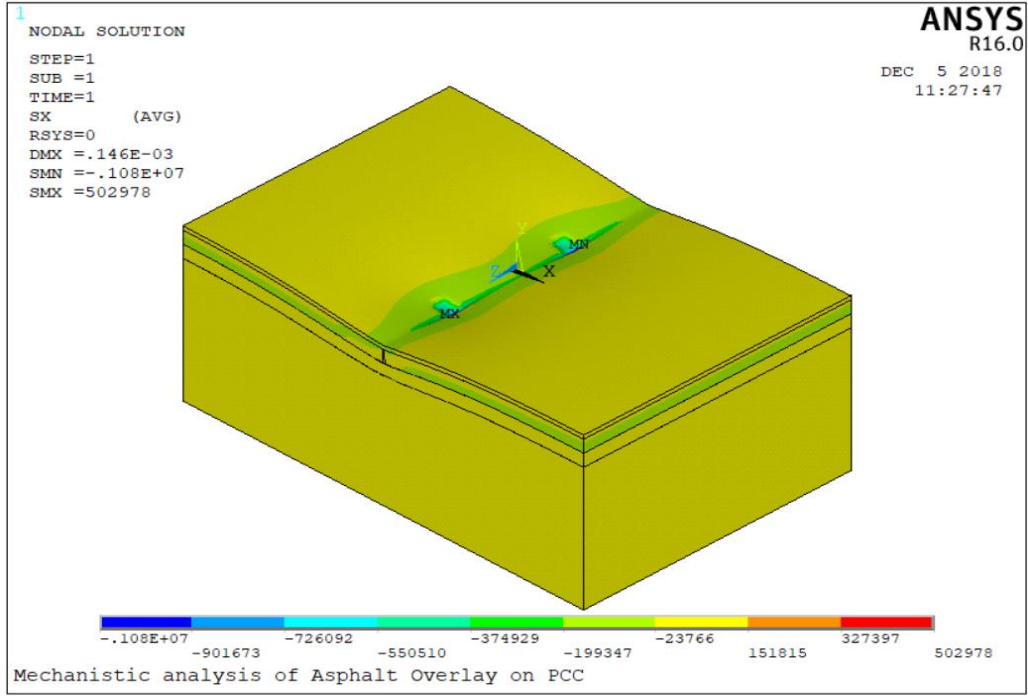
NODE	SX	SY	SZ	SXY	SYZ	SXZ
------	----	----	----	-----	-----	-----

MINIMUM VALUES

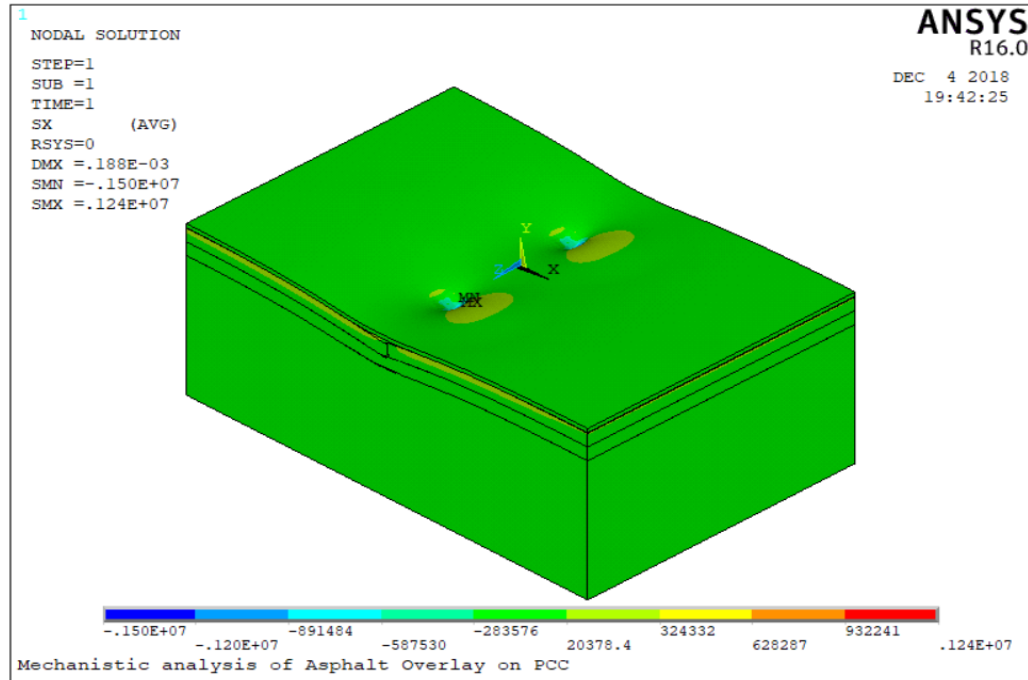
NODE	50725	37845	38919	37851	37129	50023
VALUE	-0.32284E+06	-0.68311E+06	-0.20923E+06	-92564.	-85727.	-72168.

MAXIMUM VALUES

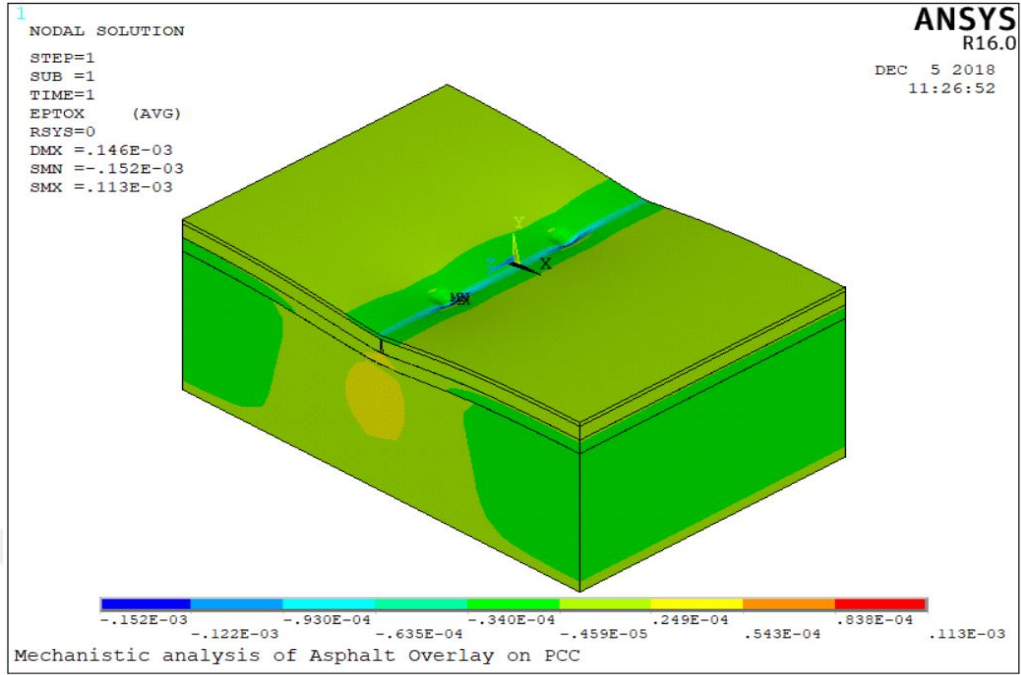
NODE	37483	39629	37841	37839	51449	38567
VALUE	0.13912E+06	0.13289E+06	0.10317E+06	0.24629E+06	85727.	72168.



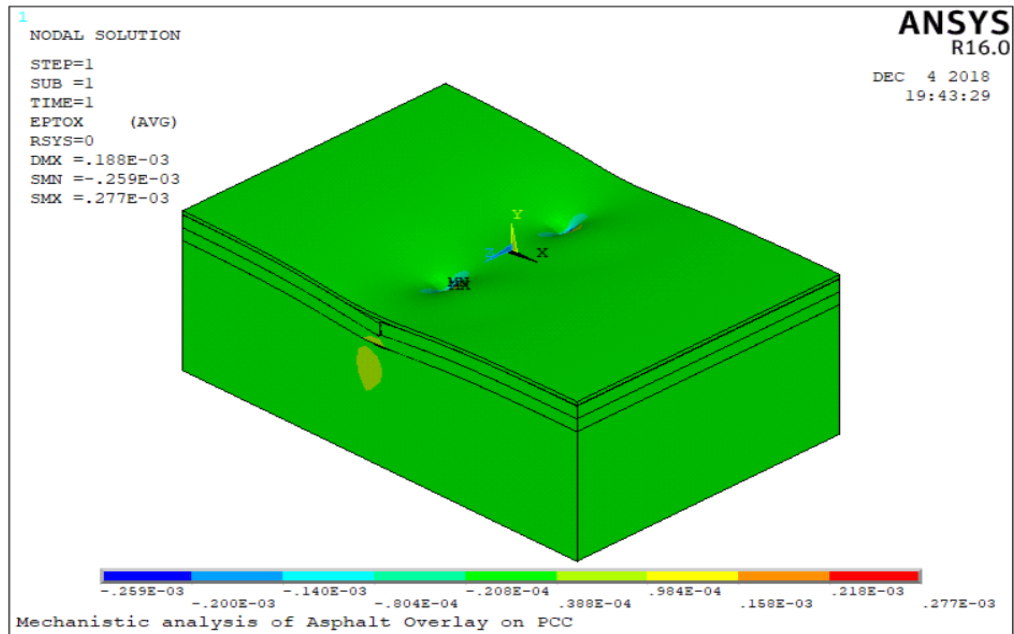
Ek. Şekil 7. 1. Yapışık asfalt/beton, 6cm asfalt, 3500 MPa asfalt modülü için, boyuna gerilme kontur diyagramı.



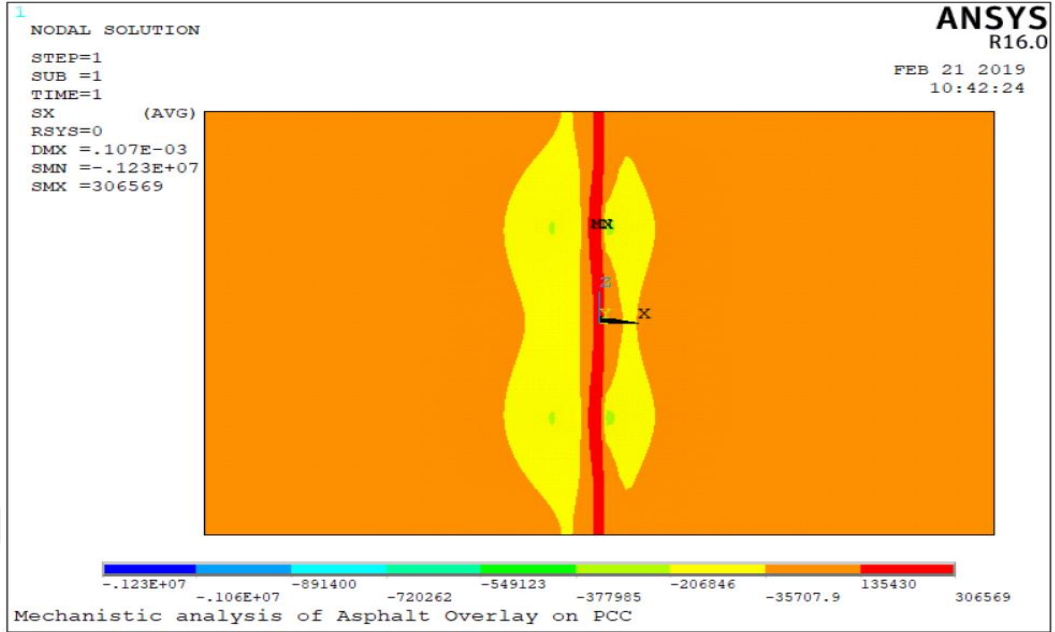
Ek. Şekil 7. 2. Yapışık olmayan asfalt/beton, 6cm asfalt, 3500 MPa asfalt modülü için, boyuna gerilme kontur diyagramı.



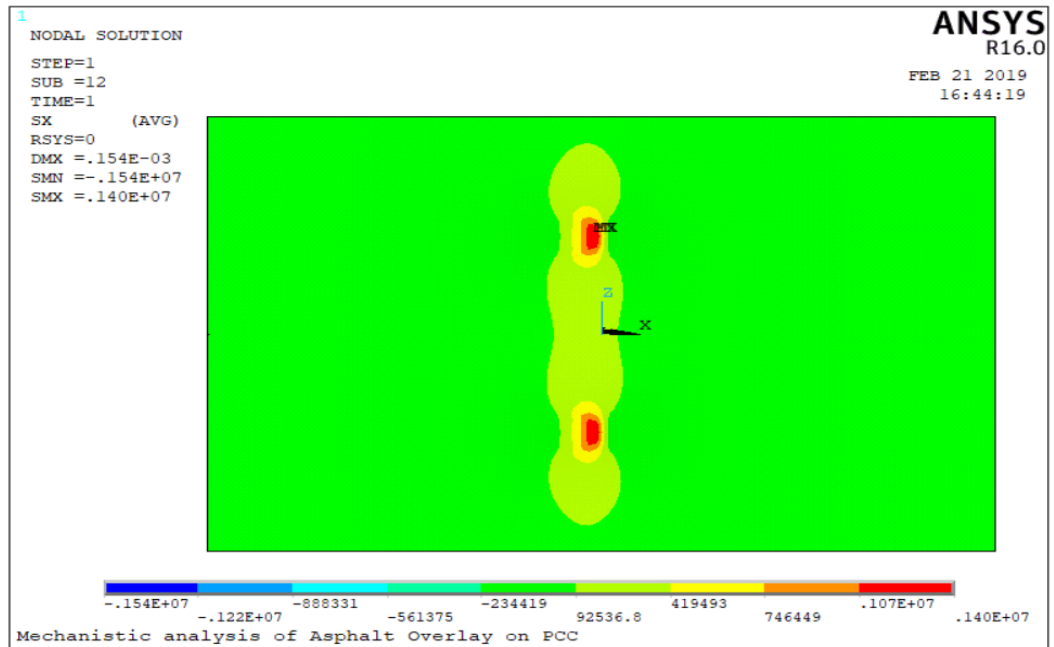
Ek. Şekil 7. 3. Yapışık asfalt/beton, 6cm asfalt, 3500 MPa asfalt modülü için, boyuna şekil değiştirme kontur diyagramı.



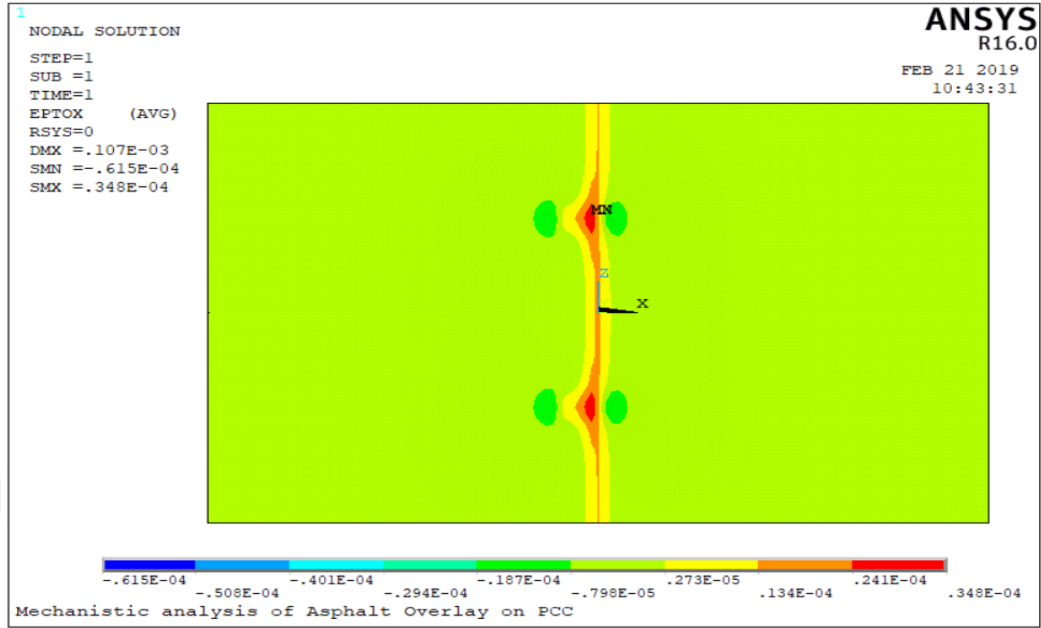
Ek. Şekil 7. 4. Yapışık olmayan asfalt/beton, 6cm asfalt, 3500 MPa asfalt modülü için, boyuna şekil değiştirme kontur diyagramı.



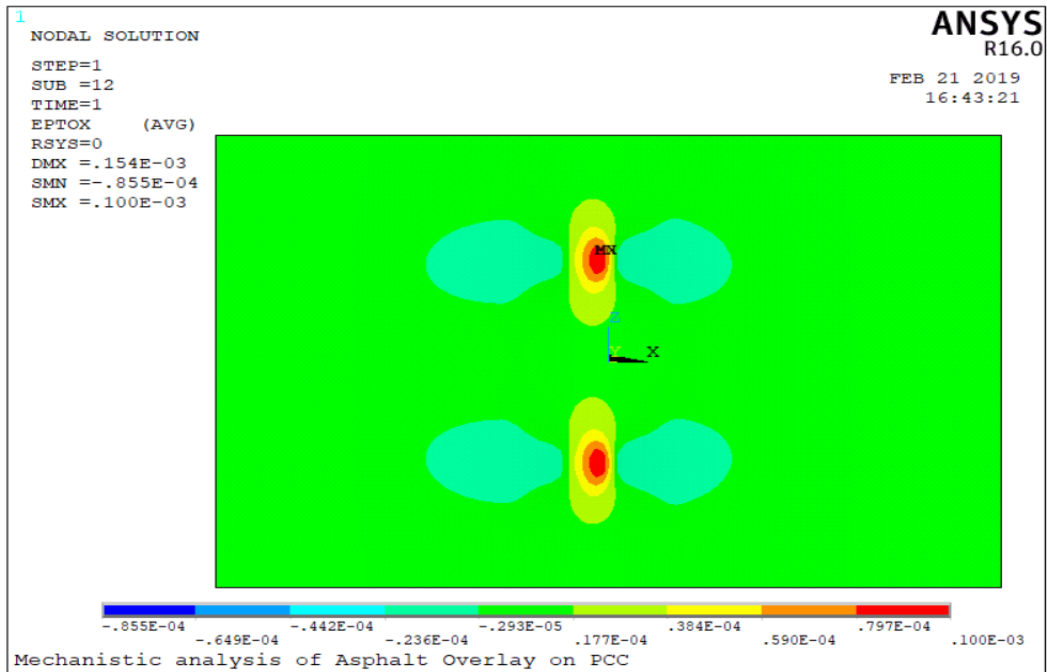
Ek. Şekil 7. 5 Yapışık asfalt/beton, 10cm asfalt, 10000 MPa asfalt modülü için, asfalt tabakanın altında boyuna gerilme kontur diyagramı.



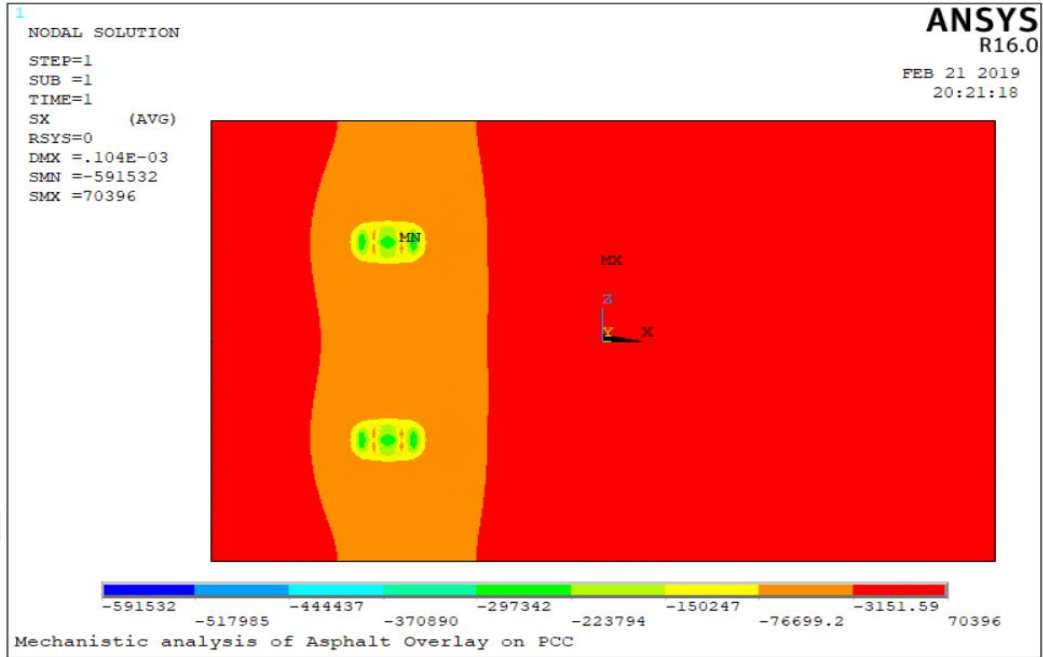
Ek. Şekil 7. 6. Yapışık olmayan asfalt/beton, 10cm asfalt, 10000 MPa asfalt modülü için, asfalt tabakanın altında boyuna gerilme kontur diyagramı.



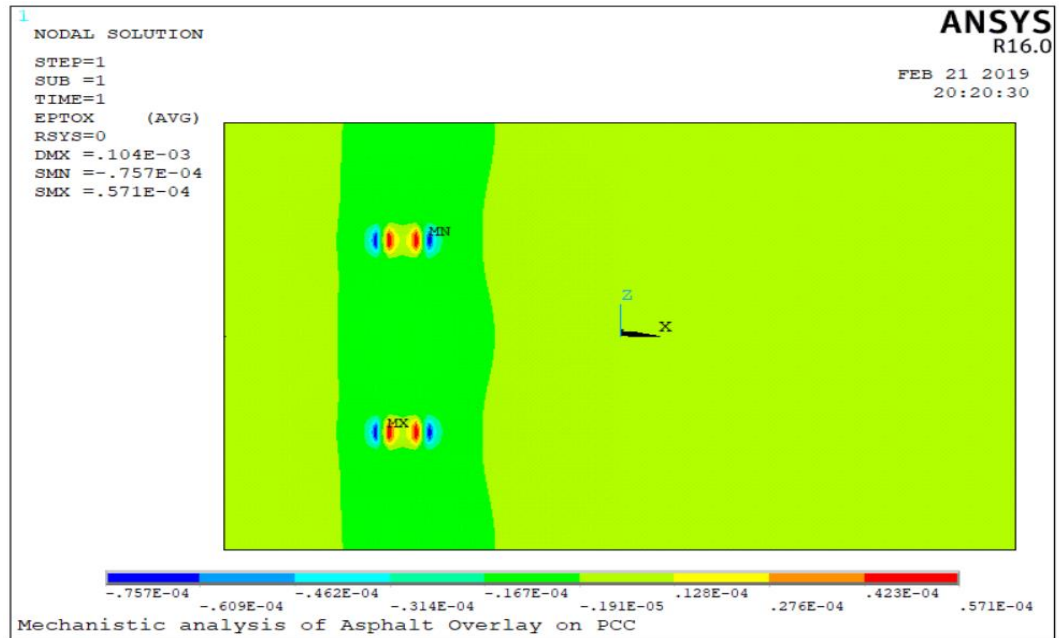
Ek. Şekil 7. 7. Yapışık asfalt/beton, 10cm asfalt, 10000 MPa asfalt modülü için, asfalt tabakanın altında boyuna şekil değiştirme kontur diyagramı.



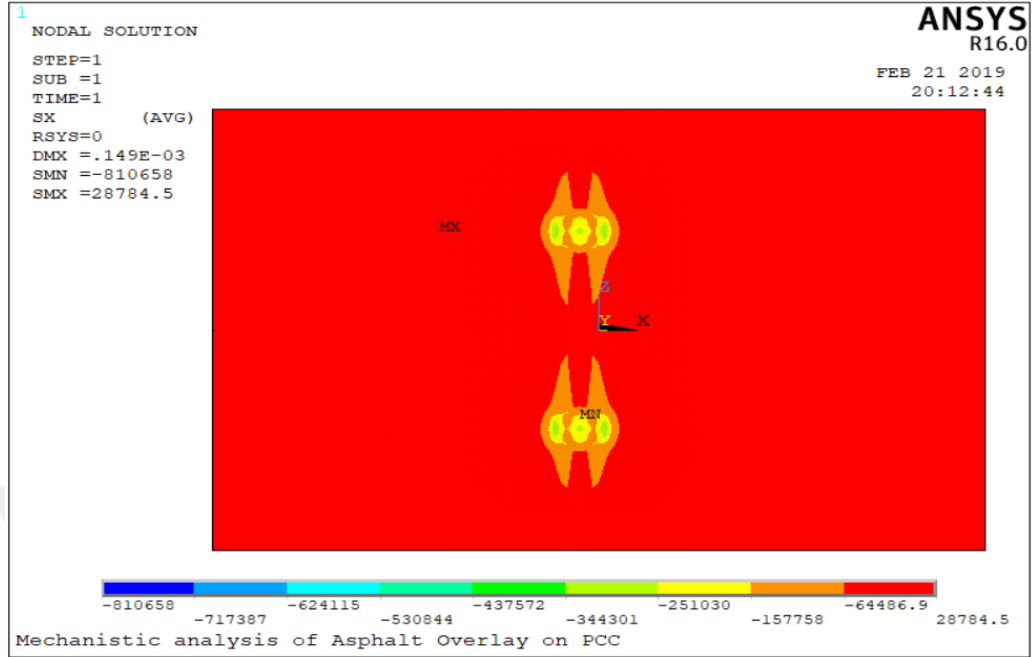
Ek. Şekil 7. 8. Yapışık olmayan asfalt/beton, 10cm asfalt, 10000 MPa asfalt modülü için, asfalt tabakanın altında boyuna şekil değiştirme kontur diyagramı.



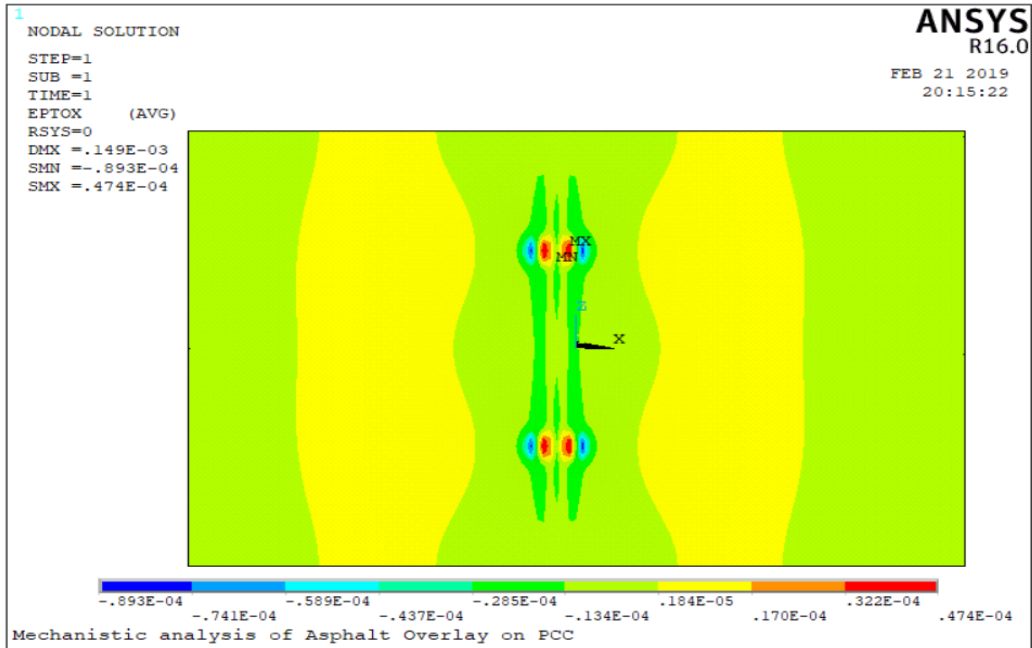
Ek. Şekil 7. 9. Dingil yükü derzten uzak uygulanmışken, yapışık asfalt/beton, 6cm asfalt, 3500 MPa asfalt modülü için, asfalt tabakanın altında boyuna gerilme kontur diyagramı.



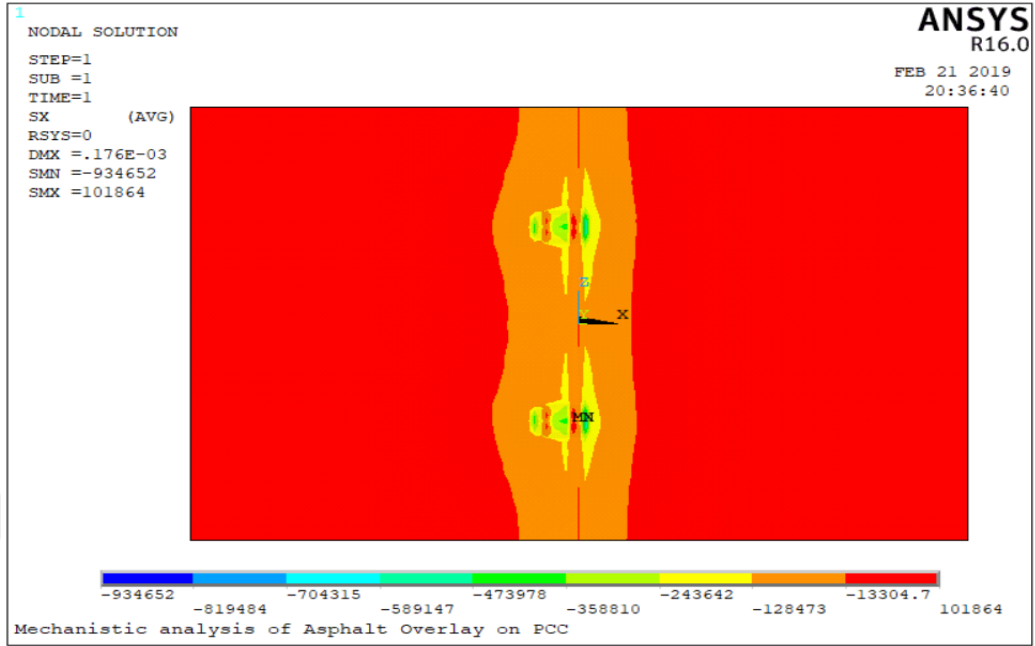
Ek. Şekil 7. 10. Dingil yükü derzten uzak uygulanmışken, yapışık asfalt/beton, 6cm asfalt 3500 MPa asfalt modülü için, asfalt tabakanın altında boyuna şekil değiştirme kontur diyagramı.



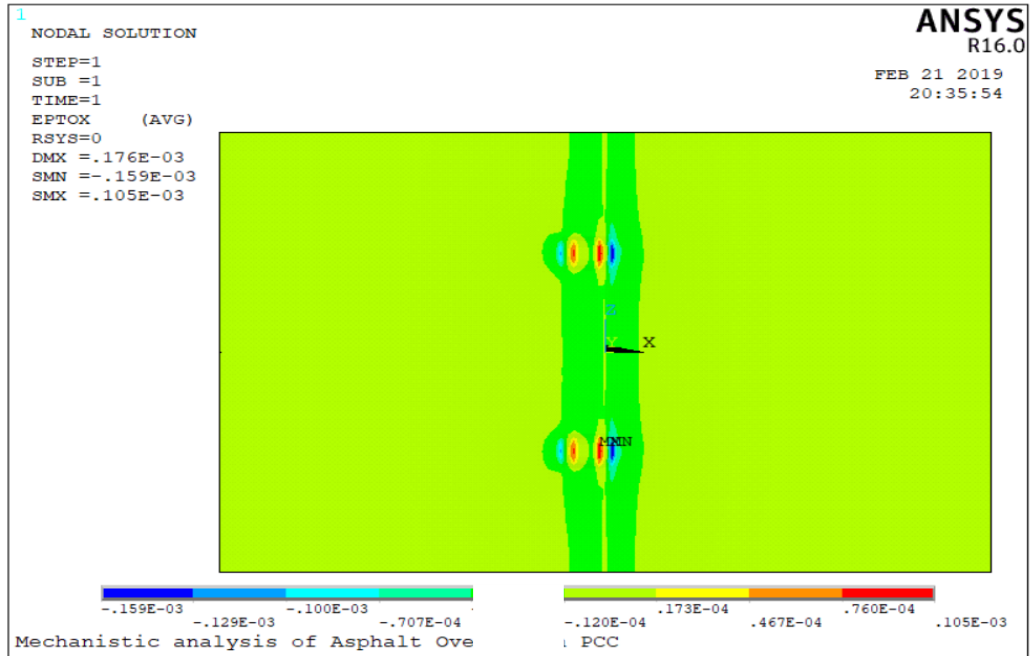
Ek. Şekil 7. 11. Dingil yükü tam derzin üstüne uygulanmışken, yapışık asfalt/beton, 6 cm asfalt, 3500 MPa asfalt modülü için, asfalt tabakanın altında boyuna gerilme kontur diyagramı.



Ek. Şekil 7. 12. Dingil yükü tam derzin üstüne, yapışık asfalt/beton, 6cm asfalt, 3500 MPa asfalt modülü için, asfalt tabakanın altında boyuna şekil değiştirme kontur diyagramı.



Ek. Şekil 7. 13. Kayma donatıları yerleşmişken yapışık asfalt/beton, 3 cm asfalt, 3500 MPa asfalt modülü için, asfalt tabakanın altında boyuna gerilme kontur diyagramı.



Ek. Şekil 7. 14. Kayma donatıları yerleşmişken yapışık asfalt/beton, 3 cm asfalt, 3500 MPa asfalt modülü için, asfalt tabakanın altında boyuna şekil değiştirme kontur diyagramı.

ÖZGEÇMİŞ

Amadou Oury DIALLO; 1992 yılında Gine' de doğdu. İlk ve orta okulu Labe ilçesinde tamamladı. 2011 yılında, "Université Gamal Abdel Nasser de Conakry" Politeknik Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Bölümü'nü kazandı. 2015 Yılında lisans dersleri tamamlanıp 2016 yılında mezun oldu. Eylül 2016 yılında Türkiye'de eğitimi devam etmek için "Türkiye bursları" tarafından burs kazandı. 2016 – 2017 Eğitim öğretim yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Türkçe Öğretim Uygulama ve Araştırma Merkezi' de Türkçe hazırlık öğrenimi gördü. 2017 Yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek lisans öğrenimine başladı.

Diallo, kendi eğitimi dışında, 2014 yılından beri " Hope Of Guinea" adlı, imtiyazsız çocukları okula gitmesine yardımcı olan bir STK üyesidir.

Diallo kendi ana dili dahil 4 dil bilmektedir: Pular (anadil), Fransızca, İngilizce ve Türkçe.