



**BOZULMUŞ BSK YOL ÜZERİ DERZLİ DONATISIZ
BETON YOLLARIN MEKANİSTİK
DEĞERLENDİRİLMESİ**

Fatih İrfan BAŞ

Doktora Tezi

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Dr. Öğr. Üyesi Osman Ünsal BAYRAK
2020**

(Her hakkı saklıdır.)

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**BOZULMUŞ BSK YOL ÜZERİ DERZLİ DONATISIZ BETON YOLLARIN
MEKANİSTİK DEĞERLENDİRİLMESİ**

(Mechanical Evaluation of Jointed Plain Concrete Roads Over Deteriorated HMA Road)

Fatih İrfan BAŞ

DOKTORA TEZİ

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Osman Ünsal BAYRAK

Erzurum

Aralık, 2020

KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Fatih İrfan BAŞ tarafından hazırlanan “BOZULMUŞ BSK YOL ÜZERİ DERZLİ DONATISIZ BETON YOLLARIN MEKANİSTİK DEĞERLENDİRİLMESİ” başlıklı çalışması 29/12/ 2021 tarihinde yapılan tez savunma sınavı sonucunda başarılı bulunarak jürimiz tarafından İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Ulaştırma Bilim Dalı Bilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı:	Prof. Dr. Muhammet Vefa AKPINAR <i>Karadeniz Teknik Üniversitesi</i>	
Danışman:	Dr. Öğr. Üyesi Osman Ünsal BAYRAK <i>Atatürk Üniversitesi</i>	
Jüri Üyesi:	Prof. Dr. Hanefi BAYRAKTAR <i>Atatürk Üniversitesi</i>	
Jüri Üyesi:	Doç. Dr. Engin YENER <i>Iğdır Üniversitesi</i>	
Jüri Üyesi:	Dr. Öğr. Üyesi Ahmet ATALAY <i>Atatürk Üniversitesi</i>	

Enstitü Yönetim Kurulunun
....../.../.... tarih ve sayılı
kararı.

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

Prof. Dr. Mehmet KARAKAN
Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildiriş, Tablo, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Doktora Tezi olarak Dr. Öğr. Üyesi Osman Ünsal BAYRAK danışmanlığında sunulan “BOZULMUŞ BSK YOL ÜZERİ DERZLİ DONATISIZ BETON YOLLARIN MEKANİSTİK DEĞERLENDİRİLMESİ” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	4	30
Kuramsal Temeller	1	30
Materyal ve Yöntem	14	35
Bulgular	2	20
Tartışma	1	20
Tezin Geneli	13	25

Not: Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5'den büyük olmaması gerekir.

Beyan edilen bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ve beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Fatih İrfan BAŞ	Dr. Öğr. Üyesi Osman Ünsal BAYRAK
4.1.2021	4.1.2021
İmza:	İmza:

* Tez ile ilgili YÖKTEZ'de yayınlamasına ilişkin bir engelleme var ise aşağıdaki alanı doldurunuz.

☐ Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi sebebiyle Enstitü Yönetim Kurulunun/....../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.

☐ Enstitü Yönetim Kurulunun/....../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir.

TEŞEKKÜR

Doktora Tezi olarak sunduğum bu çalışma süresince her türlü yardım ve desteğini esirgemeyen tez danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Osman Ünsal BAYRAK'a içtenlikle teşekkürlerimi sunarım.

Önerileri ile tezimin gelişmesine katkıda bulunan Sayın Prof. Dr. Muhammet Vefa AKPINAR'a teşekkürü bir borç bilirim. İstatistiksel çalışmalar esnasında yardımlarını esirgemeyen Sayın Dr. Öğr. Üyesi Halim Ferit BAYATA'ya çok teşekkür ederim.

Ayrıca tez izleme komitemde bulunarak, desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen Sayın Prof. Dr. Mahir GÖKDAĞ ve Sayın Prof. Dr. Hanefi BAYRAKTAR'a içten teşekkürlerimi sunarım. Tez savunma sınavıma katılarak, tezimin nihai haline görüş ve yorumlarıyla katkı sağlayan Sayın Doç. Dr. Engin YENER'e ve Sayın Dr. Öğr. Üyesi Ahmet ATALAY'a teşekkür ederim.

Tez yazım aşamasında çok değerli mesailerini harcayan Sayın Dr. Öğr. Üyesi Muhammed Ali ÇOLAK'a, Sayın Arş. Gör. Ömer Faruk KELEŞ'e ve Sayın Arş. Gör. Ahmet Oğuz DEMİRİZ'e teşekkür ederim.

Hayatımın her anında yanımda olan aileme ve eşim Kübra KARAHAN BAŞ'a doktora çalışmam boyunca gösterdikleri sabır ve desteklerinden dolayı şükranlarımı sunarım.

Fatih İrfan BAŞ

ÖZET

DOKTORA TEZİ

BOZULMUŞ BSK YOL ÜZERİ DERZLİ DONATISIZ BETON YOLLARIN MEKANİSTİK DEĞERLENDİRİLMESİ

Fatih İrfan BAŞ

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Osman Ünsal BAYRAK

Amaç: Bu çalışmada, yapısal ve işlevsel bozulmalara maruz kalarak servis kabiliyetini kaybetmiş bir BSK kaplamanın hizmet ömrünün uzatılması amacıyla üzerine yapılacak bağ kurulmamış bir beton kaplama tasarımı için plak üzerinde en kritik yükleme durumu olan kenar ve derz yüklemesi, tam konfigürasyon dingil tipi yüklemesi ve beton plak bilineer sıcaklık dağılımı değerleri için beton plak altında meydana gelebilecek maksimum asal gerilmenin beton kopma modülü altında kalmasını sağlayacak; beton sınıfı, plak kalınlık ve boyutlarının sonlu elemanlar analizi (Ansys) kullanılarak belirlenmesi ve AASHTO yöntemi ile karşılaştırılması amaçlanmıştır.

Yöntem: AASHTO yönteminde ihmal edilen beton plak kalınlığı boyunca oluşan sıcaklık dağılımları, çalışmada önerilen bilineer formüller ile hesaplanmıştır. Üstyapı tabakalarının kalınlık ve malzeme özellikleri AASHTO tasarım yöntemine göre belirlenerek en kötü şartlar göz önünde bulundurulmuştur. Ülkemiz karayollarında en çok seyreden ağır vasıta türleri kullanılarak gerçek durumu yansıtan yükleme modelleri oluşturulmuştur. Sonlu eleman analizlerinden elde edilen sonuçlar kullanılarak Taguchi Yöntemi ile tahmin modelleri oluşturulmuştur. Beton sınıfı, beton elastisite modülü, BSK elastisite modülü ve derz aralığı parametreleri ile plak altında oluşan maksimum asal gerilme arasında bulunan sayısal ilişki, çok değişkenli regresyon ve yapay sinir ağları yöntemleri kullanılarak incelenmiş ve bir tahmin modeli kurulmuştur.

Bulgular: Beton plak altında oluşan maksimum asal gerilmeler üzerinde en etkili olan parametrenin plak kalınlığı olduğu görülmüştür. Kritik dingil tipinin 1.2 olduğu görülmüştür. 1.22, 1.122 ve 1.2+111 dingil tipleri için kullanılan beton sınıfı, derz aralığı ve BSK elastisite modülü seviyelerinde 0,15 m plak kalınlığının yeterli olduğu ancak 1.2 dingil tipi için 0,15 m plak kalınlığının yeterli olmadığı görülmüştür.

Sonuç: Seçilen yükleme parametreleri altında bozulmuş olan BSK kaplamaların iyileştirilerek hizmet ömrünün uzatılması amacıyla üzerine minimum C45/55 sınıfında ve 0,20 m kalınlığında bağ kurulmamış derzli donatısız beton kaplama yapılması önerilmiştir. BSK, alt temel ve temel özelliklerindeki varyasyonların beton plak altında oluşan maksimum asal gerilmeler üzerinde minimum etkiye sahip olduğu bulunmuştur. Bu durum bağ kurulmamış beton kaplama tasarımının çok çeşitli BSK, alt temel ve temel özellikleri için uygun olduğunu göstermiştir. AASHTO yöntemi ve sonlu elemanlar yöntemi ile birbirlerine yakın plak kalınlıkları bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: derzli donatısız beton kaplama, bozulmuş BSK kaplama, Sonlu Elemanlar metodu, Taguchi Metodu, Yapay Sinir Ağları, AASHTO.

Aralık 2020, 186 sayfa

ABSTRACT

DOCTORAL DISSERTATION

MECHANICAL EVALUATION OF JOINTED PLAIN CONCRETE ROADS OVER DETERIORATED HMA ROAD

Fatih İrfan BAŞ

Supervisor: Asts. Prof. Dr. Osman Ünsal BAYRAK

Purpose: This study aimed to determine the concrete class, thickness and slab dimensions with finite element analysis (Ansys) and compare with AASHTO Method for the unbonded jointed plain concrete pavement design over a HMA pavement that lost its service capability due to the structural and functional deterioration in order to extend its service life for the most critical edge and joint loading, full configuration axle loading and concrete slab differential temperature distribution in order to ensure that the maximum principal stress occurred under the concrete pavement below the rupture modulus of concrete.

Method: Temperature distributions along the thickness of concrete slab neglected in the AASHTO method, were calculated with the bilinear formulas suggested in the study. The thickness and material properties of the existing pavement layers were determined according to the AASHTO design method, and the worst conditions were considered. Loading models reflecting the real situation were established using the most common types of heavy vehicles on highways. Estimation models were established with Taguchi Method using the results obtained from finite element analysis. The numerical relationship between concrete class, concrete elasticity modulus, HMA elasticity modulus and joint spacing parameters and the maximum principal stress under the slab were investigated using multivariate regression and artificial neural networks methods, and a prediction model was established.

Findings: It was observed that the most effective parameter on maximum principal stresses under the concrete slab was slab thickness. The critical axle type was found to be 1.2. It was observed that 0.15 m concrete thickness was appropriate for concrete class, joint spacing and HMA elasticity modulus levels used for 1.22, 1.122 and 1.2 + 111 axle types, but not appropriate for 1.2 axle types.

Results: In order to improve the deteriorated HMA pavements and extend the service life, it was recommended to design unbonded jointed plain concrete overlay of minimum C45 / 55 class and 0.20 m thickness with the studied parameters. It was found that variations in HMA, subbase and foundation layer properties had minimal effect on maximum principal stresses under the concrete pavement. This indicated that the unbonded jointed plain concrete design over HMA pavement was suitable for a wide variety of HMA, sub-base and base conditions. The slab thicknesses calculated with AASHTO method and the finite element method were found to be close to each other.

Keywords: jointed plain concrete pavement, deteriorated HMA pavement, Finite Element Method, Taguchi Method, Artificial Neural Networks, AASHTO.

December 2020, 186 pages

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI.....	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
TABLolar DİZİNİ.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ	xv
GİRİŞ.....	1
BSK Kaplama Üzerine Yapılan Beton Kaplama	3
BSK Kaplamaların Değerlendirilmesi ve Uygun Çözümün Seçilmesi.....	8
BSK kaplamanın görsel olarak değerlendirilmesi.....	9
Karot numune alınması	11
Defleksiyon testi.....	11
California taşıma oranı (CBR) açısından kaplama altındaki tabii zemin / alt temel koşullarının belirlenmesi.....	12
Frezeleme	13
Derz Kesimi	14
Kurulan Bağıın Kopması.....	15
Mevcut Tasarım Yöntemleri	17
ACPA BCOA yöntemi.....	17
BCOA-ME yöntemi	18
1993 AASHTO tasarım rehberi	19
AASHTO Kaplama ME tasarım yöntemi	30
ACPA StreetPave yöntemi.....	31
Çalışmanın Amacı ve Önemi	31
KURAMSAL TEMELLER.....	34
Beton Kaplama Analizi	36
Beton Kaplama Uygulamaları.....	38
Beton Kaplama Kalınlığı Boyunca Sıcaklık Değişimlerinin İncelenmesi	43
Sonlu Elemanlar Yöntemi	53
MATERYAL ve YÖNTEM	56

Analitik Yöntem ile Hesaplanan Gerilme ve Deplasmanların Kurulan ANSYS Sonlu Elemanlar Modeli ile Karşılaştırılması	58
Yükten doğan gerilmelerin tahkiki	59
Sıcaklık farkından doğan gerilmelerin tahkiki	71
Literatür Çalışmaları ile Kurulan ANSYS Modelinin Doğrulanması.....	73
Sıcaklık farkından doğan gerilmelerin doğrulanması	73
Yalnız tekerlek yüklerinden doğan gerilmelerin doğrulanması	77
AASHTO Metodu ile BSK Kaplama Üzeri Bağ Kurulmamış Beton Kaplama Kalınlığının Hesaplanması	80
Sonlu Elemanlar Modeli	82
Dingil konfigürasyonları	82
Lastik temas alanları ve şişme basıncı	92
Üstyapı tabaka kalınlıkları ve malzeme özellikleri	93
Taguchi Metodu	101
Çok Değişkenli Regresyon Analizi.....	104
Yapay Sinir Ağları	106
ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	110
2 Dingilli Ağır Vasıta Yükleme Analiz Sonuçları	115
2 Dingilli Ağır Vasıta Yükleme Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi	118
3 Dingilli Ağır Vasıta Yükleme Analiz Sonuçları	119
3 Dingilli Ağır Vasıta Yükleme Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi	121
4 Dingilli Ağır Vasıta Yükleme Analiz Sonuçları	122
4 Dingilli Ağır Vasıta Yükleme Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi	125
5 Dingilli Ağır Vasıta Yükleme Analiz Sonuçları	125
5 Dingilli Ağır Vasıta Yükleme Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi	128
1.2, 1.22, 1.122 ve 1.2+111 Yükleme İçin Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi	129
Çok Değişkenli Regresyon Model Sonuçlarının Değerlendirilmesi	131
Yapay Sinir Ağları (YSA) Model Sonuçlarının Değerlendirilmesi	136
ÇDR ve YSA Model Sonuçlarının Karşılaştırılması	138
SONUÇ ve ÖNERİLER	142
KAYNAKLAR.....	145
EKLER	153
EK 1. Taguchi yöntemi için deney planı.....	153
EK 2. 1.2 dingil tipine haiz olan 2 dingilli kamyonlar için Taguchi yöntemi ile bulunan analiz sonuçları.....	156

EK 3. 1.22 dingil tipine haiz olan 3 dingilli kamyonlar için Taguchi yöntemi ile bulunan analiz sonuçları.....	159
EK 4. 1.122 dingil tipine haiz olan 4 dingilli kamyonlar için Taguchi yöntemi ile bulunan analiz sonuçları.....	162
EK 5. 1.2+111 dingil tipine haiz olan 5 dingilli kamyonlar için Taguchi yöntemi ile bulunan analiz sonuçları.....	165
ÖZGEÇMİŞ.....	168



TABLÖLER DİZİNİ

Tablo 1. BSK kaplamanın iyileştirilmesi için uygulanacak yöntemler.	10
Tablo 2. Tabii zemin tipleri ve yaklaşık destek değerleri.....	12
Tablo 3. Yük transfer katsayıları	26
Tablo 4. Literatürde kullanılan lastik kaplama temas alanları.....	60
Tablo 5. Orta yüklemesinden dolayı plakta oluşan maksimum gerilmeler ve deplasmanlar ..	64
Tablo 6. Köşe yüklemesinden dolayı plakta oluşan maksimum çekme gerilmeleri ve deplasmanlar	67
Tablo 7. Kenar yüklemesinden dolayı plakta oluşan maksimum çekme gerilmeleri ve deplasmanlar.....	70
Tablo 8. Beton kaplama katmanlarına uygulanan lineer sıcaklık dağılımları ($^{\circ}\text{C}$).....	75
Tablo 9. Sıcaklık doğrulama modelinin karşılaştırılması	77
Tablo 10. Tekerlek yükleri doğrulama modelinin karşılaştırılması.....	80
Tablo 11. Rölatif hasarın tahmin edilerek efektif dinamik k- değerinin bulunması.....	81
Tablo 12. AASHTO metoduyla C20/25 ila C50/60 beton sınıfları için hesaplanan beton kaplama kalınlıkları	82
Tablo 13. Türkiye’de izin verilen azami dingil ağırlıkları ve toplam taşıt ağırlıkları	83
Tablo 14. Taşıt sınıflarına göre dingil tipleri dağılımı.....	85
Tablo 15. Kamyon dingil tiplerine göre ağırlık bilgileri.....	87
Tablo 16. Kamyon + römork – çekici + yarı römork dingil tiplerine göre ağırlık bilgileri.....	88
Tablo 17. Modellemede kullanılan tam konfigürasyon yüklemesi için dingil tipleri.....	89
Tablo 18. Çeşitli ticari markalarda kullanılan dingil açıklıkları	90
Tablo 19. Türkiye’de kullanılmakta olan lastik sınıfları ve oranları	93
Tablo 20. Modellenen teker sınıfları ve temas alanları.....	93
Tablo 21. AASHTO minimum BSK ve temel tabakaları kalınlıkları.....	95
Tablo 22. Taguchi metodunda kullanılan parametre ve seviyeler	103
Tablo 23. L ₉ ortogonal dizisi	103
Tablo 24. Kaplama derinliği boyunca ölçülen sıcaklıklar ile bilineer olarak hesaplanan sıcaklıkların karşılaştırılması	112
Tablo 25. Literatür çalışmalarındaki maksimum pozitif ve negatif sıcaklık farkları	114
Tablo 26. Kaplama kalınlığı boyunca hesaplanan sıcaklık dağılımları	115
Tablo 27. 2 dingilli (1.2) ağır vasıtaların yapılan deney sonuçları	116
Tablo 28. 1.Model 2 dingilli ağır vasıta yüklemesi deney sonuçları	116
Tablo 29. S/N etkileri tablosu	117

Tablo 30. Performans tahminleri tablosu.....	117
Tablo 31. 2. model 3 dingilli ağır vasıta yüklemesi deney sonuçları	120
Tablo 32. S/N etkileri tablosu	120
Tablo 33. Performans tahminleri tablosu.....	120
Tablo 34. 3. model 4 dingilli ağır vasıta yüklemesi deney sonuçları	123
Tablo 35. S/N etkileri tablosu	123
Tablo 36. Performans tahminleri tablosu.....	124
Tablo 37. 4. model 5 dingilli ağır vasıta yüklemesi deney sonuçları	126
Tablo 38. S/N etkileri tablosu	126
Tablo 39. Performans tahminleri tablosu.....	127
Tablo 40. ÇDR tahmin modellerinin karşılaştırılması.....	135
Tablo 41. YSA tahmin modellerinin karşılaştırılması	137

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Esnek ve rijit yol üstyapısı yük dağılımları.....	2
Şekil 2. Bağ kurulma ve bağ kurulmama gerilme davranışı	5
Şekil 3. Beton kaplama türleri.....	6
Şekil 4. Kaplama hizmet ömrünün çeşitli aşamalarında uygun koruma çözümleri	7
Şekil 5. BSK kaplamanın görsel olarak değerlendirilmesi.....	10
Şekil 6. Boyuna derzlerin tekerlek yolu üzerinde olmayacak şekilde düzenlenmesi.....	15
Şekil 7. Trafik yüklerinden dolayı bağın kopması durumu	17
Şekil 8. E_p/M_R oranının belirlenmesi	21
Şekil 9. Defleksiyon (d_0) için asfalt sıcaklığı düzeltme faktörü	22
Şekil 10. Efektif dinamik k modülü, k_∞	23
Şekil 11. Beton kaplamalarda, kaplama kalınlığı ve altta bulunan destek tabakasına göre rölatif hasarın tahmin edilmesi	24
Şekil 12. Sert temelin yüzeye yakın etkilerini dikkate almak için zemin reaksiyon modülünü değiştirme tablosu (10 fit içinde)	25
Şekil 13. Esneklik modülü ile efektif dinamik k modülü arasındaki ilişki	26
Şekil 14. Tabii zemin desteğinin potansiyel kaybı için etkili tabii zemin reaksiyon modülünün düzeltilmesi	27
Şekil 15. Beton kaplama kalınlığı tayini	29
Şekil 16. Beton kaplama kalınlığı tayini (devamı).....	30
Şekil 17. Uygulanan yükler altında yoğun sıvı, elastik katı ve gerçek toprağın tepkisi	36
Şekil 18. Geçiş bölgelerinde mevcut esnek kaplamanın frezelenmesi ve kaplama kalınlığının artırılması	40
Şekil 19. Tipik orta panel çatlak kabarma ve parçalanması	41
Şekil 20. Bölüm A ile E arası tipik bir enine derz (derzlerde herhangi bir problem yoktur)...	42
Şekil 21. Boyuna gelişen uzun çatlaklar	42
Şekil 22. Boyuna çatlağa yakın bir bakış	43
Şekil 23. Beton plaktaki doğrusal olmayan sıcaklık değişimleri	44
Şekil 24. Hava sıcaklığı ile kaplama sıcaklığının zamana göre dağılımı	45
Şekil 25. Kaplama sıcaklığının derinlikle değişimi.....	45
Şekil 26. Maksimum pozitif ve negatif sıcaklık farklarının kaplama derinliğine göre değişimi	46
Şekil 27. 30 gün boyunca ölçülen hava sıcaklıkları	46
Şekil 28. 30 gün boyunca ölçülen beton plak üst yüzey sıcaklıkları.....	47

Şekil 29. Kalınlık boyunca günlük sıcaklık değişimi.....	47
Şekil 30. Maksimum pozitif ve negatif sıcaklık farklarının kaplama derinliğine göre değişimi	48
Şekil 31. Sıcaklık farklarının kaplama derinliğine göre değişimi	48
Şekil 32. Maksimum pozitif ve negatif sıcaklık farklarının kaplama derinliğine göre değişimi	49
Şekil 33. Maksimum pozitif ve negatif sıcaklık farklarının kaplama derinliğine göre değişimi	49
Şekil 34. Maksimum pozitif ve negatif sıcaklık farklarının kaplama derinliğine göre değişimi	50
Şekil 35. Maksimum pozitif ve negatif sıcaklık farklarının kaplama derinliğine göre değişimi	50
Şekil 36. Maksimum pozitif ve negatif sıcaklık farklarının kaplama derinliğine göre değişimi	51
Şekil 37. Temmuz ayında ölçülen pozitif sıcaklık farkları	51
Şekil 38. Temmuz ayında ölçülen negatif sıcaklık farkları.....	52
Şekil 39. Maksimum pozitif ve negatif sıcaklık farklarının kaplama derinliğine göre değişimi	52
Şekil 40. Beton plak için yükleme durumları.....	58
Şekil 41. Lastik kaplama temas alanının uzunluk ve genişliği	60
Şekil 42. Lastik temas alanının boyutları	61
Şekil 43. ANSYS ile hesaplanan orta yüklemesi maksimum asal gerilmesi	63
Şekil 44. ANSYS ile hesaplanan orta yüklemesi deplasmanı	64
Şekil 45. Orta yüklemesinden dolayı plakta oluşan maksimum çekme gerilmeleri	65
Şekil 46. Orta yüklemesinden dolayı plakta oluşan maksimum deplasmanlar	65
Şekil 47. ANSYS ile hesaplanan köşe yüklemesi maksimum asal gerilmesi	66
Şekil 48. ANSYS ile hesaplanan köşe yüklemesi deplasmanı	66
Şekil 49. Köşe yüklemesinden dolayı plakta oluşan maksimum çekme gerilmeleri	68
Şekil 50. Köşe yüklemesinden dolayı plakta oluşan maksimum deplasmanlar	68
Şekil 51. ANSYS ile hesaplanan kenar yüklemesi maksimum asal gerilmesi.....	69
Şekil 52. ANSYS ile hesaplanan kenar yüklemesi deplasmanı	69
Şekil 53. Kenar yüklemesinden dolayı plakta oluşan maksimum çekme gerilmeleri.....	71
Şekil 54. Kenar yüklemesinden dolayı plakta oluşan maksimum deplasmanlar	71
Şekil 55. Beton kaplamada eğilme gerilmeleri formüllerinde kullanılacak olan C_x ve C_y değerleri	72

Şekil 56. Kaplamanın bükülmesi a) Negatif sıcaklık gradyanı b) Pozitif sıcaklık gradyanı	74
Şekil 57. Pozitif gradyan sonucu oluşan maksimum gerilmeler	75
Şekil 58. Pozitif gradyan sıcaklık dağılımları	75
Şekil 59. Negatif gradyan sonucu oluşan maksimum gerilmeler	76
Şekil 60. Negatif gradyan sıcaklık dağılımları	76
Şekil 61. Y doğrultusunda oluşan minimum ve maksimum şekil değiştirmeler	78
Şekil 62. X doğrultusunda oluşan minimum ve maksimum şekil değiştirmeler	78
Şekil 63. Y doğrultusunda oluşan minimum ve maksimum gerilmeler	79
Şekil 64. X doğrultusunda oluşan minimum ve maksimum gerilmeler	79
Şekil 65. Regresyon analizi sonuçları	80
Şekil 66. Ağır taşıtlarda kullanılan dingil tipleri (KGM 2020)	84
Şekil 67. Ağır taşıtlarda kullanılan dingil tipleri dağılım grafiği (KGM 2020)	86
Şekil 68. 2 dingilli kamyonlar için yükleme durumu	91
Şekil 69. 3 dingilli kamyonlar için yükleme durumu	91
Şekil 70. 4 dingilli kamyonlar için yükleme durumu	92
Şekil 71. 5 dingilli kamyonlar için yükleme durumu	92
Şekil 72. Model sınır şartları	96
Şekil 73. Model ağ şekli	97
Şekil 74. 2 Dingilli kamyonlar için modellenen plak boyutları	98
Şekil 75. 3 Dingilli kamyonlar için modellenen plak boyutları	99
Şekil 76. 4 Dingilli kamyonlar için modellenen plak boyutları	100
Şekil 77. 5 Dingilli kamyonlar için modellenen plak boyutları	101
Şekil 78. Beton plaktaki bilineer sıcaklık değişimi	110
Şekil 79. Regresyon analizi sonuçları	111
Şekil 80. 2 dingilli yükleme durumu optimum seviyelerle sıcaklık farkı ile tam konfigürasyon dingil tipi yüklemesinden doğan maksimum asal gerilmeler	118
Şekil 81. Bütün seviyeler için performans istatistikleri	119
Şekil 82. 3 dingilli yükleme durumu optimum seviyelerle sıcaklık farkı ile tam konfigürasyon dingil tipi yüklemesinden doğan maksimum asal gerilmeler	121
Şekil 83. Bütün seviyeler için performans istatistikleri	122
Şekil 84. 4 dingilli yükleme durumu optimum seviyelerle sıcaklık farkı ile tam konfigürasyon dingil tipi yüklemesinden doğan maksimum asal gerilmeler	124
Şekil 85. Bütün seviyeler için performans istatistikleri	125
Şekil 86. 5 dingilli yükleme durumu optimum seviyelerle sıcaklık farkı ile tam konfigürasyon dingil tipi yüklemesinden doğan maksimum asal gerilmeler	128

Şekil 87. Plak kalınlığı performans istatistikleri	129
Şekil 88. Maksimum asal gerilme model 1 tahmin serisi orijinal seri regresyon model sonucu uyum grafiği	131
Şekil 89. Maksimum asal gerilme model 1 tahmin serisi orijinal seri regresyon model sonucu dağılım grafiği	132
Şekil 90. Maksimum asal gerilme model 2 tahmin serisi orijinal seri regresyon model sonucu uyum grafiği	132
Şekil 91. Maksimum asal gerilme model 2 tahmin serisi orijinal seri regresyon model sonucu dağılım grafiği	133
Şekil 92. Maksimum asal gerilme model 3 tahmin serisi orijinal seri regresyon model sonucu uyum grafiği	133
Şekil 93. Maksimum asal gerilme model 3 tahmin serisi orijinal seri regresyon model sonucu dağılım grafiği	134
Şekil 94. Maksimum asal gerilme model 4 tahmin serisi orijinal seri regresyon model sonucu uyum grafiği	134
Şekil 95. Maksimum asal gerilme model 4 tahmin serisi orijinal seri regresyon model sonucu dağılım grafiği	135
Şekil 96. Maksimum asal gerilme model 1 tahmin serisi orijinal seri YSA model sonucu dağılım grafiği	136
Şekil 97. Maksimum asal gerilme model 2 tahmin serisi orijinal seri YSA model sonucu dağılım grafiği	136
Şekil 98. Maksimum asal gerilme model 3 tahmin serisi orijinal seri YSA model sonucu dağılım grafiği	137
Şekil 99. Maksimum asal gerilme model 4 tahmin serisi orijinal seri YSA model sonucu dağılım grafiği	137
Şekil 100. Maksimum asal gerilme model 1 orijinal seri, regresyon tahmin serisi, YSA tahmin serisi uyum grafiği	138
Şekil 101. Maksimum asal gerilme model 2 orijinal seri, regresyon tahmin serisi, YSA tahmin serisi uyum grafiği	139
Şekil 102. Maksimum asal gerilme model 3 orijinal seri, regresyon tahmin serisi, YSA tahmin serisi uyum grafiği	140
Şekil 103. Maksimum asal gerilme model 4 orijinal seri, regresyon tahmin serisi, YSA tahmin serisi uyum grafiği	141

KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials (Amerikan Devlet Karayolları Görevlileri Birliği)
ACPA	American Concrete Pavement Association (Amerikan Beton Kaplama Birliği)
BCOA	Bonded Concrete Over Asphalt (Asfalt Üzeri Bağ Kurulmuş Beton Kaplama)
BSK	Bitümlü Sıcak Karışım
CBR	California Bearing Ratio (Kaliforniya Taşıma Oranı)
ÇDR	Çok Değişkenli Regresyon
ESAL	Equivalent Single Axle Load (Eşdeğer Tek Dingil Yüğü)
ETDY	Eşdeğer Tek Dingil Yüğü
FWD	Falling Weight Device (Düşen Ağırlık Cihazı)
HMA	Hot Mix Asphalt (Bitümlü Sıcak Karışım)
KGM	Karayolları Genel Müdürlüğü
LS	Loss of Support (Destek Kaybı)
LTE	Load Transfer Efficiency (Yük Aktarım Verimliliği)
MAG	Maksimum Asal Gerilme (MPa)
NDT	Non Destructive Testing (Tahribatsız Muayene)
PCC	Portland Cement Concrete (Portland Çimento Betonu)
TWT	Thin Whitetopping (İnce Beton Kaplama)
UTW	Ultra Thin Whitetopping (Ultra İnce Beton Kaplama)
WT	Whitetopping (Geleneksel Beton Kaplama)
YSA	Yapay Sinir Ağları
a	NDT Yük Plakası Yarıçapı, inç
a	Değme Alanı Yarıçapı, inç
a _e	Zemin ve Kaplama Ara Yüzündeki Gerilme Dairesinin Yarıçapı, inç
A _c	Tekerlek Temas Alanı, inç ²
b	Basınç Dağılımının Eş Değer Yarıçapı, inç
C _d	Drenaj Katsayısı
C _x	Göreceli Sertlik Oranının Sıcaklık Eğilme Gerilmeleri ile Bağlantısı
C _y	Göreceli Sertlik Oranının Sıcaklık Eğilme Gerilmeleri ile Bağlantısı
D	Beton Plak Kalınlığı, inç
D _{sg}	Tabii Zeminin Sert Zemine Olan Mesafesi, fit
d ₀	Yük Plakasının Merkezinde Ölçülen Defleksiyon, inç

d_r	Yükün Merkezinden r Uzaklıkta Meydana Gelen Defleksiyon, mils
DFMSe	Hata Kareler Ortalamasının Serbestlik Derecesi Toplamı
e	Beton Genleşme Katsayısı
e_i	Deneydeki Rastsal Hata
E_c	Beton Elastisite Modülü, psi
E_p	Üstyapı Efektif Modülü, psi
F	Tablo Değeri
f_{cf}	Eğilme Dayanımı, MPa
J	Yük Transfer Katsayısı
k	Yatak Katsayısı, pci
l	Göreceli Sertlik Katsayısı
Log W_{18}	W_{18} Değerinin Logaritmik Hesabı
M_R	Zemin Esneklik Modülü, psi
m	Ortalama Tahmininde Kullanılan Parametrelerin Serbestlik Dereceleri
n	Bir Deney Kombinasyonunda Yapılan Tekrar Sayısı
n_i	Yapılan Doğrulama Deneylerinin Tekrar Sayısı
P	Uygulanan Yük, pound
P_0	Başlangıç Servis Kabiliyeti İndeksi
P_t	Nihai Servis Kabiliyeti İndeksi
q	Lastik Basıncı, psi
R	Yükün Merkezinden Olan Uzaklık, inç
S/NL	Performans İstatistiği
S'_c	Beton Kopma Modülü, psi
S_o	Trafik Tahmini ve Performans Tahmininin Bileşik Standart Hatası
u_r	Rölatif Hasar
W_{18}	18 kip (8,2 t) Eşdeğer Tek Dingil Yükü Tekerrür Sayısı
X_i	Deneydeki Parametre-Seviye Kombinasyonun Sabit Etkisi
Y_i	Deneyin Performans İstatistiği
Z_R	Standart Normal Sapma
ΔPSI	P_0 - P_t (servis kabiliyetinde azalma miktarı)
Δt	Beton Plâğın Alt ve Üst Yüzeyi Arasındaki Sıcaklık Farkı
μ	Performans Değerinin Genel Ortalaması
μ	Beton Poisson Oranı
γ	Euler Sabiti

GİRİŞ

Yol üstyapı tasarımı, iklim, trafik ve malzeme koşullarındaki değişimleri hesaba katarak, üstyapının proje ömrü boyunca deformasyonlara maruz kalmadan güvenli bir şekilde taşıyabileceği trafik yüklerinin sayısının hesaplanarak üstyapı ve tabaka kalınlıklarının belirlenmesinden oluşmaktadır (Söderqvist 2006).

Esnek, rijit ve kompozit olmak üzere üç üstyapı tipi kullanılmaktadır. Esnek üstyapılar, aşınma, binder, temel ve alt temel tabakalarından oluşan tabakalı bir yapıdan oluşmakta iken rijit üstyapılar taban zemini üzerine inşa edilen beton plaklardan oluşmaktadır (Ağar vd 1998). Kompozit kaplamalar ise zamana bağlı olarak bozulmuş olan beton kaplamaların üzerine bitümlü sıcak karışım (BSK) takviye tabakası yapılarak veya bozulmuş olan esnek kaplamaların üzerine beton kaplaması yapılarak elde edilmektedir (Tunç 2001).

Esnek kaplamalar, araçlar için ihtiyaç duyulan sürüş emniyet ve konforuna, araçların meydana getirdiği gerilmelere karşı gösterdiği stabiliteye sahip olacak şekilde farklı özelliklerde farklı tabakalardan meydana gelen çok tabakalı esnek bir yapıdır (Tunç 2001).

Esnek kaplamalar çevresel ve tekerlek yüküne bağlı faktörlerin bir araya gelmesi sonucu bozulmaktadır. Yüke bağlı gerilmeler, yorulma çatlaklarına ve tekerlek izi oluşumuna neden olurken, çevresel faktörler ise termal çatlamayı, blok çatlamayı, ayrışmayı ve sökülmeyi uyarmaktadır (Uzarowski and Bashir 2007).

Rijit (beton) kaplama; portland çimentosu, iri agrega ve kum karışımının tek tabaka şeklinde dökülmesi ile elde edilmektedir. Yol kaplamasında kullanılan betonun görevi, trafik yüklerini zemine iletmek ve bu esnada zeminin deforme olmamasını sağlamaktır (Ağar vd 1998). Sürekli ve mesnetli bir döşeme sistemi oluşturmak için birbirine bağlanmış rijit bir plaka sisteminden oluşan bir beton kaplamanın en önemli avantajı, rijit plakaların yükü geniş bir alana uygulamasıdır. Alt temel dayanımının daha az olduğu, istisnai ağır trafik yüklerinin söz konusu olduğu ve düşük parlama noktasına sahip petrokimyasal sızıntıların beklendiği durumlarda daha yararlıdır (Griffiths and Thom 2000).

Beton kaplamalar, sıcaklık farklarından oluşan gerilmeler ile trafik yüklerinin oluşturduğu gerilmelerin birleşimine karşı hassastırlar. Yük, rijit kaplama yüzeyine uygulandığında, kaplamanın eğilmeye çalışmasına ve dolayısıyla çekme ve basınç gerilmelerinin meydana gelmesine neden olmaktadır (Tunç 2001).

Sahip olduğu açık renk nedeniyle beton kaplama daha yansıtıcıdır. Artan yansıtıcılık, farların ve uçak iniş ışıklarının daha fazla yansımaları ve dolayısıyla sürüş güvenliğinin

artmasını sağlamaktadır (Association 1993; Buress 2000). Dış aydınlatma için gerekli olan enerjinin azalmasını ve dolayısıyla işletme maliyetlerinin azalmasını, güneş enerjisinin daha az emilmesini ve dolayısıyla çevresel etkilerin azalmasını da sağlamaktadır (ACPA 2000). Beton kaplamalar; otoparklar, yakıt istasyonları ve uçak apronları için söz konusu olan yakıt dökülmesine karşı daha fazla direnç göstermektedir (ACPA 1995). Yaygın olarak kullanılan kireçtaşı agregaları yerine bazalt agregalarının kullanılması, beton kaplamaların aşınma direncini önemli ölçüde artırmaktadır (Karpuz et al. 2017). Beton kaplamalarda enine ve boyuna ince yivler oluşturularak, özellikle yağmurlu hava koşullarında araçların kayarak kaza yapma risklerinin azaltılması sağlanmaktadır (Karaca et al. 2015).

Rijit kaplamalar, esnek kaplamalara göre daha yüksek elastikiyet modülüne ve rijitliğe sahiptirler. Bu nedenle Şekil 1’de gösterildiği gibi trafik yüklerini zemin üzerine daha geniş bir alana yayarak daha fazla mukavemet göstermektedirler. Rijit kaplama, elastik zemine oturan bir kiriş şeklinde çalışmaktadır (Ağar vd 1998)



Şekil 1. Esnek ve rijit yol üstyapısı yük dağılımları

Son yıllarda, karayolu mühendisleri azalan bütçelere rağmen, artan trafik hacim ve yükleri nedeniyle kaplama sürdürülebilirliği ve korunmasına ilişkin yol ağları için başarılı bakım stratejilerine odaklanarak büyük çaba harcamaktadırlar (Harrington et al. 2014). Birçok kaplama koruma faaliyetinde, mevcut bir kaplamanın bir beton kaplama ile yeniden yüzeylendirilmesi, tam olarak yeniden yapılmasından daha az maliyetli, hızlı bir şekilde inşa edilmiş ve sürdürülebilir bir çözüm olmaktadır (Torres et al. 2012).

BSK kaplamaların, portland çimentosu betonu ile iyileştirilmesinin birçok avantajı bulunmaktadır. Kayma direnci ve yol güvenliğindeki iyileştirme (özellikle ıslak şartlar altında) BSK kaplamalara göre daha avantajlı olmaktadır (Branch 1998). Asfalt kaplamalara yapılan periyodik bakımlardan kaynaklanan zaman kaybı ve gecikmeler önemli ölçüde azalmaktadır. Bir PCC yüzeyinin kanıtlanmış durabilite ve uzun vadeli performansı, BSK kaplamanın bakım süresi ve yaşam döngüsü maliyetini azaltmaktadır (Branch 1998). Bu durum ABD’nin

Nebraska eyaletindeki beton kaplama projeleri üzerine yapılan çalışmalarla desteklenmektedir (Rea and Jensen 2005).

En çok kullanılan iyileştirme yöntemi, BSK kaplamalar üzerine tekrar asfalt kaplaması yapılmasıdır. BSK kaplamanın durumuna göre üzerine frezeleme işlemi yapılabilir (Institute 1996). Yeni yapılacak bir BSK kaplaması genel olarak işlevsel hataları ve proje özelliklerine bağlı olarak bazı yapısal sorunları gidermek için kullanılabilir (Institute 1994). Ancak yeni yapılan BSK kaplamanın performansı, altında yer alan kaplamanın durumuna göre şekillenmektedir. Wen et al. (2006), Wisconsin'deki BSK kaplamaların iyileştirilmesi için üzerlerine yapılan BSK kaplamaların performanslarını inceledikleri çalışmalarında, altta yer alan kaplamadaki tekerlek izlerinin ve çatlakların yeni yapılan kaplamada tekrar oluşabileceğini ortaya koymuşlardır.

BSK Kaplama Üzerine Yapılan Beton Kaplama

BSK yol kaplaması üzerinde yapılan PCC kaplaması olarak tanımlanan beton kaplama (WT), kalınlığa ve alttaki BSK katmanına yapışma yani bağ kurma (bond) türüne göre sınıflandırılabilir (Rasmussen and Rozycki 2004).

Yeni yapılan PCC kaplaması ile mevcut BSK kaplama arasındaki bağ kurma seviyesi beton kaplama tanımında karışıklıklara neden olmaktadır. Her ne kadar ince beton kaplamalar (TWT) literatürde 1918 yılından itibaren bildirilmiş olsa da daha yakın zamana kadar kullanılan özel yapım teknikleri hakkında çok az şey belirtilmiştir. Örneğin, PCC ve BSK katmanları arasındaki bağı güçlendirmek için herhangi bir işlemin yapıp yapılmadığı bildirilmemiştir. Aksine, beton kaplama ile ilgili önceki öneriler, bağın kopmasına yardımcı olmak için ara bir tabaka (örneğin, kireç bulamacı ya da kür bileşiği) uygulanmasını içermiştir (ACPA 1998). Geleneksel beton kaplama tasarım tekniklerinde altta bulunan mevcut BSK katmanının “sert bir alt taban” olduğu varsayıldığından, bağ eksikliği kaplama performansı üzerinde olumsuz bir etkiye neden olmamıştır (AASHTO 1993).

1980'lerin ortalarında, Avrupa'daki araştırmacılar tarafından PCC ile BSK katmanı arasında kurulacak bir bağın tasarımda göz önünde bulundurulacağı ve yapım sırasında BSK katmanının dokulandırılması için yeni bir kavram geliştirildi (Silfwerbrand 1997). Katmanlar arasında kuvvetli bir bağın mevcut olduğu varsayıldığında, beton kaplama daha ince bir tasarıma sahip olabilecektir.

Bağ kurulmuş beton kaplaması için, genel olarak beton ve asfalt katmanı arasında kurulacak bağ, asfalt yüzeyinin temizlenmesi ve yüzey kirlenmelerinin giderilmesiyle sağlanır. Ancak birçok kuruluş, ara yüzeyde bağ kurucu olarak su / çimento oranı 0.65 olan bir çimento

harcı kullanmaktadır (ACPA 1990). Bağ kurulmamış esnek kaplama üzeri ince beton kaplama (TWT) yapılması için, ayırıcı tabaka olarak polietilen örtüler, balmumu bazlı krleme bileşikleri, sıvı asfaltlar ve sıcak karışık asfalt malzemeleri kullanılmaktadır (McGhee 1994). Derz dolgu malzemesi olarak sıcak dökülen kauçuk malzemeler, silikonlu malzemeler veya prefabrike derz malzemeleri kullanılmaktadır (ACI 2006).

BSK kaplamalarının davranışı ve performansı çok değişkendir. Orijinal tasarıma ve kaplama yapısının nihai kullanımına bağlı olarak oluşacak bozulmalar birkaç şekilde meydana gelebilmektedir. İyileştirilme ihtiyacına neden olacak BSK kaplamalarda meydana gelen bozulmalar aşağıdaki gibi sıralanmaktadır.

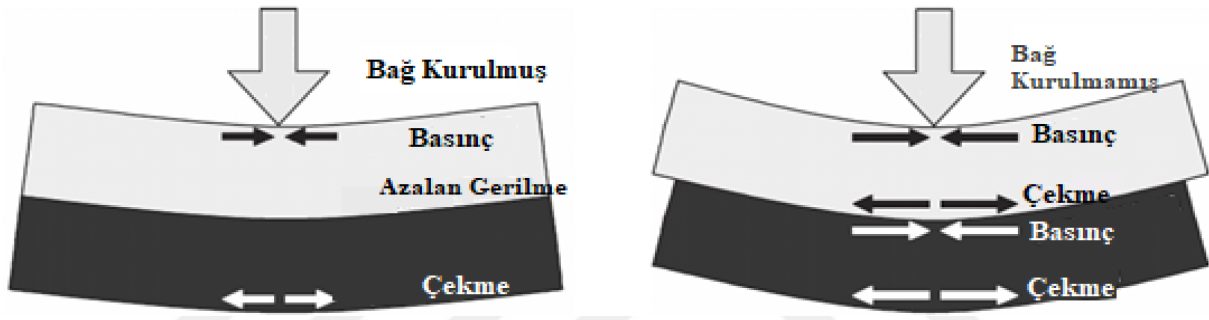
- Tekerlek izi ve oluklar: ağır trafiğin ve kaplama altındaki bir ya da birden fazla tabakada trafik etkisi nedeniyle oluşan yanıl hareketlerin meydana getirdiği kalıcı deformasyonlarla ilgilidir. Asfalt bağlayıcı maddenin viskoz özellikleri (zellikle yüksek sıcaklıklarda) BSK tabakasında tekerlek izi oluşumuna neden olan önemli bir faktördür (Silfwerbrand 1997; Ilıcalı vd 2001).
- Boyuna derz çatlakları: yol kenarına yakın uygulanan yüklemenin neden olduğu bozulma şeklidir. Kaplamalarda karşılaşılan yaygın sorunlardır ve genellikle diğer alanlardan daha hızlı bozulmaktadırlar. Oluşan çatlaklar, asfalt kaplamaların hizmet ömürleri açısından çok önemlidir. Boyuna derzlerdeki çatlaklar, suyun kaplamaya girmesine izin vererek daha fazla parçalanmaya yol açmaktadır (Akpınar 2008).
- Yorulma çatlakları: birçok mühendislik malzemesinde olduğu gibi, tekrarlanan yüklemeler BSK'ya zarar verebilir ve bu da gözle görülür çatlakların gelişmesine neden olabilir. Bu başarısızlık modu karmaşıktır ve çeşitli şekillerde gelişebilir (Yoder and Witczak 1975). Genellikle zayıf bir temel sistemi ve / veya BSK'nın sertleşmesi ile daha da artmaktadır.
- Termal çatlaklar: düşük sıcaklıklarda, BSK daha elastik ve kırılğan bir şekilde davranış göstermektedir. Kaplama sıcaklığı hızlı bir şekilde veya sürekli olarak azalırsa, kaplama yüzeyinde enine çatlamalar oluşabilir (Yoder and Witczak 1975).

Diğer sık görülen yapısal bozulmalar ve malzeme kusurları arasında blok çatlakları (BSK'nın oksidasyonu ve büzülmesinin sonucu), ayrılma (trafiğin aşındırma etkisi ve asfalt bağlayıcı maddenin nemin varlığına bağlı olarak agregadan ayrılması) ve kuma (bitümün satha doğru hareketi) yer almaktadır (Ilıcalı vd 2001). Bu bozulmalara, sürüş kalitesinin düşmesi (kaplama pürüzsüzlüğü), kayma direnci kaybı ve gürültünün artması eklenebilir.

Kaplama kalınlığı göz önüne alındığında; geleneksel (kalınlık > 200mm), ince (kalınlık 100-200 mm) ve ultra ince (kalınlık 50-100 mm) olmak üzere üç adet BSK kaplama üzeri beton

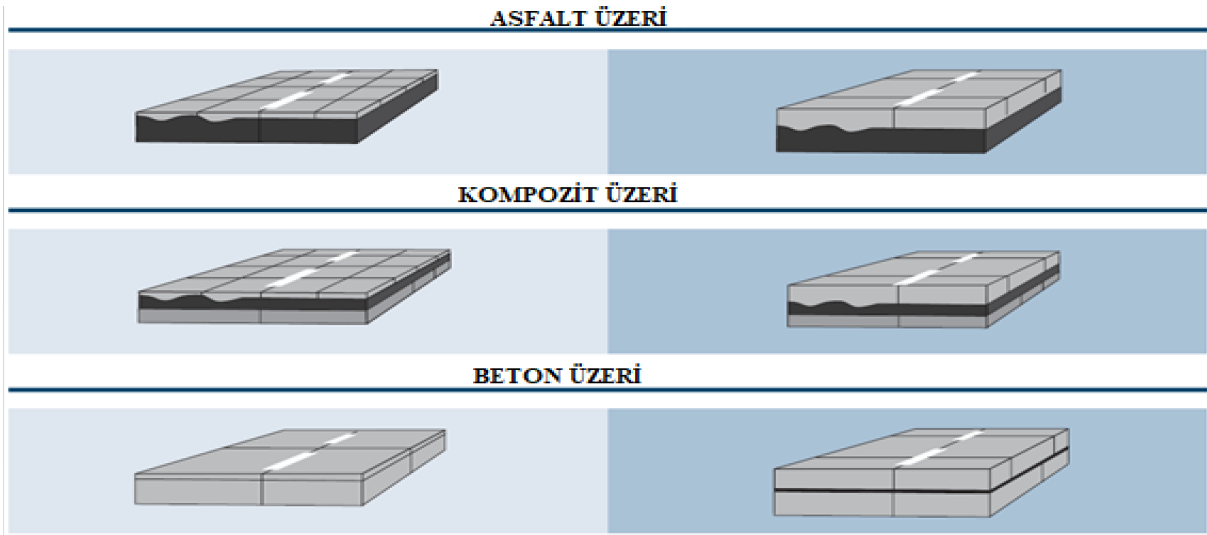
kaplama (beyaz kaplama) türü vardır (Sheehan et al. 2004). Geleneksel beton kaplama (WT), PCC ile alttaki BSK katmanı arasındaki bağ kuvvetini göz önünde bulundurmaya gerek kalmadan tasarlanır ve üretilir. Genel olarak, ince beton kaplama (TWT), alttaki BSK katmanı ile arasında makul bir bağ kurulması düşünülerek tasarlanır. Ultra ince beton kaplama (UTW), iyi bir performans göstermesi için alttaki BSK katmanıyla iyi bir bağ kurması düşünülerek tasarlanır (Cole 1997; Rasmussen et al. 2002; Lin and Wang 2005).

Beton kaplama ile alttaki BSK katmanı arasındaki bağın türü, özellikle UTW kaplamalar için önemlidir, çünkü oluşan bağ, yükün bir kısmını BSK katmanına aktararak ultra ince beton kaplama katmanındaki gerilmeleri azaltır. Şekil 2, bağlanmış ve bağlanmamış kaplamaların gerilme davranışları arasındaki farkı göstermektedir (Rasmussen and Rozycki 2004).



Şekil 2. Bağ kurulma ve bağ kurulmama gerilme davranışı (Rasmussen and Rozycki 2004)

Bağ kurulması düşünülerek tasarlanan bir beton kaplama, kaplama kalınlığının bir parçası olarak ele alınırken, bağ kurulması düşünülmeden tasarlanan bir beton kaplama ise sağlam bir zemin üzerine (mevcut kaplama) oturan yeni bir kaplama olarak ele alınır. Bu nedenle bağ kurulmayan kaplama kalınlıkları daha fazla olmaktadır. Bağ kurulması düşünülerek tasarlanan bir beton kaplama için mevcut kaplamanın iyi bir yapısal durumda olması şartı vardır. Beton kaplama ile mevcut kaplama arasındaki bağ, kaplamanın monolitik bir kaplama olarak çalışmasını sağlarken, beton kaplama da mevcut kaplama yüzey bozukluklarının giderilmesini sağlar (Harrington et al. 2014). Şekil 3’de gösterildiği gibi, bağ kurulmuş ve bağ kurulmamış beton kaplamalar mevcut asfalt, kompozit veya beton kaplamaların üzerine inşa edilebilirler.



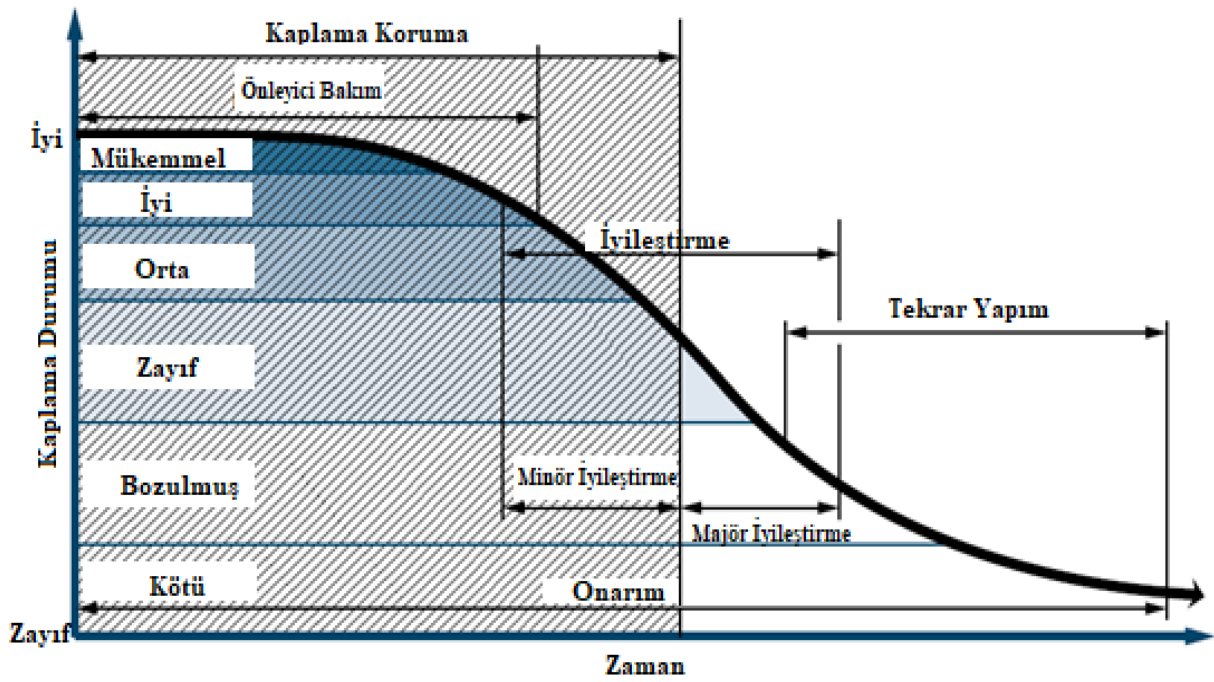
Şekil 3. Beton kaplama türleri

- Yapısal veya işlevsel ömrünün sonuna yaklaşan bir BSK kaplamasının en uygun iyileştirme alternatifinin seçilebilmesi için aşağıda verilen faktörlerin belirlenmesi gerekmektedir. Birçok durumda, bu faktörler dengelenmek suretiyle en uygun stratejinin seçimi yapılmalıdır (Yoder and Witczak 1975; Institute 1994; ACPA 1998).
- Tasarım trafik yükü
- Mevcut kaplama: Durumu, kalınlık, drenaj
- Maliyetler: İnşaat maliyeti, servis ömrü boyunca gereken toplam bakım maliyetleri, sürücü gecikme maliyetleri, araç işletme maliyetleri
- Zaman: Yapım işlemlerinin sayısı, toplam yapım süresi, bakım ve onarım süresi, bakım ve onarım sıklığı, başlangıç performans süresi
- Koridor etkisi: Gürültü seviyesi, aşırı kirlilik seviyesi, kaza oranı (kayma direnci karşısında), sürüş kalitesi (pürüzsüzlük)
- Malzeme bulunabilirliği: Çimento, asfalt binder, agregalar
- Yükleniciler: Bulunabilirlik (kapasite), tecrübe, rekabet (teklif verenlerin sayısı).

Bir TWT veya UTW alternatifinin seçilmesinde oluşabilecek olası bir sorun, mevcut BSK kaplama özelliklerinin aşırı basitleştirilmiş bir şekilde tanımlanmasına neden olabilmektedir. Bu özelliklere bağlı olarak, TWT veya UTW kaplamalar çok farklı performanslara sahip olacaktır. BSK katmanının sertliğinin, diğer faktörlerin eşit olduğu tasarımlarda kaplama performansı üzerinde önemli bir etkiye sahip olabileceğini yapılan çalışmalar göstermektedir (Rasmussen et al. 2002; Rasmussen 2003).

Kaplama iyileştirmesi, kaplamanın hizmet ömründe önemli bir artış sağlayarak kaplamanın yapısal veya işlevsel iyileştirilmesi olarak tanımlanmaktadır. Bir kaplamayı

korumak için, bakımı ve iyileştirilmesi gerekmektedir. Şekil 4'te gösterildiği gibi, kaplama koruması; önleyici bakım işleri ile iyileştirme işlerinin bir bileşkesi olarak kabul edilmektedir. Yeniden yüzeylendirme, mevcut kaplamada yeni veya taze bir yüzey sağlamak için kullanılan genel bir terimdir ve temel olarak koruma (önleyici bakım ve minör iyileştirme) stratejisi olarak kabul edilir. Beton yüzey yenileme, bağ kurulan ve bağ kurulmayan beton kaplamalardan oluşmaktadır. Kapsamlı bir varlık yönetimi ile maliyetin etkin bir şekilde göz önünde bulundurulması, kaplama ömrünü uzatırken kaplamanın işlevsel ve yapısal özelliklerini geliştirmektedir.



Şekil 4. Kaplama hizmet ömrünün çeşitli aşamalarında uygun koruma çözümleri (Harrington et al. 2014)

Önleyici bakım, kaplama korumasının önemli bir bileşenidir. Kaplama yüzeyine uygun maliyetli işlemlerin uygulanarak, yapısal olarak sağlam olan kaplamaların hizmet ömrünün uzatılmasıdır.

50 - 100 mm kalınlıkla olan bağ kurulmuş beton kaplamalar, tüm kaplama tipleri için mükemmel önleyici bakım stratejileri sağlamaktadır. Minör iyileştirme, majör iyileştirme gerektirmeyen bir kaplamanın yapısal kapasitenin orijinal durumuna getirilmesi için kullanılmaktadır. Bir koruma çözümü olarak beton kaplamaların en büyük avantajlarından biri, koruma faaliyetinin temel amacı olmasa bile, kaplamanın yapısal kapasitesini arttırmalarıdır.

100 mm kalınlıkla bağ kurulan ve kurulmayan beton kaplamalar mükemmel minör iyileştirme çözümleri sunar. Yapısal iyileştirme gerektiren kaplamalar için, majör iyileştirme tipik olarak kullanılan yaklaşımdır. Mevcut bir kaplamanın kullanım ömrünü uzatan ve / veya yük taşıma kapasitesini artıran yapısal iyileştirmeler gerektirir. 150 ila 175 mm'ye kadar olan

bağ kurulmuş beton kaplamaları nadir olarak kullanılırken, 150 ila 250 mm arasındaki bağ kurulmamış kaplamalar genel olarak kullanılmaktadır.

Beton kaplamalarının bir iyileştirme stratejisi olarak önemini göstermek için, Amerikan Devlet Karayolu ve Taşımacılık Görevlileri Birliği (AASHTO) ince bağ kurulmayan beton kaplamaların, 100-125 mm kalınlıkta, önemli bozulmalar gösteren kompozit (beton üzerine asfalt) kaplamalar için bir iyileştirme seçeneği olduğunu belirtmektedir. Bağ kurulmayan beton kaplamalar doğru bir şekilde tasarlanarak inşa edildiğinde, yük taşıma kapasitesini arttırmakta ve kaplama ömrünü uzatmaktadır (Harrington et al. 2008)

BSK Kaplamaların Değerlendirilmesi ve Uygun Çözümün Seçilmesi

Mevcut kaplama durumunun değerlendirilmesi, koruma ve iyileştirme sürecinin önemli bir parçasıdır. Kapsamlı bir değerlendirme, aşağıdakiler dahil olmak üzere, kaplamanın durumu, performans özellikleri ve sınırlamaları hakkında değerli bilgiler sağlamaktadır:

- Tüm mevcut kaplama tabakalarının tanımlanması
- Kaplama malzemelerinin özellikleri ve davranışı
- Bozulmaların varlığı, türü ve kapsamı
- Yapısal durum ve yük taşıma kapasitesi
- Kaplamanın pürüzlülük, sürtünme ve gürültü gibi fonksiyonel özellikleri

Kaplama değerlendirme sürecinin bir parçası olarak çeşitli faaliyetler gerçekleştirilebilir (Hall et al. 2001; Hoerner 2001). Özellikler, proje türüne ve göreceli önem derecesine bağlı olarak projeden projeye değişecektir. Beton kaplamanın mevcut bir kaplamanın üzerine inşa edilmesi için iyi bir aday olup olmadığını belirlemek amacıyla, işlem aşağıdaki zorunlu ve isteğe bağlı adımlara ayrılabilir (AASHTO 2008a).

- i. Tarihsel veri toplama, kayıt incelemesi ve gelecekteki öngörüler: Tasarım yaşı, kalınlık, tabakalar, mevcut trafik ve hizmet seviyesi, tasarım ömrü, kalan ömrü, istenilen trafik ve performans seviyesi, istenilen tasarım ömrü, yükseklik ve kot sınırlamaları
- ii. Görsel inceleme (yerinde inceleme) : Şekil 5’de gösterildiği gibi kaplamanın durumunun iyi, orta, zayıf veya kötü olarak değerlendirilmesi.
- iii. Karot analizi: Bozulmanın türü ve derinliği, kaplama, temel ve alt temel kalınlıklarının belirlenmesi.
- iv. İsteğe bağlı değerlendirme analizleri: Bozulmaların sebebi bilinmiyorsa veya bozulma derecesini belirlemek için uygulanmaktadır.

- Malzeme testleri: Malzeme ve durabilite sorunlarının söz konusu olduğu mevcut kaplamalar veya ağır trafik yüküne hizmet veren yollar veyahut da özellikle bağ kurulmuş bir beton kaplama tasarımı düşünülüyorsa; petrografi analizi (malzeme nedenli bozulma, zayıf hava-boşluk oranı), asfalt soyulması ve termal genleşme katsayısı
- Alt yüzey testleri: Kaplama veya taban zemini sorunlarının söz konusu olduğu durumlarda veya trafik yüküne hizmet veren yollar veyahut da özellikle bağ kurulmuş bir beton kaplama tasarımı düşünülüyorsa; Düşen ağırlık (FWD) testleri (k:zemin reaksiyon modülü, kaplama özellikleri, yük aktarım verimliliği, boşluk durumu, asfalt sertliği, beton eğilme dayanımı), taban zemini testleri (donma çözünme özellikleri, büzülme kabarma özellikleri, toprak dayanımı için dinamik koni penetrasyon testi veya standart penetrasyon testi)
- Yüzey dokusu testleri: Malzeme ve durabilite sorunlarının söz konusu olduğu mevcut kaplamalar veya ağır trafik yüküne hizmet veren yollar veyahut da özellikle bağ kurulmuş bir beton kaplama tasarımı düşünülüyorsa

BSK kaplamanın görsel olarak değerlendirilmesi

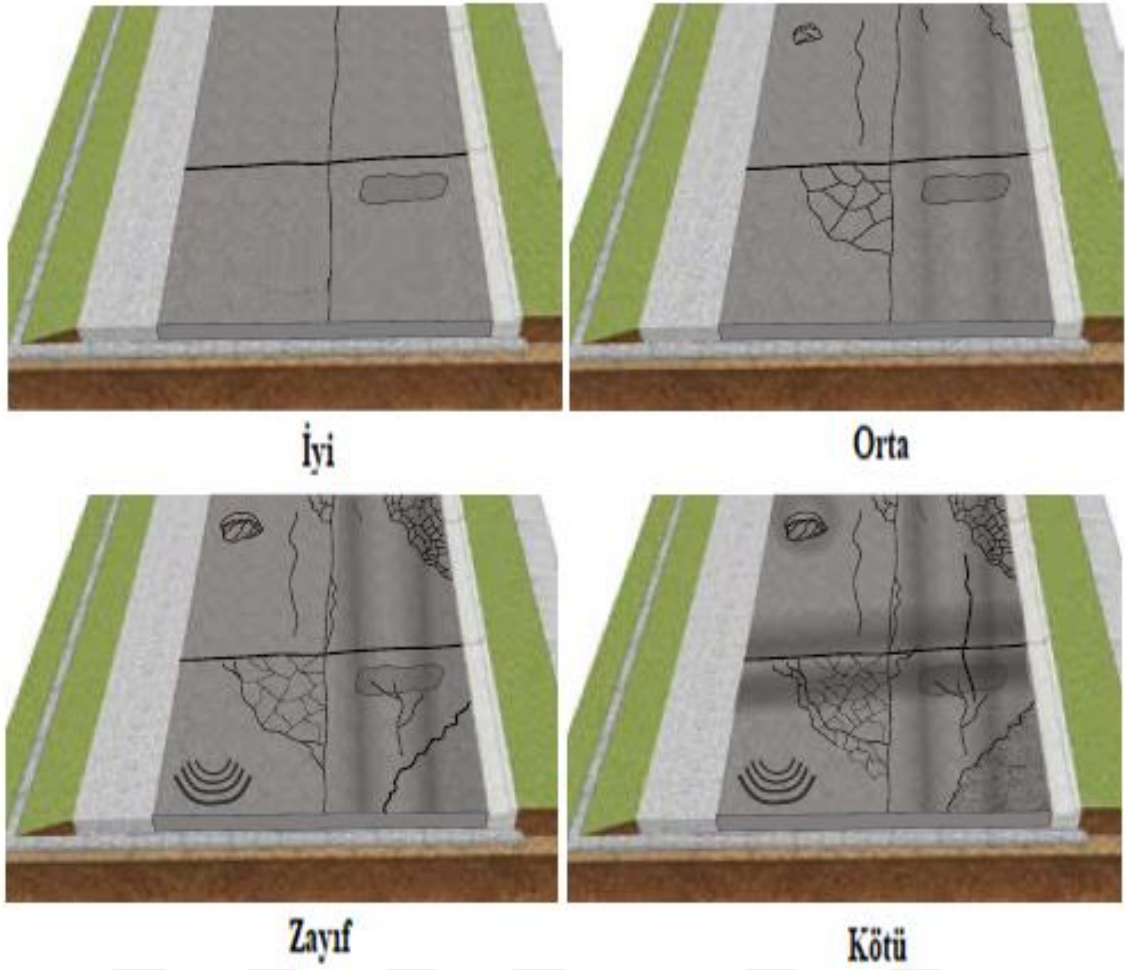
BSK kaplama durumunun Şekil 5’de gösterildiği üzere iyi, orta, zayıf veya kötü olarak değerlendirilmesi işlemidir.

İyi durumda, kaplama yapısal olarak sağlamdır ancak yapısal kapasitenin artırılmasına, yüzey özelliklerinin (pürüzsüzlük, sürtünme ve gürültü) iyileştirilmesine ve yüzey kusurlarının giderilmesine ihtiyaç vardır.

Orta durumda, kaplama yapısal olarak sağlamdır ancak çukurlar, blok çatlaması, rastgele çatlama ve termal çatlama gibi minör yüzey bozulmalara sahiptir. Yol yüzeyinde dalgalanmaların yani drenaj problemlerinin olup olmadığı kontrol edilmelidir. Tabandan yüzeye doğru agrega sökülmesi ve tabakaların birbirinden ayrılma durumlarının kontrolü için karot numuneleri alınmalıdır.

Zayıf durumda, kaplamada “Orta Durum” altında açıklanan, timsah sırtı çatlakları, tekerlek izi oluşumu, durma ve kalkma bölgelerinde enine yığılmalar, hilal şeklinde çatlaklar, tabandan yüzeye ve yüzeyden tabana agrega sıyrılmaları ve olağan malzeme kaynaklı sorunlar mevcuttur.

Kötü durumda, kaplamada “Zayıf Durum” sergilemesinin yanı sıra önemli yüzey bozulmaları, yüzeyden tabana ve tabandan yüzeye doğru agrega sıyrılmaları, termal genleşme ve yapısal sıkıntılar sergilemektedir (Harrington et al. 2014).



Şekil 5. BSK kaplamanın görsel olarak değerlendirilmesi (Harrington et al. 2014).

BSK kaplamanın görsel olarak değerlendirmesine göre Tablo 1’de verilen yöntemler ile iyileştirilerek bağ kurulmuş veya bağ kurulmamış bir beton kaplama yapılması uygun ve etkili bir çözüm olacaktır.

Tablo 1. BSK kaplamanın iyileştirilmesi için uygulanacak yöntemler (Harrington et al. 2014).

Kaplama Durumu	Uygulanacak Yöntemler
İyi Durum	Noktasal Onarımlar Uygun maliyetli noktasal yüzey onarımları ve / veya noktasal yapısal onarımlar yapılarak bağ kurulmuş beton kaplama yapılabilir.
Orta Durum	Frezeleme / Minör Noktasal Onarımlar Uygun maliyetli frezeleme ve minör noktasal onarımlar ile eksiklikler etkili bir şekilde çözülebilir ve bağ kurulmuş beton kaplama yapılabilir.
Zayıf Durum	Frezeleme ve Yama Yapılması Uygun maliyetli noktasal onarımlar ve / veya frezeleme ile uniform bir altyapı sağlanarak bağ kurulmamış beton kaplama yapılabilir.
Kötü Durum	İlave Onarımlar Mevcut veya potansiyel dengesiz koşullar veya büyük eksiklikler (ıslak alt zemin, malzeme kaynaklı kusurlar), koruma tekniklerinin bir kombinasyonu ile (frezeleme, drenaj güçlendirmeleri, tam derinlikte kesilmemiş gro beton yamalar) bir arada etkili bir şekilde ele alınarak uygun maliyetli bağ kurulmamış bir beton kaplama yapılabilir.

Yapısal güçlendirmenin tasarlanması yeni bir kaplamanın tasarlanmasından daha zordur. Ana tanımlama aşamalarından biri, mevcut kaplama yapısının ve tabii zemin özelliklerini belirlenmesidir. Kaplama konfigürasyonunun ortaya koyulabilmesi için, karot deliklerinin açılarak kaplama katmanlarının kalınlığının bulunması ve tercihen jeoradar incelemelerinin yapılması gerekmektedir (Pożarycki et al. 2017). Daha sonra belirli katmanların rijitliklerinin düşen ağırlık deflektometresi (FWD) gibi aletlerle belirlenmesi gerekmektedir. Çeşitli konfigürasyonlarda tekerlek yükleri ve sıcaklık gradyan yükü tarafından üretilen gerilme durumları belirlenerek kaplamanın yorulma ömrü ampirik formüllerden hesaplanmaktadır.

Karot numune alınması

Görsel değerlendirme ile bazı durumlarda hasar nedenlerini ve çatlak derecesini belirlemek zor olabilmektedir. Karot analizleri görsel değerlendirme ile elde eden bilgileri desteklemekte kullanılabilmektedir. Tabaka kalınlıklarının ve kaplama durumunun değerlendirilmesi için 1,6 km uzunluk için her şeritten en az iki karot alınması gerekmektedir (Harrington et al. 2014).

Karot alınması, kalınlıkların belirlenmesinde ve kaplamanın k değerinin belirlenmesinde kullanılmaktadır. Ayrıca, tabaka malzemelerinin türü ve durumu, kaplama bozukluklarının derinliği ve eğer mevcut kaplama asfalt veya kompozit ise, tabakalar arasındaki bağın durumunun belirlenmesi için kullanılmaktadır. Asfalt ve kompozit kaplamalar için, kaplamalar arasındaki bağ değerlendirilmek ve kalan asfaltın (varsa frezelemeden sonra) beton kaplama tasarımı varsayımlarına uygun olup olmayacağını belirlemek için sıyrılmış tabakaları tanımlamak çok önemlidir.

Defleksiyon testi

Kaplama defleksiyon testi, kaplama yapısal özelliklerinin değerlendirilmesinde kullanılan etkili bir yöntemdir. Elde edilen veriler ile geri hesaplama yöntemleri kullanılarak elastisite modülü ve k -değeri hesaplanmaktadır. Özellikle orta ve daha iyi durumda olan veya düşük hacimli yollarda defleksiyon testlerinin yapılması gerekli değildir. Gerçekleştirildiğinde, yarım mil başına şerit başına en az bir test yapılmalıdır.

Birkaç tür defleksiyon cihazı mevcuttur ve hepsi temelde aynı şekilde çalışmaktadır. Bilinen bir yük kaplama yüzeyine uygulanarak ortaya çıkan defleksiyon ölçülmektedir. Düşen ağırlık cihazı (FWD) gibi hareketli tekerlek yüküne benzer büyüklükte ve sürede yük uygulayabilen herhangi bir cihaz kullanılabilmektedir. Defleksiyon testi sonuçları aynı zamanda kaplama defleksiyon profillerinin belirlenmesi, tabaka özelliklerinin geri hesaplama

yöntemleri ile belirlenmesi, yük aktarım özelliklerinin belirlenmesi ve plak köşelerinde oluşabilecek boşluk durumlarının değerlendirilmesi için kullanılabilir.

California taşıma oranı (CBR) açısından kaplama altındaki tabii zemin / alt temel koşullarının belirlenmesi

Düşük maliyetli, kullanımı kolay ve yerinde ölçüm yapan bir dinamik koni penetrometresi (DCP) ile CBR açısından zemin taşıma kuvveti belirlenmektedir. Bu araç, ince taneli ve granül tabii zeminler ile granüler temel ve alt temel malzemelerinin yerindeki dayanımlarının belirlenmesi için kullanılmaktadır.

8 kg bir ağırlık 575 mm yüksekliğe yükseltilerek konik ucun toprağa veya test edilen malzemeye batırılması amacıyla düşürülür. Çıktı, darbe başına inç (mm) cinsinden ifade edilen bir penetrasyon oranıdır (PR). DCP kullanılarak bulunan toprak dayanımı (zemin taşıma kuvveti) ile ilgili testler veya standart penetrasyon testi, tabii zemin stabilitesi hakkında gerekli bilgiler sağlanmaktadır. DCP testinin avantajları aşağıda sıralanmaktadır:

- Düşük maliyetli
- Kullanımı kolay- bir operatör dakikalar içinde eğitilebilir
- Büyük penetrasyon derinliği — 92 cm derinliğe kadar veri toplanabilir
- Hızlı ve büyük miktarda veri toplanabilir ve değerler hızlı bir şekilde CBR'a dönüştürülebilir.

Her ne kadar DCP, yoğunluğu doğrudan ölçmese de yoğunluğu penetrasyon oranı PR ile ilişkilendirerek oldukça üniform bir malzemenin yoğunluğunu değerlendirmek için kullanılabilir. Bu şekilde, az sıkıştırılmış veya "yumuşak" noktalar belirlenebilmektedir. CBR değeri, kaplama kalınlığı tasarımı açısından da önemli olabilir. Beton kaplama tasarım yöntemleri, kaplama kalınlığının belirlenmesi için yatak katsayısı (k) cinsinden ifade edilen taşıma kapasitesini kullanmaktadır. k değerinin ölçülmesi zor olsa da Tablo 2' de verildiği üzere CBR değerinden nispeten daha kolay bir şekilde tahmin edilebilmektedir.

Tablo 2. Tabii zemin tipleri ve yaklaşık destek değerleri

Zemin Türü	Destek	k (psi/in.)	CBR
İnce taneli; silt ve kil büyüklüğünde partiküller	Düşük	75 ila 120	2.5 ila 3.5
Orta derecede silt ve kil içeren kum ve kum çakıl karışımı	Orta	130 ila 170	4.5 ila 7.5
Göreceli olarak plastik tane içermeyen kum ve kum-çakıl karışımı	Yüksek	180 ila 220	8.5 ila 12.0

Frezeleme

Yapısal taşıma kaybına neden olduğu için frezeleme miktarının minimize edilmesi gerekmektedir. Kompozit harekete katkıda bulunabilecek ve trafik yüklerini taşımaya devam edebilecek iyi durumdaki bir BSK yüzeyin kaldırılmasına gerek yoktur. Tipik olarak, bağ kurulumunun iyileştirilmesi amacıyla tüm BSK yüzeylerinin frezelenmesi gerekli değildir.

Bağ kurulmuş bir beton kaplamanın uygulanmasından önce BSK yüzeye frezeleme yapılmasının ana amaçları; yetersiz bir bağ yüzeyi ile sonuçlanacak olan yumuşak asfalt malzemesi içeren önemli yüzey bozulmalarını gidermek, minimum kaplama derinliğini sağlamak amacıyla düşük kotlu noktaları doldurmak, gereken beton miktarını azaltmak amacıyla yüksek kotlu noktaları azaltmak ve bordür veya bitişik yapı kotlarını eşleştirmek olarak sıralanabilir.

Mevcut özelliklerin eşleştirilmesi veya profil kotundaki düşey değişimin en aza indirilmesi, genellikle frezeleme derinliğinin belirlenmesinde birincil kriter olmaktadır. Bu durumda, mevcut asfalt kaplama kalınlığının ve durumunun kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesi, üzerine beton kaplama yapılacak frezelemeden sonra kalacak asfaltın yüklerin taşınması için yapısal destek sağlayacak kadar sağlam ve kalınlıkta olmasını sağlamak için yapılmalıdır.

BSK kaplama belirli bir profile kadar frezelandığında, frezeleme işlemi tamamlandıktan sonra bağ kurulması için minimum 75 mm kalınlıkta sağlam durumda asfalt tabaka kalması gerekmektedir. Çoğu yüzey sıkıntısı frezeleme yoluyla giderilebilmektedir. Frezeleme, yüzey bozulmalarının 50 mm veya daha fazla olduğu yerlerde kullanılabilir. Kaldırılan asfalt miktarı, yüzey bozukluklarının türü ve seviyesi ile asfaltın kalınlığına bağlıdır. Frezeleme, kaplama için gereken beton hacminde miktar aşımına neden olacak brüt düzensizlikleri gidermek için kullanılabilirken mükemmel bir enine kesit elde etmek veya topakları tamamen çıkarmak gerekli bir şart değildir.

Soyulmuş (gevşek) bir asfalt tabakası bağ kurulabilecek sağlam bir yapısal tabaka sağlanması amacıyla tamamen kaldırılmalıdır. Kaldırılan asfalt malzeme puzolanik çimento ile işlenerek doğal agregaya uygun bir alternatif olarak kullanılabilir (Seferoğlu et al. 2018). Taş ocağından çıkarılacak agreganın kazıma, kırma ve eleme maliyetleri azaltıldığından doğal kaynakların korunumu da sağlanmış olmaktadır (Seferoğlu vd 2019).

Yapım sırasındaki trafik, özellikle beton yüklü kamyonlar, frezelemeden sonra kalan asfalt kaplamada ciddi hasarlara neden olabilmektedir. Delaminasyonun önlenmesi için yeterli kalınlıkta bir asfalt tabakası gerekmektedir.

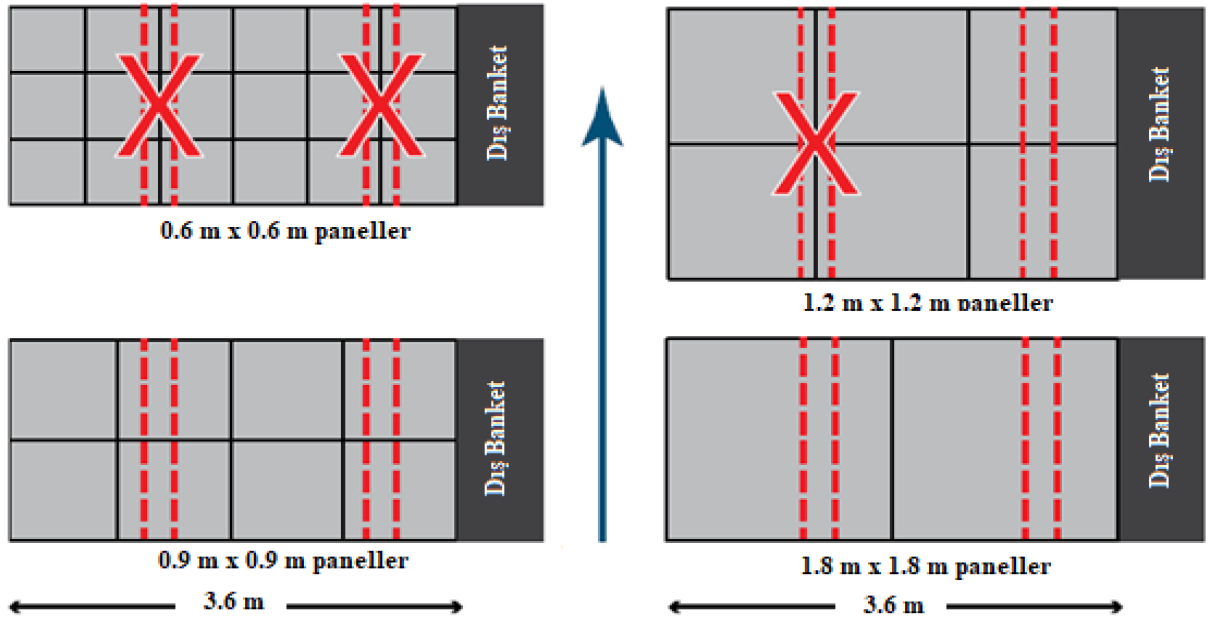
Derz Kesimi

BSK kaplama üzerine yapılan bağ kurulmuş beton kaplamalar için önerilen derz modeli, beton ile BSK kaplama arasındaki farklı hareketler ile sıcaklık farklarından oluşan gerilmeleri azaltmak için tipik olarak 0,9-2,4 m aralığında oluşturulan küçük kare panellerdir. Panellerin fit cinsinden uzunluk ve genişliğinin, inç cinsinden kaplama kalınlığının 1.5 katı ile sınırlandırılması önerilmektedir. Şekil 6'da gösterildiği üzere boyuna derzler tekerlek yolu üzerinde olmayacak şekilde düzenlenmelidir. Panel boyutlarının kısa olması nedeniyle ve iki tabaka arasındaki bağ kısıtlayacak kuvvetleri en aza indirmek için enine derzlerde kullanılan kayma donatıları ile boyuna derzlerde kullanılan bağlantı donatılarının kullanılması gerekli değildir (Harrington et al. 2014).

Kayma donatıları, önemli miktarda kamyon trafiğine maruz kalacak asfalt kaplama üzerine yapılan bağ kurulmamış beton kaplamalarda tipik olarak 175 mm ve daha fazla beton kalınlıkları için kullanılmaktadır. Kalınlığı 150 mm veya daha az olan kaplamalar için, panellerin fit cinsinden uzunluk ve genişliğinin, inç cinsinden kaplama kalınlığının 1.5 katı ile sınırlandırılması, 150 mm 'den daha kalın kaplamalar için, panellerin fit cinsinden uzunluk ve genişliğinin, inç cinsinden kaplama kalınlığının 2 katı ile sınırlandırılması önerilmektedir (Harrington et al. 2014).

Enine derzler, asfalt üzeri bağ kurulmuş ve bağ kurulmamış beton kaplamanın yüzeyinden, kaplama kalınlığının en az %25'i, en fazla %30'u kalınlığında kesilmelidir. Söz konusu derzler, yeterli bir agrega kenetlenmesi ile plakalar arası yük aktarımını sağlamalıdır. Boyuna derzler, ankrajlardan dolayı beton kaplamanın yüzeyinden, kaplama kalınlığının en az % 40'ı ve en fazla % 45'i kalınlığında kesilmelidir. Örneğin 27 cm kalınlığında beton kaplamada derz derinlikleri enine büzülme derzlerinde 7–8 cm ve boyuna büzülme derzlerde ise 11–12 cm olmalıdır. Tüm geleneksel derz genişlikleri normalde 4,8 mm +/- 1,5 mm 'dir. Tüm erken giriş derz kesimleri ise 3,3 mm +/- 1,5 mm genişlikte ve minimum T / 4 cm derinliğindedir (Müdürlüğü 2016).

Plakalar arasında yük aktarımını geliştiren ve faylanmayı önleyen kayma donatıları, akma dayanımları 420 ila 480 MPa olan düz yuvarlak çelikten imal edilmiş, en az 25mm çapında (aşırı trafik yüklerine maruz kalacak üstyapılarda en düşük kayma demiri çapı 30 mm) ve 500mm uzunluğunda olmalıdır. Kayma demiri aralıkları genellikle 25cm'dir. Emniyet şeritlerinde bu mesafe 2 katına çıkarılabilir. Boyuna derzlerden ve plaka kenarından kayma demiri mesafesi 25 cm olmalıdır (Müdürlüğü 2016).



Şekil 6. Boyuna derzlerin tekerlek yolu üzerinde olmayacak şekilde düzenlenmesi (Harrington et al. 2014)

Iowa'da düşük hacimli karayollarında BSK kaplama üzeri bağ kurulmuş beton kaplamalar üzerine yapılan çalışmalar, büzülme derzlerinin sadece ortalama yüzde 5'inin 10 yıl sonra kırıldığını göstermiştir. Bu sonuçlar, benzer düşük hacimli yollarda, kaplama ebatlarının artırılarak veya beton kaplama kalınlığının azaltılarak daha uygun maliyetli tasarımlar oluşturulabileceğini göstermektedir. Daha önceden yapılmış olan 150 mm kalınlığından az veya ona eşit olan bağ kurulmuş kaplamalarda derz yerlerinin tipi olarak dolgusu yapılmamıştır.

MnDOT (2013) tarafından yapılan çalışmalar, derzlerin dolgusunun yapılmasının performans artışı sağladığını göstermiştir. Çünkü, beton kaplama altında bulunan BSK kaplamaya bağlı bir durumdadır ve derz dolgusu yapılmamış olan derzlere sızan suların drene edilememesi durumu aradaki bağı zayıflatarak plakaların erken kırılmasına neden olmaktadır.

Kurulan Bağın Kopması

BSK kaplama ile yeni yapılacak beton kaplama arasında kurulması istenen bağ, temiz ve pürüzlü bir yüzey oluşturmak amacıyla BSK kaplamanın frezelenmesi ile elde edilebilmektedir (Rasmussen and Rozycki 2004). İki tabaka arasında kurulan bu bağ monolitik bir harekete neden olarak nötr eksenin UTW kaplamasının ortasından altına kaymasına ve dolayısıyla yükün paylaşımına neden olmaktadır. Bu durum ise eğilme gerilmelerini UTW'nin dayanabileceği bir aralığa getirmektedir, ancak kayma gerilmeleri nötr ekseninde maksimum olarak kalmaktadır (Mack et al. 1998).

Kayma gerilmeleri, monolitik veya kompozit etkinin ortadan kalkmasıyla sonuçlanan ara yüzeyde gerilme birikimi yaratan tekrarlı trafik yüklerindeki artışla daha da fazla

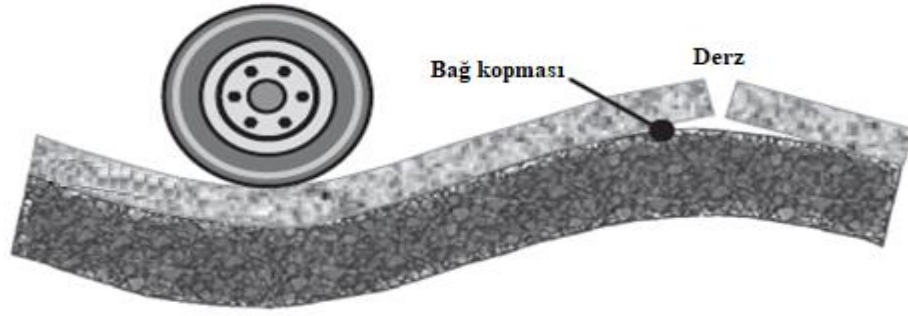
artmaktadır. Yerçekimi nedeniyle oluşan içsel gerilmeler UTW'nin BSK katmanından kopmasına ve dolayısıyla yüzeyde bozulmalara yol açarak kaplamanın uzun süreli servis ömrünü etkileyecektir (Delatte and Sehdev 2003; Bissonnette et al. 2011). Bu nedenle; UTW, normal çekme gerilmesinden ve trafik ile çevresel yüklerin neden olduğu yatay kayma gerilmesinden daha iyi bir ara yüzey bağ kuvvetine sahiptir.

Tabakalar arasındaki bağın kalitesi ve gücü, yüzey hazırlığına (özel yapım tekniği, BSK yüzey dokusu) ve UTW yerleştirme prosedürüne bağlıdır (Kim and Lee 2013). Bu nedenle işçilik, bağın kalitesinin ve gücünün elde edilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Ancak saha gözlemleri, özellikle araçların yatay kuvvet uygulamalarının ve dönme hareketlerinin daha muhtemel olduğu otoparklar, dik rampalar ve kavşaklar gibi yol kesimlerinde kuvvetli bir bağın kurulma zorunluluğu vurgulamaktadır (Diakhaté et al. 2011). Ayrıca kuvvetli bağ, agrega parçalarının aşınma ve erozyonunu azaltmaktadır. Kaplama tabakaları arasındaki yüzeyler hem normal hem de kayma gerilmelerine sürekli olarak maruz kalmaktadırlar. Tabakalar arası kurulan bağın kopması üç farklı gerilme durumundan kaynaklanabilmektedir. Bunlar; yalnız çekme, yalnız kayma ve kayma gerilmelerinin basınç veya çekme gerilmeleri ile kombinasyonundan oluşan gerilmelerdir (Granju et al. 2004; Bissonnette et al. 2011; Chabot et al. 2013).

İnşaat aşaması sırasında elde edilen yapışma, beton kaplamada oluşan çekme çatlakları dolayısıyla arakesitte meydana gelen kayma gerilmelerin yoğunluğu, yol yapımı sırasında olumsuz koşullar (örneğin yağ lekeleri), beton kaplamanın yetersiz yüzeysel pürüzlülüğü gibi nedenlerden dolayı zaman içinde kademeli olarak azalmaktadır (Han 2005).

BSK kaplama ile beton kaplama arasındaki bağın kopma nedenleri olarak harici mekanik yükler ile BSK ve beton kaplama arasındaki uzunluk değişimleri gösterilmektedir. Her iki durumdan kaynaklanan aderans eksikliği, öncelikle kaplama kenarlarında ve derzlerde başlayacaktır (Bissonnette et al. 2011).

Yüklerin kaplama üzerindeki etkisi Şekil 7'de görülebilir. Tekerlek yükü altında kaplamanın bazı kısımları çekme gerilmelerine maruz kalabilir. Beton ve BSK kaplamanın farklı tepkilerinden dolayı, bu çekme gerilmeleri derz veya çatlak bölgesinde oluştuğunda esnek kaplama ile beton kaplama arasındaki bağların kopmasına neden olabilir. Tekrarlı yük etkileri, ara yüz boyunca çatlakların büyümesine katkıda bulunur. Sıcaklık değişimi farklı uzunluk değişimlerine neden olmaktadır. Bu durum ise, kaplamanın çatlamasına, BSK ve beton kaplama arakesitindeki kayma gerilmelerinin artışına neden olarak kaplamalar arasında kurulan bağın kopmasına neden olmaktadır (İsla et al. 2015).



Şekil 7. Trafik yüklerinden dolayı bağın kopması durumu

Mevcut Tasarım Yöntemleri

BSK kaplama üzeri bağ kurulmuş veya bağ kurulmamış beton kaplama tasarımı, mevcut kaplamaların karakterizasyonu, kritik tasarım değişkenlerinin tanımlanması ve ardından gerekli kaplama kalınlığının hesaplanması işlemidir. Mevcut tasarım yöntemleri aşağıda verilmektedir:

- BSK kaplama üzeri bağ kurulmuş beton kaplama (BCOA) tasarımı (ACPA 2020)
- BCOA ME (Vandenbossche 2013)
- Kaplama yapılarının tasarım kılavuzu (AASHTO 1993)
- Mekanistik-Ampirik Tasarım Rehberi (AASHTO 2008a)
- Optipave V2.0. (TCPavements 2010)
- Illinois Ulaştırma Bölümü esnek kaplama üzeri bağ kurulmuş beton kaplama elektronik tablosu (Roesler et al. 2008)

ACPA BCOA yöntemi

ACPA (2020), daha önce yayınlanmış olan iki AASHTO yönteminde olmayan daha kısa kaplama boyutlarına sahip daha ince (50 mm ile 100 mm) bağ kurulmuş BSK tabakası (BCOA) üzeri beton kaplamalarının tasarımı için mekanik bir yöntem geliştirmiştir. Amerikan Beton Kaplama Birliği'nin geliştirdiği bu yöntem, tasarımcının önerilen kaplama kalınlığını ve derz aralığını trafik, beton dayanımı (kopma modülü), BSK kaplama kalınlığı ve kompozit tabii zemin / alt temel sertliği (k-değeri) ile birlikte değerlendirdiği yinelemeli bir tasarım sürecinden oluşmaktadır. Prosedür, deneme tasarımı için izin verilen kamyon yüklerini belirlemektedir.

ACPA BCOA, 75 ila 150 mm arasındaki kaplama kalınlığı ve maksimum 1,8 m panel boyutu için geçerlidir. Daha kısa derz aralıkları (hem enine hem de boyuna) tipik olarak 3,6 m genişliğinde bir şerit için 1,2 m x 1,2 m veya 1,8 m x 1,8 m boyutlarında tasarlanmaktadır. ACPA BCOA web uygulaması, bu aralıklar dışındaki tasarımlara izin vermezken deneme tasarımının değiştirilmesi gerektiğini veya bağ kurulmuş BSK kaplama üzeri beton kaplamanın uygun bir çözüm olamayacağını belirtmektedir. Ayrıca, BCOA tasarımları 150 mm kalınlığında

ve 1,8 m genişliğine yaklaştığında, aşağıda açıklanan BCOA-ME prosedürü göz önünde bulundurulmalıdır.

ACPA BCOA tasarım aracı, yaklaşık 200 şehir için sahaya özgü etkili sıcaklık gradyanları dahil olmak üzere Amerika Birleşik Devletleri'ndeki herhangi bir iklim bölgesinde yapısal tasarımlara izin verecek şekilde geliştirilmiştir. ACPA BCOA kalınlık tasarım aracı için giriş şartları aşağıdaki gibidir:

- Eşdeğer tek dingil yükü tekerrür sayısı
- İzin verilen çatlak kaplamaların yüzdesi
- Güvenilirlik
- Tasarım yeri (bölgeye özgü etkili sıcaklık gradyanını belirlemek için)
- BSK kaplama- Kalan asfalt kalınlığı ve modülü
- Kompozit tabi zemin / alt temel k değeri
- Beton kaplama; dayanım, termal genleşme katsayısı (CTE)
- Önerilen kaplama boyutu ve yüzey hazırlığı

BCOA-ME yöntemi

Vandenbossche (2013), BCOA-ME kapsamında yeni bir tasarım yöntemi geliştirmiştir. Uzun süredir kullanılmakta olan çok sayıda bağ kurulmuş BSK kaplama üzeri beton kaplama yollarının hasar modları yeniden değerlendirilmiştir. Beton kaplamaların tasarımında geleneksel olarak kullanılan öncü yöntemlerin, geliştirilmeleri sırasında mevcut olan sınırlı miktarda bilgiye dayanması nedeniyle bu durum kritik öneme sahiptir. Yapılan yol performans incelemeleri, hasar modunun daha önce varsayıldığı gibi kaplama kalınlığı tarafından değil, esas olarak levha boyutlarından belirlendiğini ortaya koymuştur.

BCOA-ME yöntemi, 1,35 m x 1,35 m veya daha küçük kaplama boyutları için oluşan köşe çatlaklarını ele alan ACPA BCOA performans tahmin modelini, 3,6 m genişliğindeki plaklarda oluşan enine çapraz çatlakları ele alan Colorado Ulaştırma Bölümü performans tahmin modelini ve 1,8 m x 1,8 m boyutlarındaki plaklarda oluşan boyuna çatlakları ele alan yeni geliştirilen bir performans tahmin modelini içermektedir (Sheehan et al. 2004). 1,8 m x 1,8 m boyutlarındaki plaklarda, diyagonal çatlaklar tekerlek yolu ile enine derzin kesişiminde, boyuna çatlakların geliştiği şekilde başlamaktadır. Yanındaki enine derze doğru yayılacağına, boyuna çatlağın gelişimindeki gibi, şerit / banket derzine doğru yayılarak diyagonal bir çatlak oluştururlar. Bu nedenle hem boyuna hem de çapraz çatlaklar için başlangıç gerilimi aynıdır.

Tasarım süreci ayrıca, Vandenbossche and Barman (2010) çalışmalarına dayanarak, yansıma çatlaklarının oluşma potansiyelini belirlemek için bir kontrol aşaması içermektedir. Bu

kontrol aşaması, tasarım kalınlığını etkilemezken yansıma çatlaklarını önleyici tedbirlerin alınması gerekip gerekmediğini belirtmektedir. BCOA-ME yöntemi aşağıdakileri içermektedir:

- Majör hasar modları, kaplama büyüklüğünün bir fonksiyonu olarak yeniden tanımlanır ve diğer prosedürlerin aksine, tüm modlar bu prosedürde ele alınmaktadır.
- Asfalt sertliğinin sıcaklıkla değişkenliği göz önünde bulundurulur.
- Eşdeğer sıcaklık gradyanı yerel koşullara göre tanımlanır.
- Tahmin modelleri gerçek performans verileri ile kalibre edilmiştir.
- Lif kullanımının kaplamanın performansı üzerindeki etkileri daha doğru bir şekilde ölçülür.
- Kurulan bağın kopabilme etkisi göz önünde bulundurulur.

BCOA-ME yöntemi, aşağıdaki bilgiler girildikten sonra kaplama kalınlığı hesaplanmaktadır.

- Trafik
- Tasarım konumu; boylam, enlem ve yükseklik, iklim bölgesi
- Mevcut BSK kaplamaları; kalan asfalt kalınlığı, yorulma çatlaklarının yüzdesi, sıcaklık nedenli çatlakların varlığı
- Kompozit tabi zemin / alt temel k-değeri
- Beton kaplamanın dayanım ve termal genleşme katsayısı (CTE)

1993 AASHTO tasarım rehberi

AASHTO metodu, eşdeğer tek dingil yükü tekerrür sayısının kaplama performansına etkisi ve yol testi sonuçları dikkate alınarak hazırlanmıştır. Kaplama servis yeteneğindeki azalma göz önünde tutulmaktadır.

Proje güzergahı boyunca dış tekerlek yolundaki defleksiyonların koşulları yeterince değerlendirilebilmesi için yeterli bir aralıkta ölçülmesi gerekmektedir. 30 ila 300 m arası aralıklar tipik değerlerdir. Ağır bir yük defleksiyon cihazı (örneğin, Düşen Ağırlık Deflektometresi) ve 4082 kg ağırlığında bir yük büyüklüğü önerilmektedir. Defleksiyonlar, yükün merkezinde ve yükten en az bir tane olmak üzere başka bir mesafede ölçülmelidir.

Test edilen her nokta için, tabii zemin esneklik modülünü (M_R) ve üstyapı efektif modülü (E_p) geri hesaplamalarının yapılması gerekmektedir.

Tabii zemin esneklik modülü (M_R) ve tüm kaplama yapısının (üstyapı) efektif modülü (E_P) tayini

Yükten yeterince uzak mesafelerde, kaplama yüzeyinde ölçülen defleksiyonlar yalnızca tabii zemin deformasyonundan kaynaklanır ve ayrıca yük plakasının boyutundan bağımsızdır. Tek bir defleksiyon ölçümünden ve yük büyüklüğünden tabii zeminin esneklik modülünün aşağıdaki denklemi kullanarak geri hesaplanması yapılır.

$$M_R = \frac{0.24 P}{d_r r} \quad (1)$$

Burada;

M_R = geri hesaplaması yapılan tabii zemin esneklik modülü, psi

P = uygulanan yük, pound

d_r = yükün merkezinden r uzaklıkta meydana gelen defleksiyon, mils

r = yükün merkezinden olan uzaklık, inç

Tabii zemin esneklik modülünün geri hesaplamasının yapılabilmesi için kullanılan defleksiyon, üstteki tabakaların etkilerinden bağımsız olarak, M_R 'nin iyi bir tahminini sağlayacak kadar yeterince uzakta ölçülmeli, ancak aynı zamanda doğru bir şekilde ölçmek için çok küçük olmayacak kadar da yakın olmalıdır. Minimum mesafe aşağıdaki ilişkiden belirlenebilir:

$$r \geq 0.7a_e \quad (2)$$

$$a_e = \sqrt{\left[a^2 + \left(D \sqrt[3]{\frac{E_P}{M_R}} \right)^2 \right]} \quad (3)$$

Burada;

a_e = alt zemin-kaplama ara yüzündeki gerilme dairesinin yarıçapı, inç

a = NDT yük plakası yarıçapı, inç

D = Tabii zeminin üzerindeki kaplama tabakalarının (üstyapı) toplam kalınlığı, inç

E_P = Tabii zeminin üzerindeki tüm kaplama tabakalarının (üstyapı) efektif modülü, psi

Bu yöntemde tasarımcı çok büyük bir M_R değeri kullanmaması konusunda uyarılmaktadır. Tasarım için seçilen M_R değeri, beton kaplama kalınlığı için son derece önemlidir. 20,7 MPa'dan daha büyük bir değer kullanılması, tabii zeminin Yol Test sahasındaki siltli kil A-6 toprak tipinden daha sert olduğunun bir göstergesidir ve sonuç olarak daha fazla destek ve daha uzun bir kaplama ömrü sağlayacaktır.

Defleksiyon testi sırasında asfalt karışımının sıcaklığı belirlenmelidir. Asfalt karışım sıcaklığı doğrudan ölçülebilir. Yüzey veya hava sıcaklıklarından tahmin edilebilir.

Tabii zemin esneklik modülü (M_R) ve tabii zeminin üzerindeki tüm katmanların (üstyapı) toplam kalınlığı biliniyorsa veya tahmin edilebiliyorsa, tüm kaplama yapısının (üstyapı) efektif modülü E_P , yük plakasının merkezinde ölçülen defleksiyondan aşağıda verilmekte olan denklem ile belirlenmektedir.

$$d_0 = 1.5pa \left\{ \frac{1}{M_R \sqrt{1 + \left(\frac{D}{a} \right)^2 \left(\frac{E_P}{M_R} \right)^2}} + \frac{\left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{D}{a} \right)^2 \left(\frac{E_P}{M_R} \right)^2}} \right]}{E_P} \right\} \quad (4)$$

Burada;

d_0 = yük plakasının merkezinde ölçülen defleksiyon (ve 68 ° F'lik standart bir sıcaklığa ayarlanmış), inç

p = NDT yük plaka basıncı, psi

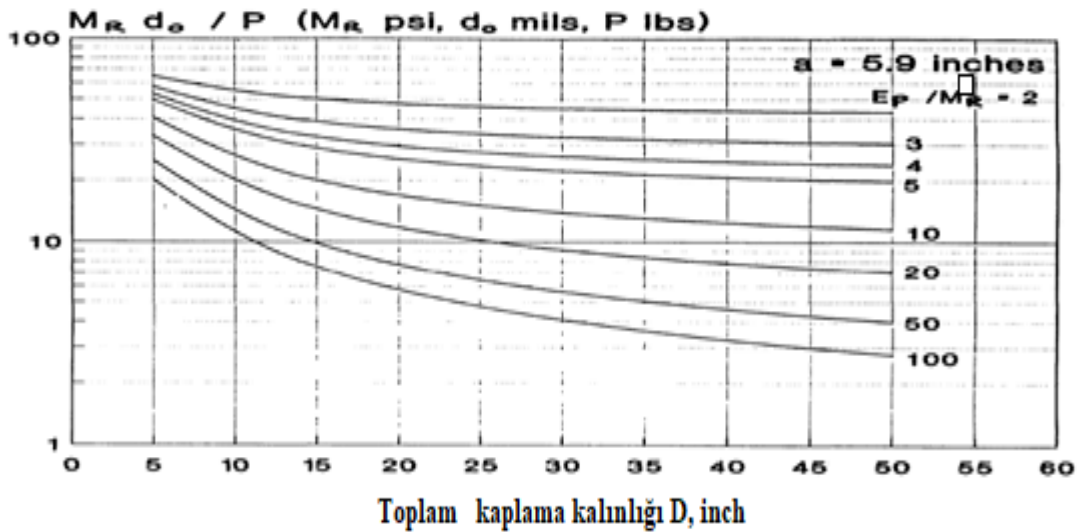
a = NDT yük plaka yarıçapı, inç

D =toplam üstyapı kalınlığı, inç

M_R = tabii zemin esneklik modülü, psi

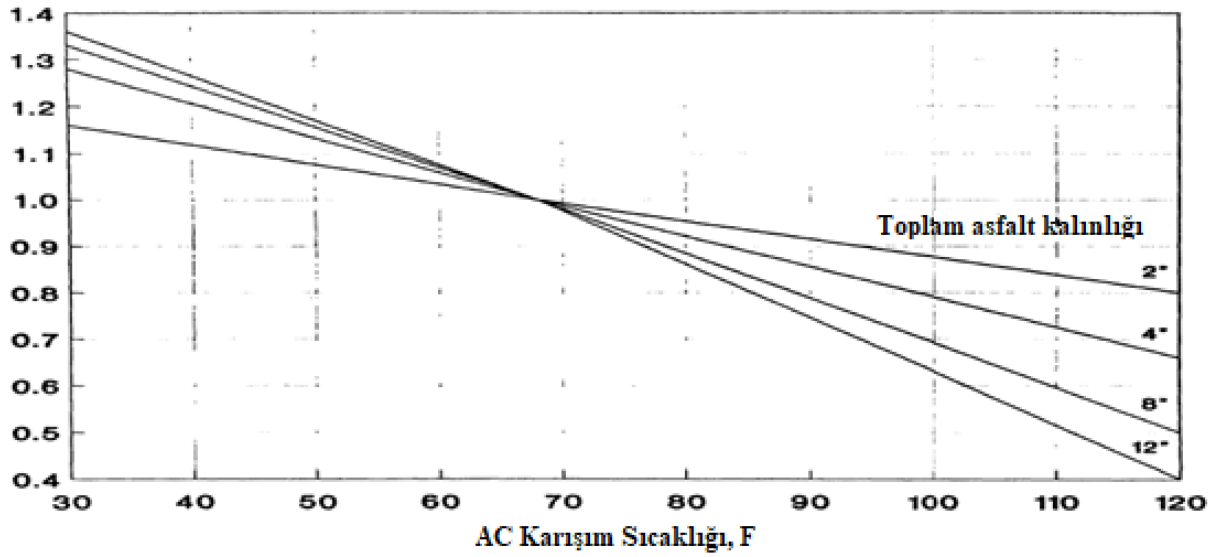
E_P = üstyapı efektif modülü, psi

Yükleme plakasının yarıçapının 15 cm (5.9 inç) olması durumunda, E_P/M_R oranının belirlenmesi için Şekil 8 kullanılmaktadır. Bu şekilde M_R 'nin bilinen veya tahmin edilen değeri için E_P belirlenebilmektedir.



Şekil 8. E_P/M_R oranının belirlenmesi

Kaplama sıcaklığının 20 °C (68 °F) 'den farklı olması durumunda üstyapı efektif modülü granüler ve bitümlü temelli üstyapılar için, Şekil 9'dan tespit edilen sıcaklık düzeltme faktörleriyle çarpılarak belirlenmelidir.



Şekil 9. Defleksiyon (d0) için asfalt sıcaklığı düzeltme faktörü

Efektif dinamik k modülünün tayini

Geri hesaplaması yapılmış olan tabii zemin esneklik modülü (M_R); üstyapı efektif modülü (E_p) ve üstyapı toplam kalınlığı (D_{SB}) kullanılarak Şekil 10 üzerinden efektif dinamik k-değeri bulunur. Efektif dinamik k-değerini tahmin etmek için kullanılan geriye hesaplaması yapılmış tabii zemin esneklik modülü değerinin, mevcut AC kaplamaların üzerine yapılan AC kaplamaları için tasarım M_R 'si oluşturmaya ilişkin C katsayısı (0.33) ile çarpılmaması gerektiği vurgulanmaktadır. Tek tip bir kesit için tek bir kaplama kalınlığı tasarlanıyorsa, üniform kesitin ortalama etkin dinamik k değeri hesaplanır.

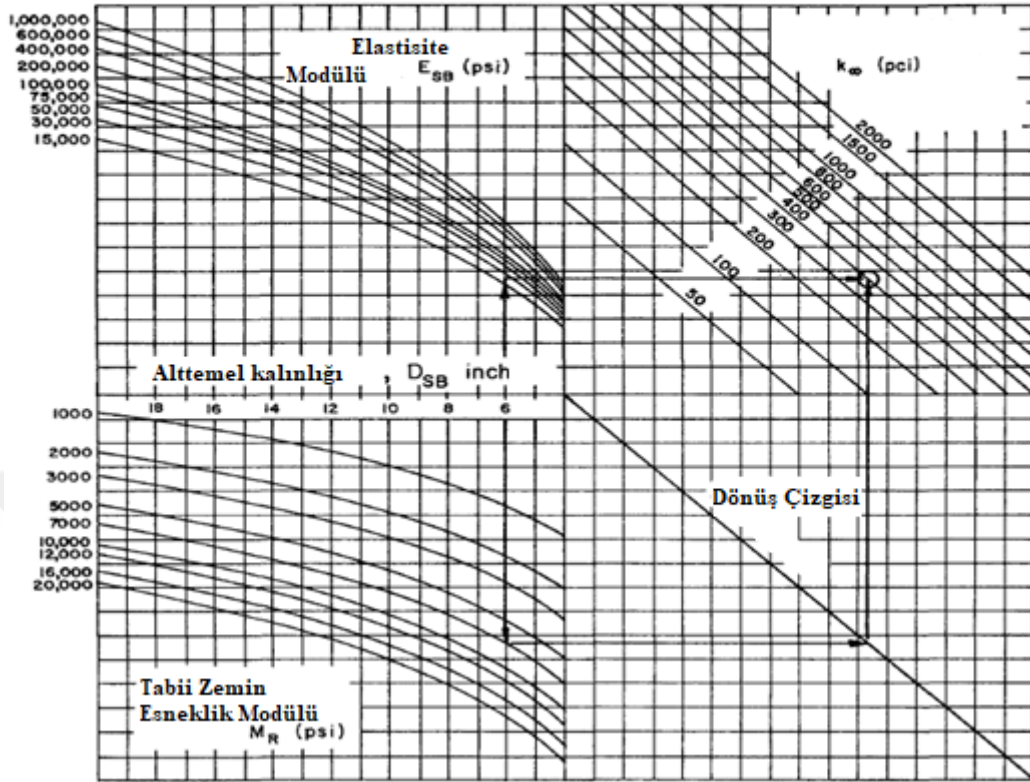
Örnek

$$D_{SB} = 6 \text{ inches}$$

$$E_{SB} = 20,000 \text{ psi}$$

$$M_R = 7,000 \text{ psi}$$

$$\text{Çözüm: } k_{\infty} = 400 \text{ pci}$$



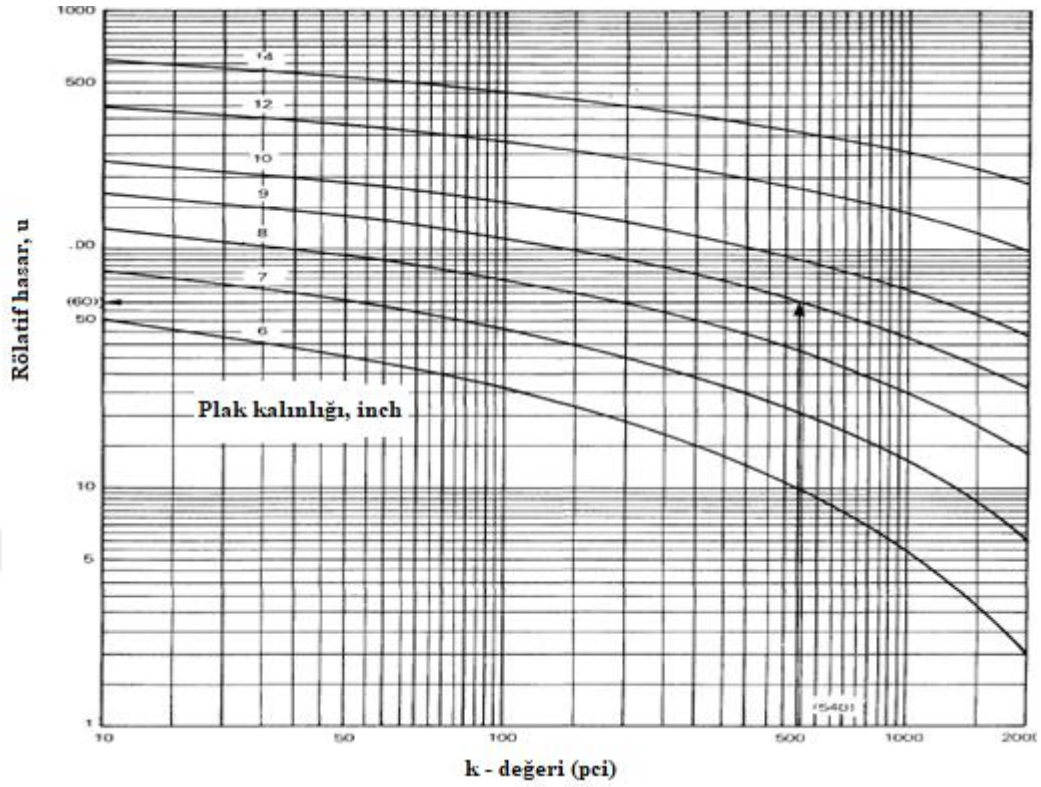
Şekil 10. Efektif dinamik k modülü, k_{∞}

Tabii zemininin esneklik modülü (M_R), don duyarlılığına bağlı olarak yıl içerisinde sürekli değişiklik göstermektedir. Kış aylarında don kabarması kaynaklı zemin boşlukları içinde katılaştıran buz kristalleri nedeniyle yüksek değerlerde M_R , ilkbaharda ise buz kristallerinin çözünerek sıvı hale geçmesi ve bu suların ortamdan uzaklaşmasıyla boşluklu ve gevşek bir hale gelen taban zemini nedeniyle düşük değerlerde M_R görülmektedir. Bu nedenle üstyapı projelendirmesinde kullanılacak efektif dinamik k-değerinin bulunması gerekmektedir.

Yıl içerisinde her ay için yapılacak defleksiyon testinden yola çıkılarak geri hesaplaması yapılan tabii zemin esneklik modülü M_R , tüm kaplama yapısının (üstyapı) efektif modülü E_p ve toplam üstyapı kalınlığı (D) verileri ile Şekil 10'dan yararlanılarak kompozit k modülü değeri hesaplanır. Daha sonra her ay için tespit edilen kompozit k modülü değerinin rölatif hasar faktörü Şekil 11 yardımıyla bulunduktan sonra rölatif hasar faktörlerinin aritmetik ortalamasına ait efektif dinamik k-değeri yine Şekil 11 yardımıyla bulunur.

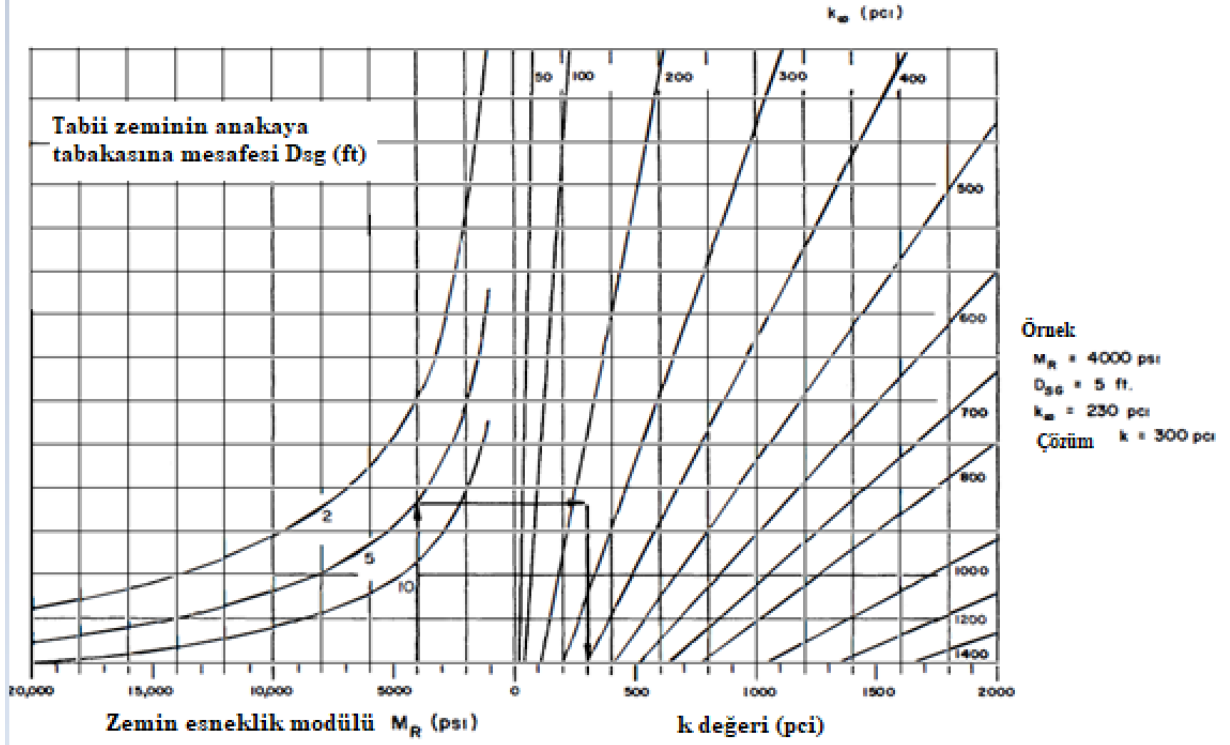
Tabii zeminin esneklik modülünün ilkbahar-çözülme veya kışın-donmuş koşullar için bulunmasında zorluklarla karşılaşıldığı durumlarda, 20.000 ila 50.000 psi'lik pratik esneklik modülü pratik değerleri, kışın-donmuş ve ilkbahar-çözülme koşulları için kullanılabilir. Yaz ve

sonbahar dönemleri için ise esneklik modülü olarak kış şartları için alınan esneklik modülü değerinin % 20 ila % 30 ‘u alınabilir.



Şekil 11. Beton kaplamalarda, kaplama kalınlığı ve altta bulunan destek tabakasına göre rölatif hasarın tahmin edilmesi

Ana kaya (bedrock) tabakası, proje güzergahı boyunca önemli bir uzunluk için tabii zemin tabakasının yüzeyinin 3 m (10 fit) yakınında bulunuyorsa Şekil 12 kullanılarak bunun genel k değeri üzerindeki etkisi ve tasarım kaplama kalınlığı dikkate alınmalıdır.



Şekil 12. Sert temelin yüzeye yakın etkilerini dikkate almak için zemin reaksiyon modülünü değiştirme tablosu (10 fit içinde)

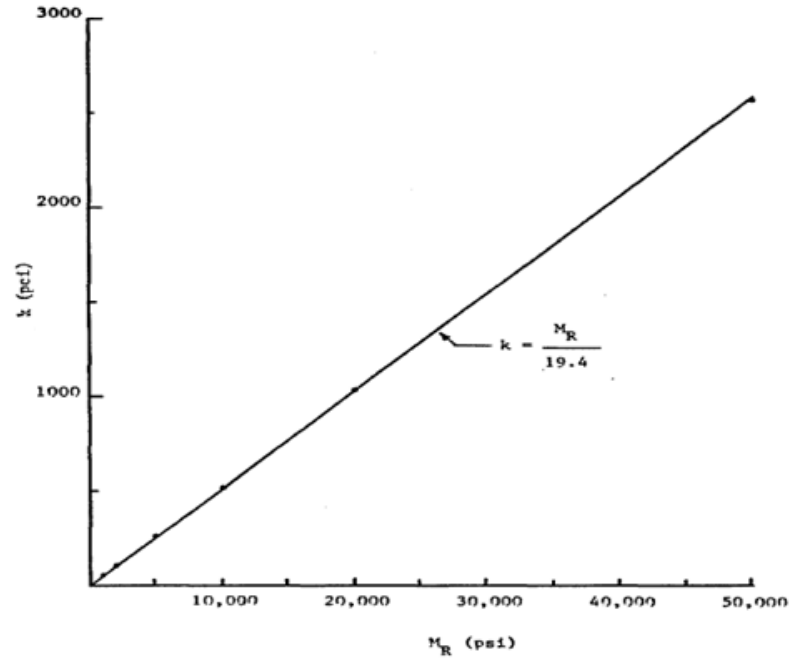
Efektif dinamik k modülü ile tabii zemin esneklik modülü (M_R) arasındaki ilişki Şekil 13’de verilmektedir. Aynı zamanda aşağıdaki gibi bir ilişki de söz konusudur.

$$k = M_R / 19,4 \quad (5)$$

Burada;

k : Yatak katsayısı (pci)

M_R : Esneklik modülü (psi)



Şekil 13. Esneklik modülü ile efektif dinamik k modülü arasındaki ilişki

Efektif statik k modülünün tayini (AC üzeri beton kaplamanın altında)

Efektif statik k modülünün (esnek kaplama üzerine yapılacak beton kaplamanın altındaki) elde edilmesi için, efektif dinamik k modülü değeri 2'ye bölünür.

Servis yeteneği kaybı (ΔPSI)

$\Delta PSI = P_0 - P_t$ olarak bulunur. Burada; P_0 kaplama başlangıçtaki servis yeteneği indeksi, P_t ise kaplamanın performansını kaybettiği yani iyileştirmeye ihtiyaç duyulduğu andaki servis yeteneği indeksidir. Rijit kaplamalarda $P_0 = 4.5$, esnek kaplamalarda $P_0 = 4.2$ ve yüksek trafik hacimli yollarda $P_t = 2.5$ ve düşük hacimli yollarda $P_t = 2.0$ olarak alınması tavsiye edilmektedir.

Yük Transfer Katsayısı (J)

Beton kaplama için derzler ile çatlaklarda yükü aktarma yeteneği yük transfer katsayısı (J) olarak ele alınmaktadır. Yükün aktarılabilmesi için agrega kenetlenmesi, donatı (bağ demiri) ve bağlı banket gerekmektedir. Tablo 3'de yük transfer katsayıları verilmektedir. Yapılan hesaplamalarda J katsayısı olarak 3.8 alınmıştır.

Tablo 3. Yük transfer katsayıları

Banket	Asfalt		Bağlı (Tied) Beton	
Yük Aktarma Araçları	Var	Yok	Var	Yok
Kaplama Tipi				
Donatısız Derzli ve Donatılı Derzli	3,3	3,8-4,4	2,5-3,1	3,6-4,2
Sürekli Donatılı Derzsiz	2,9-3,2	-	2,3-2,9	-

Drenaj Katsayısı (C_d)

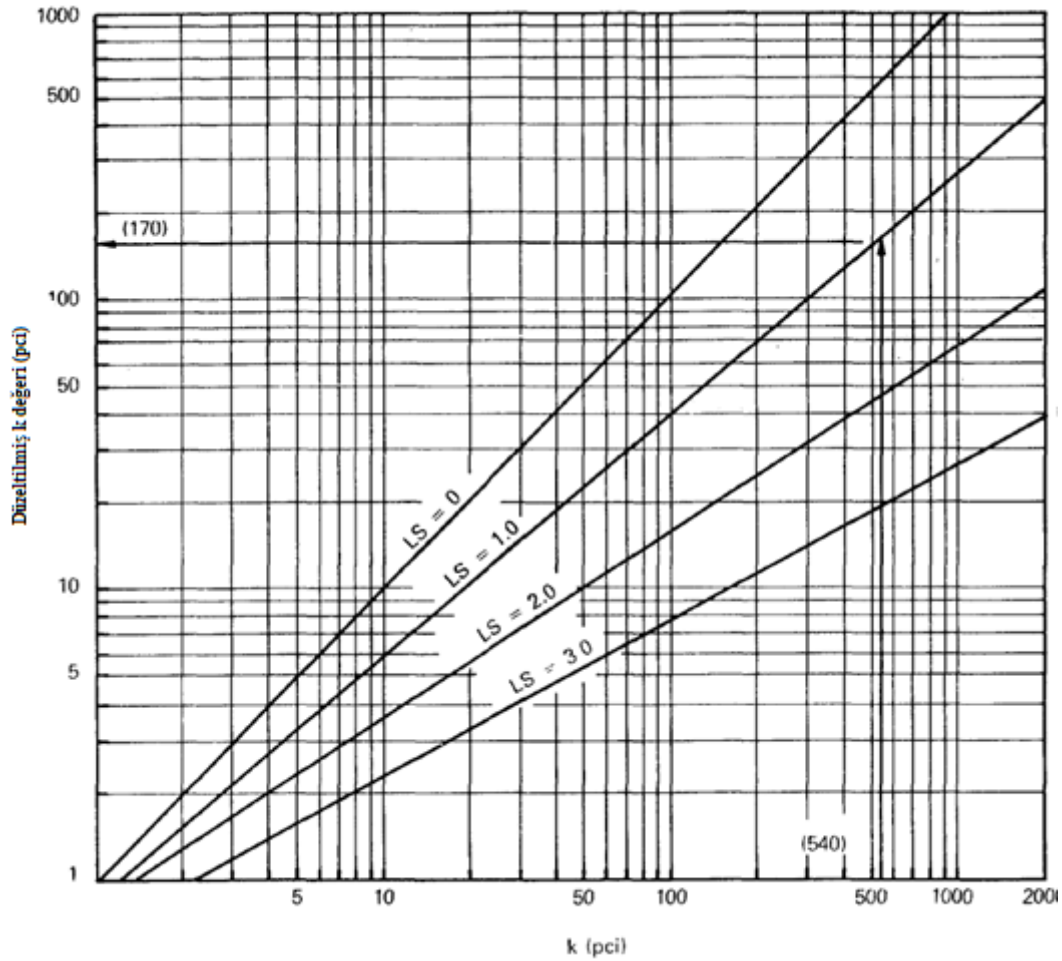
AASHTO yol testinde zayıf drenaj durumu için drenaj katsayısı olarak 1.0 alınması tavsiye edilmektedir.

Trafik tahmini ve performans tahmininin birleşik standart hatası (S_0)

Trafik tahmini için toplam standart sapma rijit ve esnek kaplamalar için sırasıyla 0,35 ve 0,45 değerlerine karşılık gelmektedir.

Tabii zeminin destek kaybı

Zemin erozyonu ve hacim değiştirmesi nedenlerinden dolayı tabii zeminin kaplama tabakasına destek olma yeteneğinin azalmasını ifade etmektedir. Zemin yatak katsayısı Şekil 14 yardımıyla düzeltilmelidir. Burada LS (zemin destek kaybı) stabilize temel tabakaları 0 ila 1, granüler temel ve çimento stabilizasyon zemin tabakaları için 1 ila 3 ve tabii zemin için 2 ila 3 olarak alınmaktadır. LS faktörü, zeminin düşey hacim değiştirmesi (şişme ve don kabarması) halinde 2 ila 3 alınmalıdır.



Şekil 14. Tabii zemin desteğinin potansiyel kaybı için etkili tabii zemin reaksiyon modülünün düzeltilmesi

Beton kaplama kalınlığının tayini

Mevcut esnek kaplama üzerine yapılacak beton kaplamanın performansı için AASHTO yol testinden elde edilen denklem aşağıda verilmiştir.

$$\log_{10} W_{18} = Z_R * S_0 + 7.35 * \log_{10}(D + 1) - 0.06 + \frac{\log_{10} \left[\frac{\Delta PSI}{4.5 - 1.5} \right]}{1 + \frac{1.624 * 10^7}{(D+1)^{8.46}}} + (4.22 - 0.32 P_t) * \log_{10} \left[\frac{S'_c * C_d [D^{0.75} - 1.132]}{215.63 * J \left[D^{0.75} - \frac{18.42}{(E_c/k)^{0.25}} \right]} \right] \quad (6)$$

Burada;

W_{18} : 18 kip (8,2 ton) eşdeğer tek dingil yükü tekrerrür sayısı

Z_R : Standart normal sapma

S_0 : Trafik tahmini ve performans tahmininin bileşik standart hatası

D : Rijit üstyapı beton kaplama kalınlığı (inç)

ΔPSI : $P_0 - P_t$ (Servis kabiliyetinde azalma miktarı)

P_0 : Başlangıç servis kabiliyeti indeksi

P_t : Nihai servis kabiliyeti indeksi

S'_c : Betonun kopma modülü (Eğilmede çekme mukavemeti) (psi)

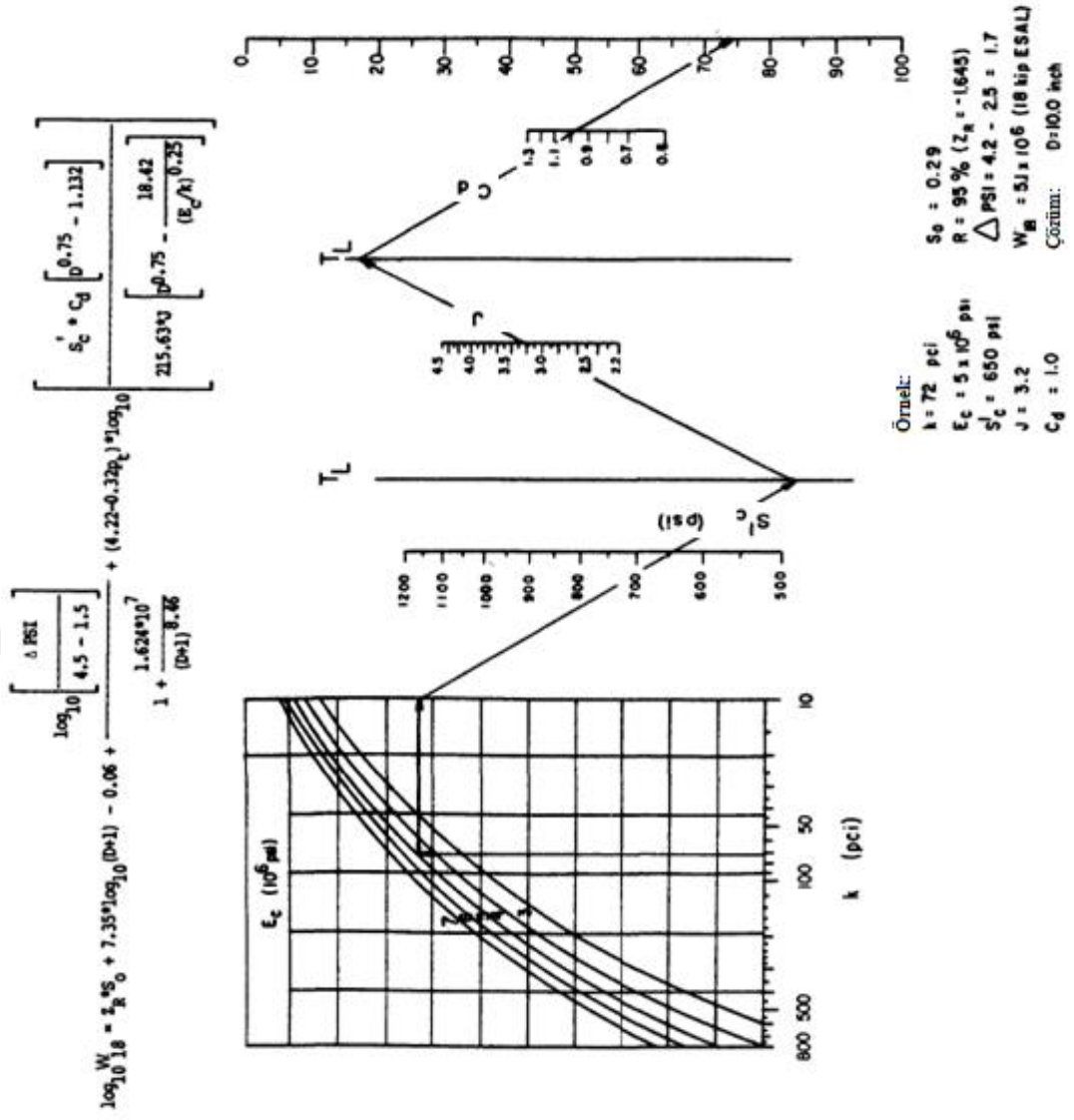
J : Yük transfer katsayısı

C_d : Drenaj katsayısı

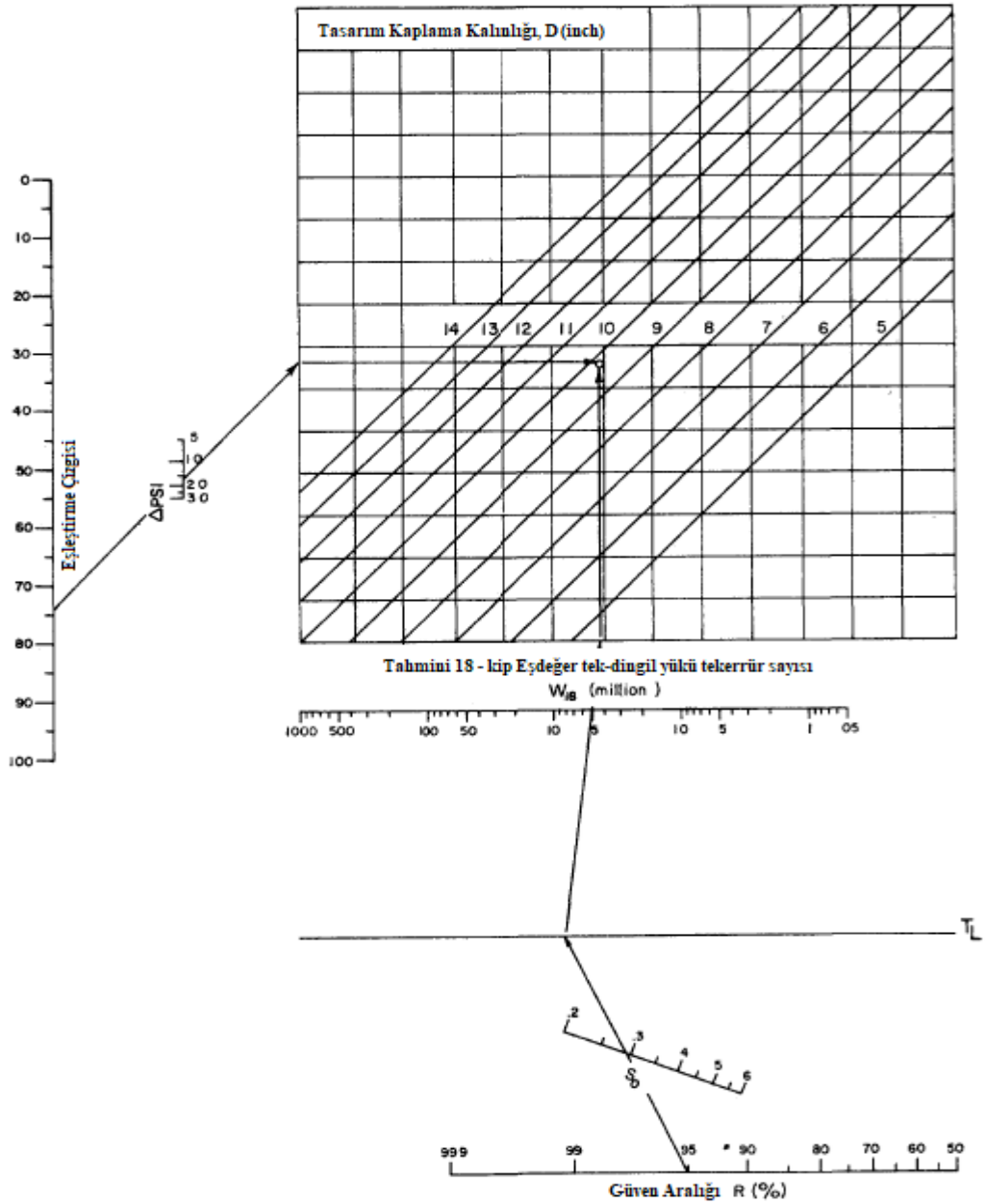
E_c : Betonun elastisite modülü (psi)

k : Zemin reaksiyon modülü (yatak katsayısı) (pci)

Denklem deki eşitlikten Şekil 15 ve 16'da verilen abaklar geliştirilmiştir. Bu abaklar yardımıyla beton kaplama kalınlığı kolaylıkla hesaplanabilmektedir.



Şekil 15. Beton kaplama kalınlığı tayini



Şekil 16. Beton kaplama kalınlığı tayini (devamı)

AASHTO Kaplama ME tasarım yöntemi

Bu yöntem, AASHTOWare Pavement ME Design adlı bir AASHTO profesyonel yazılım paketinde uygulanmaktadır. Mekanik temelli bir yaklaşımı saha performans verileriyle birleştirerek kaplama sistemlerinin performansını güvenle tahmin edebilmektedir. Kaplama geometrisi (kaplama boyutu, banket tipi, yük transferi, çelik donatı), yerel iklim faktörleri ve beton malzeme ve alt tabaka özellikleri arasındaki etkileşime dayanarak kaplama kalınlığını belirlemesini sağlayan entegre bir kaplama tasarım yaklaşımı sunmaktadır.

Bu yöntem, tasarımının sadece kalınlık açısından değil, aynı zamanda derz boyutları ve yük aktarımı, çelik donatı (eğer varsa) ve beton malzemesi özellikleri gibi diğer ilgili tasarım

özellikleri açısından analiz edilmesini içeren yinelemeli bir tasarım işlemidir. Aşağıdaki liste AASHTO M-E PDG girişlerini özetlemektedir (Hallin 2004):

- Rehabilitasyon tipi
- Tasarım ömrü
- Kaplama hasar kriterleri (çatlama, IRI)
- Güvenilirlik
- Trafik
- Yerel iklim
- Kaplama kesit ve katman özellikleri
- Kaplama tasarım özellikleri; kaplama geometrisi, derz ve banket tipi, beton özellikleri (dayanım, karışım oranları, CTE, vb.), drenaj ve yüzey özellikleri

ACPA StreetPave yöntemi

ACPA, 2012 yılında mevcut beton, BSK ve kompozit kaplamalar için bağ kurulmuş ve bağ kurulmamış kaplama tasarımları içeren yeni bir StreetPave sürümünü piyasaya sürdü. Bu yazılım, şehir, belediye, ilçe ve eyalet yollarına yönelik optimize edilmiş tasarımlar üretmek için yeni mühendislik analizlerinden faydalanmaktadır. Mevcut beton kaplamaların kullanım ömrü ve / veya hasar kriterlerini tahmin etmek için StreetPave 12 kullanılabilmektedir.

StreetPave 12 ayrıca, yük taşıma kapasitesi gereksinimi için asfalt tasarımına eşdeğer (Asfalt Enstitüsü yöntemine dayanarak) bir asfalt kesit tasarım süreci sunmaktadır. “Yaşam Döngüsü Maliyet Analizi” modülü, ayrıntılı bir maliyet / fayda analizi gerçekleştirerek kaplama tasarım projesi hakkında bilinçli kararlar verilmesini sağlamaktadır.

BSK veya kompozit üzerine bağ kurulmuş beton kaplamalar, ACPA BCOA yöntemiyle aynı denklemler kullanılarak tasarlanmıştır. StreetPave ‘deki diğer tüm beton kaplama tasarım yöntemleri, 1993 AASHTO Tasarım Kılavuzu yöntemiyle aynı kaplama tasarım denklemlerini kullanmaktadır. Mevcut beton kaplamaların etkili kaplama kalınlığının (D_{eff}) belirlenmesi için aynı denklemleri kullanmaktadır. StreetPave ve 1993 AASHTO Tasarım Kılavuzu kaplama tasarımları arasındaki tek fark istenen kompozit kalınlığının (D_f), StreetPave ‘in kendi tasarım denklemleri kullanılarak hesaplanmasıdır. StreetPave ayrıca, herhangi bir tasarıma fiber eklemek için işlevsellik sağlamaktadır.

Çalışmanın Amacı ve Önemi

BSK kaplamaların yapımına yönelik mevcut teknoloji, artan yaşam döngüsü maliyetleri nedeniyle giderek daha fazla sürdürülemez hale gelmektedir. Bu nedenle dünya genelinde ve

Ülkemizde rijit kaplama yapımı tercih edilmelidir. Fonksiyonel özelliklerini kaybederek artık kullanılamayan bir BSK kaplama yapısının yük taşıma kapasitesi, genellikle tipik bir yol temelinden daha fazladır. Bu nedenle, böyle bir kaplama yapısının tekrar kullanılması, temel tabakasının yoğun bir işçilik ve çok fazla bir maliyet ile değişimini ortadan kaldırarak diğer yol tabakalarının kalınlığının azaltılmasını mümkün kılmaktadır.

BSK kaplamalar üzerine yapılan bağ kurulmuş veya bağ kurulmamış beton kaplama uygulamaları dünya genelinde hızla artmakta iken ülkemizde henüz uygulanmamaktadır. Yapısal olarak sağlam ancak pürüzsüzlük, sürtünme ve gürültü gibi yüzey sorunlarına haiz iyi veya orta durumdaki bir BSK kaplamanın üzerine yapısal kapasitenin artırılması ve yüzey sorunlarının giderilmesi amacıyla bağ kurulmuş olarak tasarlanan beton kaplama yapılması bugünkü şartlar altında ülkemizde gerçekleşmeyecektir. Bu nedenle yapılan sonlu eleman analizlerinde kırsal yollar esas alınarak, BSK kaplama durumu için kötü durum (nemli yüzey bozulmaları, agrega sıyrılmaları, termal genleşme ve yapısal sıkıntılar) yani bağ kurulmamış tasarım şekli kullanılmıştır.

Westergaard'ın lineer sıcaklık dağılımı varsayımının aksine, beton plakların derinliğince ölçülen sıcaklık profilleri doğrusal değildir. Beton kaplamalarda pozitif sıcaklık farklarından dolayı plak altında çekme, üstünde ise basınç gerilmeleri oluşmaktadır. Dingil yüklerinin sebep olduğu beton plak altındaki çekme gerilmelerinin etki süresi az iken sıcaklık farklarının neden olduğu çekme gerilmelerinin etki süresi daha fazladır. Bu nedenle plak altında oluşan ve dingil yüklerinden daha uzun süre etkili olan pozitif sıcaklık gradyanı nedenli bu çekme gerilmesi değerlerinin özellikle araştırılması gerekmektedir. AASHTO yöntemi, BSK kaplamalar üzerine yapılan beton kaplama tasarımlarında beton plak kalınlığı boyunca meydana gelen doğrusal olmayan sıcaklık dağılımları yerine don duyarlılığına bağlı olarak yıl içerisinde sürekli değişiklik gösteren tabii zemin esneklik modülünü (M_R) dikkate almaktadır. Ancak yapılacak bir üstyapı tasarımına, AASHTO yönteminde ihmal edilen plak kalınlığı boyunca doğrusal olmayan sıcaklık dağılımlarının plak altında meydana getirdiği bu çekme gerilmelerinin de dahil edilmesi daha gerçekçi bir yaklaşım olacaktır.

Yapılmış olan literatür çalışmalarında sonlu elamanlar programları kullanılarak oluşturulan BSK kaplama ve rijit kaplama modelleri için yüklemeler; tek, tandem veya tridem dingil olarak yapılmıştır. Bu durum ise karayollarında gerçekte olan yükleme durumunu tam yansıtmamaktadır. Dolayısıyla, yapılacak bir üstyapı tasarımının karayollarında seyreden araçlara ait gerçek yükleme durumları ile, yani tam konfigürasyon dingil yükleme ile gerçekleştirilmesi daha doğru bir yaklaşım olacaktır. Bu çalışmada, ülkemiz karayollarında en

çok seyreden ağır vasıta türleri kullanılarak yükleme modellerinin oluşturulması hedeflenmiştir.

Bu çalışmada, yapısal ve işlevsel bozulmalara maruz kalarak servis kabiliyetini kaybetmiş bir BSK kaplamanın hizmet ömrünün uzatılması amacıyla üzerine yapılacak bağ kurulmamış bir beton kaplama tasarımı için plak üzerinde en kritik yükleme durumu olan kenar ve derz yüklemesi, tam konfigürasyon dingil tipi yüklemesi ve beton plak kalınlığı boyunca değişen sıcaklık dağılımı değerleri için beton kaplama altında meydana gelebilecek maksimum asal gerilmenin, tanımlanan tasarım kriterinin (betonun kopma modülü) altında kalmasını sağlayacak; beton sınıfı, plak kalınlık ve boyutlarının sonlu elemanlar analizi (Ansys) kullanılarak belirlenmesi ve AASHTO yöntemi ile karşılaştırılması amaçlanmıştır.

Sonlu eleman analizlerinden elde edilen sonuçlar kullanılarak Taguchi Yöntemi ile tahmin modellerinin oluşturulması, beton sınıfı, BSK elastisite modülü, beton elastisite modülü ve derz aralığı ile maksimum asal gerilme arasında bulunan sayısal ilişkinin çok değişkenli regresyon ve yapay sinir ağları yöntemleri kullanılarak incelenmesi ve bu parametreler ile bir tahmin modelinin kurulması amaçlanmıştır.

KURAMSAL TEMELLER

Beton kaplamalara uygulanan yükler genellikle beton kaplamanın üst veya alt yüzeyinde bir çekme gerilmesine neden olan eğilme hareketleri ile alt tabakalara aktarılmaktadır. İndüklenen çekme gerilmesinin büyüklüğü betonun eğilme dayanımına eşit veya daha fazla ise, beton kaplama bozulmalarının ana nedeni olan yüzey tabakalardaki çatlaklar başlamakta ve daha sonra beton plağın derinliğine doğru yayılmaktadır. Sonuç olarak beton kaplama tasarımında, beton elemanların tasarımı için beton basınç mukavemetinin kullanıldığı diğer yapıların aksine, beton eğilme mukavemeti veya kopma modülü kullanılmaktadır.

Beton kaplamalardaki gerilmeleri ve defleksiyonları belirlemek için üç yöntem kullanılmaktadır: kapalı - form formüller, etki grafikleri ve sonlu elemanlar bilgisayar programları. Westergaard (1926) tarafından geliştirilmiş olan kapalı formüller sadece dairesel, yarı dairesel, eliptik veya yarı eliptik temas alanına sahip tek tekerlek yüklere uygulanabilmektedir. Pickett and Ray (1951) tarafından geliştirilen etki tabloları, herhangi bir konfigürasyondaki çok tekerlekli yüklere uygulanabilmektedir. Her iki yöntem de sadece sıvı bir temel üzerine oturan büyük plaklar için geçerlidir.

Yükler, derzler boyunca yük aktarımı olan bir sıvı, katı veya tabakalı temel üzerinde birden fazla kaplamaya uygulanırsa, sonlu elemanlar yöntemi kullanılmalıdır. Sıvı temel, zemin tabakasının bir dizi bağımsız yay olduğunu varsaymaktadır. Herhangi bir noktadaki defleksiyon, o noktadaki kuvvetle orantılıdır ve diğer tüm noktadaki kuvvetlerden bağımsızdır. Bu varsayım gerçekçi değildir ve toprak davranışlarını temsil etmemektedir. Sadeliği nedeniyle Westergaard'ın analizinde kullanılmıştır. Bununla birlikte, kişisel bilgisayarların giderek artan hızı ve depolama kapasitesiyle, temel tabakasının hayali bir k değerine sahip bir sıvı olduğunu varsaymak artık gerekli değildir (Huang 2004).

Karmaşık bir mühendislik sistemi olarak, tabii zemin tabakaları, inşa edilen yeni tabakalar ve uygulanan yüklerin geometrisi arasındaki etkileşim, kaplama tasarımı ve yapısal davranış analizinin ana odağıdır (Ioannides 1991). İlk iki bileşen kaplama yapısının kendisiyle ilgilidir ve önemi açıktır. Tabii zemin tabakalarını geleneksel olarak Winkler (1867) yoğun sıvı şeklinde ve Boussinesq (1969) elastik katı şeklinde karakterize etmektedirler.

Yoğun sıvı temel, Winkler (1867) tarafından yüklü alanın altındaki bitişik alanlara kayma kuvvetlerinin iletimi olmadan, kuvvetle doğru orantılı olarak uygulanan bir dikey kuvvet altındaki defleksiyon ile önerilen kavramsal bir modeldir. Defleksiyon ve kuvvet arasındaki

ilişki tek bir sabit parametre- k -değeri ile değerlendirilir. Yoğun sıvı modelinin fiziksel yorumu, temelin yay sabiti k -değerlerine sahip bir yay yatağı gibi davranmasıdır. Varsayımlara göre, yoğun sıvı modellerin temel özellikleri aşağıdaki gibi özetlenmiştir (Darter et al. 1995):

- Plakanın altındaki defleksiyon, plak basıncının k -değerine bölünmesine eşittir.
- Defleksiyon, plaka kenarının ilerisinde sıfıra eşittir.
- Rijit ve esnek plakalar için defleksiyon aynıdır.
- Belirli bir basınç ve defleksiyon için, k değeri plaka boyutundan bağımsızdır.

Yoğun sıvı modeli, nispeten düşük kayma mukavemetine sahip doğal alt zemin topraklarının ve granül temellerin karakterize edilmesi için daha iyidir (Darter et al. 1995).

Elastik katı model, yoğun sıvı modeline kıyasla spektrumun diğer ucundadır. Elastisite modülü ve Poisson oranı malzeme özelliklerini karakterize etmek için kullanılmaktadır. Temel yüzeyi, bir yük uygulandığında sürekli ve sonsuz bir defleksiyon havuzuna (basin) sahip olacaktır. Elastik katı modelin temel özellikleri aşağıda özetlenmiştir (Darter et al. 1995):

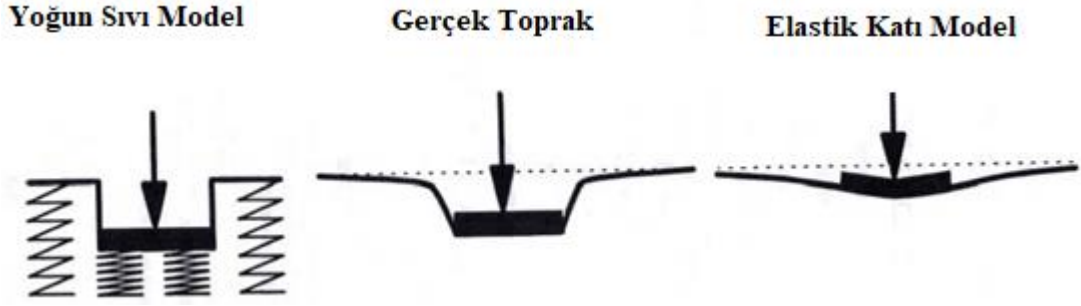
- Defleksiyon, tabii zemin elastisite modülüne, plaka boyutuna ve uzaklığa bağlıdır.
- Defleksiyon çanağı (basin) sürekli ve sınırsızdır.
- Rijit ve esnek yük plakaları farklı defleksiyonlar üretir.

Temel özelliklere göre, elastik katı modelin nispeten yüksek kayma mukavemetine sahip iyileştirilmiş tabakaların karakterizasyonu için daha iyi olduğu düşünülmektedir (Darter et al. 1995).

Uygulanan yükleme altında, gerçek toprakların tepkisi ve davranışı yoğun sıvı ve elastik katı arasında bir yerde bulunur. Gerçek toprağın temel davranışları aşağıda özetlenmiştir (Ioannides 1991; Darter et al. 1995):

- Plaka bir miktar aşağıya inerek süreksiz defleksiyon havuzu üretir.
- Yük plakasının kenarının ötesinde bir miktar yüzey defleksiyonu meydana gelir.
- Defleksiyon, sınırlı bir mesafede sıfıra eşittir.
- Belirli bir basınç ve defleksiyon için k , plaka boyutuna göre değişir.

Şekil 17 uygulanan yükler altında yoğun sıvı, elastik katı ve gerçek toprağın tepkisini göstermektedir.



Şekil 17. Uygulanan yükler altında yoğun sıvı, elastik katı ve gerçek toprağın tepkisi (Darter et al. 1995)

Beton Kaplama Analizi

Westergaard (1926), klasik ince plaka teorisini kullanarak merkez, kenar ve köşe yükleri altındaki beton kaplamaları analiz etmek için kapsamlı analitik çözümler geliştirmiştir. Westergaard'ın çalışmalarında, beton kaplama Winkler temeline oturan homojen, izotropik, elastik ince bir levha olarak modellenmiştir. Analiz prosedürünü basitleştirmek için Westergaard'ın varsayımları aşağıda verilmektedir:

- Temel, bir yay yatağı gibi davranır. (Yoğun sıvı temel kullanımı)
- Beton kaplama ile temel toprağı arasında tamamen bağ kurulmuş bir sınır koşulu vardır.
- Kesme ve sürtünme kuvvetleri ihmal edilebilir.
- Yarı sonsuz temel rijit bir tabaka ile sınırlı değildir.
- Beton kaplama düzgün bir kalınlığa sahiptir.
- Nötr eksen beton kaplamanın orta derinliğindedir.
- Araç yükleri, dairesel (merkez ve köşe yükleri için) veya yarı dairesel (kenar yükleri için) şekilli tekerlek- kaplama temas alanında eşit olarak dağıtılır.
- Yük beton döşemenin yüzeyine normal olarak uygulanır.
- Kaplama, süreklilikleri olmayan tek bir yarı sonsuz büyüklükte, homojen, izotropik elastik levha görevi görür.

Yukarıda belirtilen basitleştirmeler aşağıdaki gibi bazı sınırlamalar getirmektedir:

- Gerilmeler ve defleksiyonlar sadece merkez, kenar ve köşe yüklemeleri için hesaplanabilir.
- Beton kaplama yüzeylerine etki eden kayma ve sürtünme kuvvetleri göz ardı edilir.
- Çatlak oluşumu veya derzlerin sağlanması nedeniyle beton kaplama altındaki boşlukların ve betondaki süreksizliklerin mevcudiyeti dikkate alınmaz.

- Yöntem tek tekerlek yükü için geliştirilmiştir ve bu nedenle gerçek aks grubu konfigürasyonları dikkate alınmaz.

Westergaard yönteminde süreksizlikler göz önünde bulundurulmadığından, LTE'nin (Yük Aktarım Verimliliği) derzlerdeki veya çatlaklardaki kaplama performansı üzerindeki etkileri ele alınmamıştır. Bu analitik çözüm ile ilgili sınırlamalar bulunmasına rağmen, denklemler hala kullanılmaktadır. Ioannides et al. (1985), kenar yüklemesi için orijinal Westergaard denklemlerini revize etmiştir. Tüm Westergaard denklemlerinin, dairesel şekilli tekerlek- kaplama temas alanına sahip tek bir lastiği esas alması nedeniyle Huang (2004), çift lastiklerin etkilerini dairesel lastik kaplama temas şekline sahip tek lastiğe dönüştürmek için bir denklem geliştirmiştir.

Westergaard yöntemi süreksizliği olan beton kaplamalarda kullanılamadığından (boyuna ve enine derzlerin dikkate alınması), Bradbury (1938) tarafından farklı sıcaklık gradyanlarına maruz kalan beton kaplamaların analizi için analitik bir çözüm geliştirilmiştir. Hogg (1938), yarı sonsuz elastik katı temeli esas alan tek bir tekerlek yükü için analitik bir beton kaplama modeli geliştirilmiştir. Pickett and Ray (1951), Westergaard çözümlerine dayanan beton kaplama analizi için bir etki şeması geliştirmişlerdir. Reissner (1958), burulma problemlerine maruz kalan dairesel bir delikle beton kaplamayı analiz etmek için kalın levha teorisine katkıda bulunmuştur. Reissner'in teorisi daha sonra Haichang (1981) tarafından basitleştirilmiştir.

Pasternak (1954) tarafından geliştirilen dört serbest kenarı olan ve temel üzerine oturan dikdörtgen kalın bir plakanın teorik bir çözümü Shi et al. (1993) tarafından genişletilmiştir. Bu çözüm, Fwa et al. (1996) tarafından geliştirilmiştir. Ayrıca kalın levha çözümleri ile Westergaard'ın çözümleri arasındaki stres ve defleksiyon farklılıklarını da belirlemişlerdir.

Mohamed and Hansen (1997), beton kaplamadaki bükülme kaynaklı gerilimleri doğrusal olmayan sıcaklık gradyanlarına dayanarak tahmin etmek için analitik bir yöntem geliştirmişlerdir. Plaka teorisi kullanılarak, eşdeğer sıcaklık dağılımları kavramı daha sonra beton kaplama analizinde ortaya konmuştur (Ioannides and Khazanovich 1998). Çalışmalarında, 52 adet elastik temel üzerine oturan bir veya daha fazla tabakadan oluşan bir plak araştırılmıştır. Sonuç olarak, rasgele tekerlek yükü ile birlikte lineer bir fonksiyona, kuadratik bir fonksiyona veya diferansiyel sıcaklığın çok doğrusal fonksiyonuna maruz kalan tipik bir beton kaplamanın analizi için matematiksel formülasyonlar geliştirilmiştir.

Beton Kaplama Uygulamaları

Amerika Birleşik Devletleri'nde inşa edilen ilk esnek kaplama üzerine beton kaplaması 1918'de Indiana'daki Terre Haute'de yapılmıştır (Hutchinson 1982). 1918'den 1992'ye kadar, yaklaşık 200 adet BSK kaplama üzeri beton kaplama projesi yapılmıştır. Bunlardan 158'i donatısız ve derzli, 14'ü sürekli donatılı, 10'u fiber donatılı ve 7'si derzli donatılı beton kaplama olarak yapılmıştır (McGhee 1994). Belçika, İsveç, Kanada, Meksika, Brezilya, Güney Kore, Japonya, Fransa, Avusturya ve Hollanda dahil olmak üzere diğer ülkeler, mevcut esnek kaplama üzeri beton kaplama projelerini üstlenmiştir (Rasmussen and Rozycki 2004).

1980'lerin ortalarında, “hızlı yol” olarak adlandırılan beton kaplama yaygın olarak kullanılmaya başlanılmıştır (ACPA 1994). Bu yöntem, yüksek erken dayanımlı beton, daha kalın kaplama tasarımı ve beton kaplamaların yerleştirme işleminden 12 saat sonra trafiğe açılmasını sağlayan bir dizi inşaat tekniğinin kullanılmasını içermektedir (ACPA 1994; McCullough and Rasmussen 1999). Bu yöntem UTW ve TWT projelerinde özellikle faydalıdır, çünkü bu tür kaplamaların maliyet açısından rekabetçi olabileceğini ve seyahat eden halka en az düzeyde rahatsızlık verecek şekilde oluşturulduğunu göstermektedir.

Amerika Birleşik Devletleri'ndeki ilk yüksek profilili UTW projesi 1991 yılında Kentucky, Louisville' de gerçekleştirilmiştir (LaHue and Risser 1992; Cole and Mohsen 1993). 50 ila 90 mm (2 ila 3.5 inç) kalınlığındaki ultra ince beton kaplamaların, çok sayıda düşük hacimli yollara, konut sokaklarına ve park yerlerine özgü trafik yüklerini taşıyabildiklerini göstererek UTW tarihinde bir dönüm noktası olmuştur (Cole 1997). Ağır tekerlek yüklerinin etkisi hakkında bilgi sağlanması amacıyla bu projede fiber donatılı beton kaplama uygulanmıştır. Fiber donatılı beton kaplama olarak yapılan bu yol kesimi, UTW kaplamalarda oluşabilecek genel bozulmaları ortaya koyabilmek amacıyla günde 400 ila 600 adet kamyon geçen atık alanı erişim yolu olarak kullanılmıştır. Kamyon sayısının, düşük hacimli yollardan geçen kamyon sayısından 20 ila 100 kat daha fazla oluşu, bu projenin hızlandırılmış bir test olarak kabul edilmesine neden olmuştur. Bu projede elde edilen bulgular aşağıda verilmektedir.

- UTW ile mevcut BSK kaplama arasındaki bağ, betonda meydana gelen gerilmeleri önemli ölçüde azaltmaktadır. Kurulan bu bağ kaplamanın kompozit olarak çalışmasını sağlamaktadır.
- Köşe kırılması (çatlağı) en çok görülen bozulma şekli olmuştur.
- Derz aralığının köşe çatlağı oranı üzerinde önemli bir etkisi vardır.

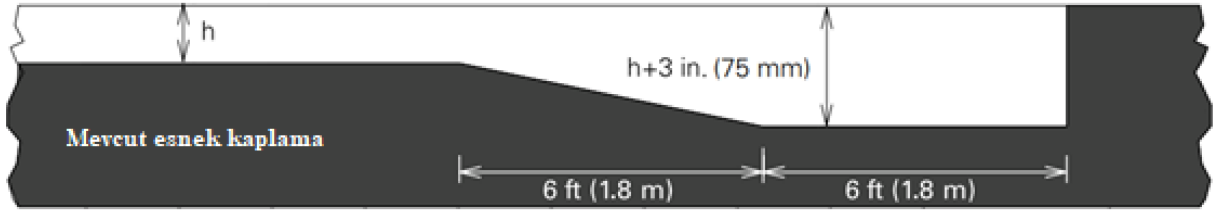
2005 öncesi Texas'ta inşa edilen TWT ve UTW kaplamalarda gözlemlenen sıkıntılar, panel boyutu ve yerleşimi, beton kaplamadan BSK kaplamaya geçiş alanları, beton kaplama

panellerinin kayması ve mevcut BSK'daki kusurlarla ilişkiliydi. 2011 yılında, derzlerin tekerlek yollarından uzağa yerleştirilmesi ve geçiş alanlarında sürekli donatılı betonarme kaplama (CRCP) veya kalınlaştırılmış plakların kullanılmasını içeren tasarım geliştirmeleri yapılmıştır. Tasarım kaplama kalınlığının, geçişin başladığı alandan başlamak üzere tamamlandığı alanda 75mm daha fazla olacak şekilde kademeli olarak artırılması ve geçişin başladığı ilk 3 m mesafede kaynaklı hasır çelik veya her iki yönde döşenen demir donatı kullanılması önerilmiştir.

Kullanılan kaplama kalınlıklarına bakılmaksızın, panel yerleşimi 1.83 - 1.83-m (6-6 ft) boyutlarında seçilerek derzlerin tekerlek yollarından uzak tutulması ve böylece beton plaklardaki tekerlek yükü gerilmelerinin azaltılması amaçlanmıştır. Daha küçük boyutlarda plaklarla karşılaştırıldığında, bu boyutlarda plak kullanımı ile kıvrılma gerilmelerindeki artışın, azaltılmış tekerlek yükü gerilmeleri ile daha fazla dengelendiği görülmektedir. TWT veya UTW kaplamaların inşasından önce görünmeyen kusurları tanımlamak ve gidermek için mevcut BSK'nın durumunun kapsamlı bir karakterizasyonu yapılmalıdır (Chen et al. 2016).

Minnesota Yol Araştırma Projesi'nden elde edilen geniş alan sonuçlarına dayanarak Burnham (2006), panel boyutunun UTW veya TWT kaplamaların performansları üzerinde önemli bir etkisi olduğunu bildirmiştir. Her UTW veya TWT levhasında gelişen çatlama miktarı ve çatlama paternleri, derz yerleşimleri ve derz yerleşimlerinden dolayı oluşan gerilmelerden doğrudan etkilenmiştir. Burnham (2006), 1,5 m uzunluğunda ve 1,8 m genişliğindeki panellerde meydana gelen çatlamların 1,2 m X 1,2 m panellerden yaklaşık % 75 daha az olduğunu ortaya koymuştur. Panel boyutlarının, tekerlek yollarının derzlerden uzak tutulacak şekilde seçilmesi gerektiğini belirtmiştir. Çoğu durumda, çatlakların genellikle panellerin kenarlarında başladığı görülmüştür. Tekrarlanan tekerlek yükleri, kritik bir yere yüklendiğinde yoğun gerilmelere neden olmakta ve bu nedenle çatlaklar oluşmaya başlamaktadır (Vandenbossche 2003; Burnham 2006; Suh et al. 2008).

MnDOT (2019), Şekil 2.2'de gösterildiği gibi tasarım kaplama kalınlığının geçiş bölgesinde 75mm daha fazla olacak şekilde kademeli olarak artırılmasını önermiştir. Mevcut esnek kaplama, 75 mm ek derinliğe geçişin ilk 1,8 metresinde kademeli bir şekilde frezelenmelidir. Geri kalan 1,8 metrelik mesafede bu derinlik korunmalıdır. Geçiş sonunda bir derz kesimi yapılmalıdır. Kanada İnşaat Mühendisliği Topluluğu ise toplam kalınlaştırılmış kaplama kalınlığının minimum 150 mm olmasını önermektedir. Ayrıca, mevcut esnek kaplamaya geçiş bölgesinin en az ilk 2 metresinde son kalınlık 75mm daha fazla olacak şekilde kademeli olarak frezelenmesini ve mevcut esnek kaplamaya doğru giden son 1 metre uzunlukta artırılmış kalınlığın sabit kalmasını önermektedir (Chen et al. 2016).



Şekil 18. Geçiş bölgelerinde mevcut esnek kaplamanın frezelenmesi ve kaplama kalınlığının artırılması (ACPA 1998)

Jayakesh and Suresha (2018), BSK kaplama yüzeyinin, tabakalar arası kuvvetli bir bağ kurulabilmesi amacıyla işlenmesi için oluklama ve delme tekniklerini kullanarak UTW kaplamanın ara yüzey kayma dayanımını ve kayma yorulma davranışını direkt kayma test yöntemi ile incelemiştir. Delme tekniği ile yapılan ara yüzey işleminde, en yüksek kayma bağ dayanımı ve k-modülü değerleri elde edilmiştir. 0-45 derecelik bir eğim ile oluklama ara yüzey işleme tekniği ve delme ile ara yüzey işleme teknikleri önerilmiştir.

López-Carreño et al. (2017), geleneksel beton kaplama ile BSK kaplama yüzeyleri arasındaki bağ dayanımını değerlendirmek için kapsamlı bir deneysel program uygulamıştır. BSK kaplama yüzeylere; (a) herhangi bir işlem yapılmaması, (b) delikler açılması, (c) gözeneklerin doldurulması amacıyla bitümlü emülsiyon uygulanması, (d) yeni bir pürüzlü yüzey elde edilmesi amacıyla bitümlü emülsiyonun yayılması ve üzerine çakıl yerleştirilmesi işlemleri uygulanmıştır. Ara yüzlerin mekanik dayanımını üç tür test ile belirlendi. Direkt çekme (DÇ) testleri ile yalnız çekme durumu değerlendirildi. “Laboratorio de Caminos de Barcelona” (LCB) testi, yalnız kayma dayanımını değerlendirmek için kullanılmıştır. Son olarak, basınç ve kayma gerilmelerinin birlikte olduğu durumu değerlendirmek için (Slant Shear) (EK) eğimli kayma testi kullanılmıştır. Yüzey işlemleri yapılan bütün numuneler, yapılan üç testte de sünek davranış göstermiştir. Betonun asfalt gözeneklerine nüfuz etmesinden dolayı, üç test türünde de kohezyon açısından başarısızlık gösteren (a) yüzey işlemi olmuştur. DÇ ve LCB testlerinde, (a) yüzey işlemi uygulanan numuneler en yüksek dayanımları gösterirken, (b) yüzey işlemi, (a) yüzey işlemi ile neredeyse benzer bir dayanım göstermesine rağmen, EK testinde en yüksek dayanımı göstermiştir. Sonuç olarak, (a) yüzey işlemi uygulanan numuneler en iyi toplam performansı göstermiştir.

US-23 Agrega Test Yolu, çeşitli don duyarlılığına haiz kaba agregaların, uzun süreli beton dayanıklılığı üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla 1992 yılında Michigan Monroe’de inşa edilmiştir. Tüm Test Yolu için kaplama yapısı, 75 mm kalınlığında bir çakıl ayırıcı tabakanın üstünde 100 mm kalınlıkta asfaltla işlenmiş geçirgen tabaka üzerine inşa edilmiş 267 mm kalınlığında derzli donatılı sürekli beton kaplamadan (JRCP) oluşmaktadır. Her bir test

bölümünün yarısı kötü drenajlı alt temel üzerine inşa edilirken, diğer yarısı ise iyi drene olan geçirgen kum alt temel üzerine inşa edilmiştir.

2016 yılında yapılan en son saha araştırmalarına göre bulgular verilmektedir: Şekil 20’de gösterildiği üzere derz durabilite problemleri bulunamamıştır. Bu durum mükemmel hava-boşluk sistemi, düşük beton geçirgenliği ve iyi drenaj ile ilişkilendirilmektedir. Ayrıca, derz pompaj (pumping) erozyonu ile ilgili sıkıntı gelişmemiştir. Test bölümlerinden biri, hizmete açılmasının müteakibinde ilk 5 sene içerisinde kamyon şeridindeki panellerin %75’ inden fazlasında Şekil 19’da gösterildiği gibi tam şerit genişliğinde orta panel çatlaması gelişmiştir. Bu çatlaklar ilerleyerek betonun kabarak dökülmesine neden olmuş ve kamyon şeridinin %29’ unda tam derinlikli beton onarımları gerekmiştir.

Diğer 4 bölümde ise panellerin sadece %0 ila %4’ ü tam derinlikte onarım gerektirmiştir. Kayma donatısı gevşekliği (dowel loosenes), 2009 yılından bu yana tüm bölümlerde belirgin hale gelmiş ve yük transferinin %30 ila %60 azalmasına yol açmıştır. Yük aktarımı kaybı ve aşırı dış köşe derz defleksiyonları 2,54-5,08 mm kalıcı bir enine derz oturması ile sonuçlanmıştır. Negatif sıcaklık farkından kaynaklanan derzlerde oluşan destek kaybı ise tüm bölümlerde gelişmekte olan yukarıdan aşağıya doğru orta panel çatlamalarına neden olmuştur. Bu çalışmadan elde edilen bilgiler, Michigan’daki aşırı trafik yükü ve çevre koşulları için 30 ila 50 yıllık kaplama ömrü tasarlanmasına yardımcı olmaktadır (Hansen et al. 2017).



Şekil 19. Tipik orta panel çatlak kabarma ve parçalanması



Şekil 20. Bölüm A ile E arası tipik bir enine derz (derzlerde herhangi bir problem yoktur)

1998 yılında Michigan eyaleti, rehabilitasyona ihtiyaç duyan BSK kaplamalara alternatif olarak beton kaplamayı kullanan artan sayıdaki eyaletlere katılmaya karar vermiştir. Mevcut kaplama, 200 mm çakıl tabakası ve yaklaşık 305 mm kum tabakası üzerinde bulunan 100 mm bitümlü tabakadan oluşmaktadır. Mevcut kaplama üzerine 150 mm fibersiz, 150 mm fiberli ve 125 mm fiberli beton kaplama yapılmıştır.

Test bölümleri birkaç sıkıntı göstermiştir; en önemli sıkıntı olarak Şekil 21 ve 22’de verildiği üzere boyuna gelişen çatlaktır. Boyuna çatlağın ilk işareti projenin tamamlanmasından yaklaşık bir yıl sonra yani 2000 yılı yazında gelmiştir. 2001 yılında yapılan çalışmalar sonucunda, üç metre uzunluğundaki panellerin toplam 148’inde (%3,4), şeridin ortasında boyuna çatlakların meydana geldiği gözlemlenmiştir. Ayrıca bir enine çatlağın meydana geldiği gözlenmiştir. Düşen Ağırlık Defleksiyon Cihazı (FWD) ve Yeraltı Radarı (Ground Penetrating Radar) kullanılarak boyuna çatlakların neden olduğu konusunda araştırmalar yapılmış ve nedenin ise büyük olasılıkla şeridin sağ kenarı altında daha az destek olması sonucu kaplamanın merkez etrafında bükülmesi olduğu söylenmiştir (Eacker 2004).



Şekil 21. Boyuna gelişen uzun çatlaklar



Şekil 22. Boyuna çatlağa yakın bir bakış

Çelik vd (2020), Rize ve Trabzon illerinde bulunan en az 20 yıldır hizmet veren ve halen trafiğe açık olan beton yollar hakkında yaptıkları incelemelerinde yollara ait geometrik özellikleri ve karşılaşılan bozulma türlerini belirlemişlerdir. En çok karşılaşılan bozulma türleri olarak; boyuna ve enine gelişen çatlakları, köşe çatlakları, parçalanmış plak çatlakları, plak yüzeyinde meydana gelen sökülme ve çukurları sıralamışlardır.

Yatırım maliyeti çok yüksek olan karayollarında hataların en aza indirilerek ekonomik kazanç sağlanması amacıyla Hızlandırılmış Yol Testi sistemleri geliştirilmiştir. Yol koşullarının laboratuvar ortamında sağlanması ile meydana gelebilecek birçok zorluğun önüne geçilerek ekonomik, güvenilir, hızlı ve gerçek durumu yansıtan çok yakın değerler simüle edilebilmektedir. Dünya genelinde 30'dan fazla Hızlandırılmış Yol Testi tesisi bulunmakta ve her geçen gün yenileri eklenmektedir. Ülkemizde ilk Hızlandırılmış Yol Testi tesisi, 2009 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi'nde yapılmıştır (Akpınar 2017).

Beton Kaplama Kalınlığı Boyunca Sıcaklık Değişimlerinin İncelenmesi

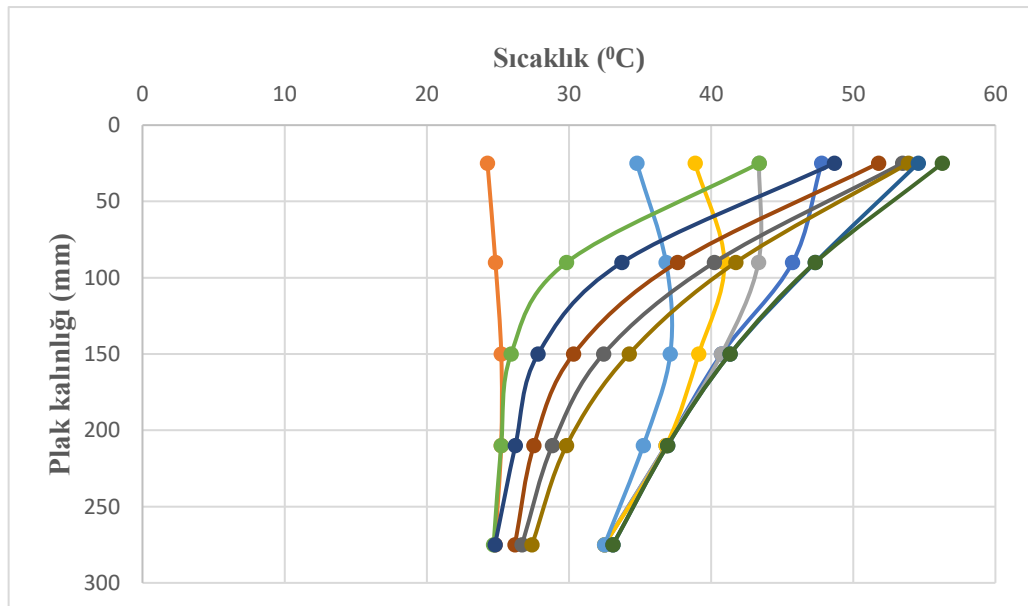
Kim and Chun (2015), farklı derinliklerde sıcaklık sensörleri kullanarak 12 Ocak - 2 Şubat 2015 tarihleri arasında beton test plakta sıcaklık gradyanlarını gözlemlemişlerdir. Maksimum pozitif sıcaklık farkını, 15:00–16:00 saatlerinde yaklaşık olarak 5.0°C ve maksimum negatif sıcaklık farkını ise 23:00–24:00 saatlerinde yaklaşık olarak -4.4°C olarak bulmuşlardır.

Richardson and Armaghani (1987) ve Shoukry and Fahmy (2002), yapmış oldukları çalışmalarda 225 mm kalınlıktaki beton plakta oluşan sıcaklık farkını 10°C olduğunu belirlemişlerdir. Byrum and Hansen (1994), yaptıkları çalışmada sıcaklık gradyan değerlerini gündüz için $0,087$ ila $0,109^{\circ}\text{C} / \text{mm}$ arasında, gece için ise $0,044$ ila $0,065^{\circ}\text{C} / \text{mm}$ arasında ele almışlardır. Kuo (1998), beton kaplama analizlerinde gündüz şartları için beton plağa orta

yükleme yapılmasını, gece şartlarında ise kenar yüklemesi yapılmasını önermiştir. Negatif sıcaklık gradyanları özellikle Almanya'daki beton yol tasarımında dikkate alınmamaktadır. Bunun nedeni, negatif gradyanın pozitif gradyan daha az olmasıdır (VENCON 2004)

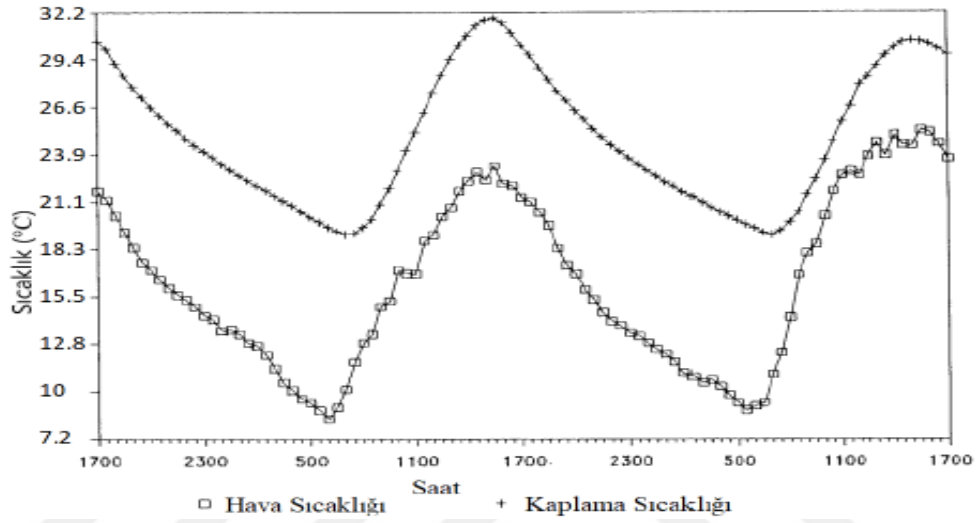
Pancar and Akpınar (2016), 25 cm kalınlığındaki kırma kireçtaşı tabakası üzerine C30 / 37 sınıfında standart agregalı ve cam boncuklu (toplam agreganın ağırlığının % 19'u) olmak üzere iki tip beton kaplama dökümünü gerçekleştirmiştir. Her iki tip kaplama betonu için plak boyutları 1 m x 1 m ve kalınlıkları ise 25 cm' idi. Günlük sıcaklık değişimlerini izlemek için, plakların üst ve alt yüzeylerine sıcaklık sensörleri yerleştirilmiştir. Sıcaklıklar 08:00 ile 16:00 saatleri arasında ölçülmüştür. Çünkü beton yol tasarımında pozitif gradyan negatif gradyandan daha önemlidir. Test, 03 Ağustos 2014 tarihinde Türkiye'nin kuzeyinde yapılmıştır. Kaplamanın üstü ve altı arasındaki en büyük sıcaklık farkı 14 °C ile saat 14:00'da ölçülmüştür. Aralık ayı için sıcaklıklar 18:00 ile 06:00 saatleri arasında ölçülmüştür. Kaplamanın alt ve üst yüzeyi arasındaki en büyük sıcaklık farkı 9,8 °C (negatif fark) ile saat 21:00 'da ölçülmüştür.

Maitra et al. (2013), beton numuneler içindeki sıcaklık değişimlerini gözlemlemek için deneyler yapmıştır. Sıcaklık ölçümleri beton silindiler üzerinde yapılmıştır. 150 mm çapında ve 300 mm yüksekliğinde beton silindirler bu amaçla laboratuvarda dökülmüştür. Silindirin yüzeyi kaplanmış ve silindirin bir ucuna sıcak hava üflenmiştir. Diğer ucu toprakla kaplanmıştır. Farklı konumlardaki sıcaklıkları ölçmek için silindirin uzunluğu boyunca eşit aralıklarla beş termometre yerleştirilmiştir. Deneyden, beton numunelerinde tipik doğrusal olmayan sıcaklık değişimi gözlenmiştir ve Şekil 23'te verilmiştir. Laboratuvar deneyine dayanarak, kaplama derinliği içinde doğrusal olmayan bir sıcaklık değişimi dikkate alınmıştır. Kaplamanın üst ve alt yüzeyi arasındaki sıcaklık farkı (T_D) 0 ila 30 ° C arasında değişmiştir.

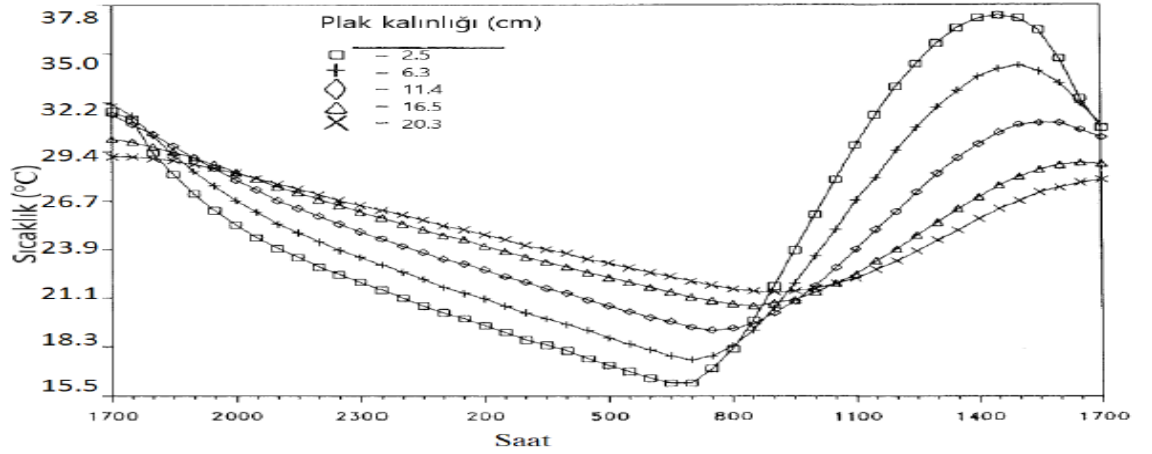


Şekil 23. Beton plaktaki doğrusal olmayan sıcaklık değişimleri

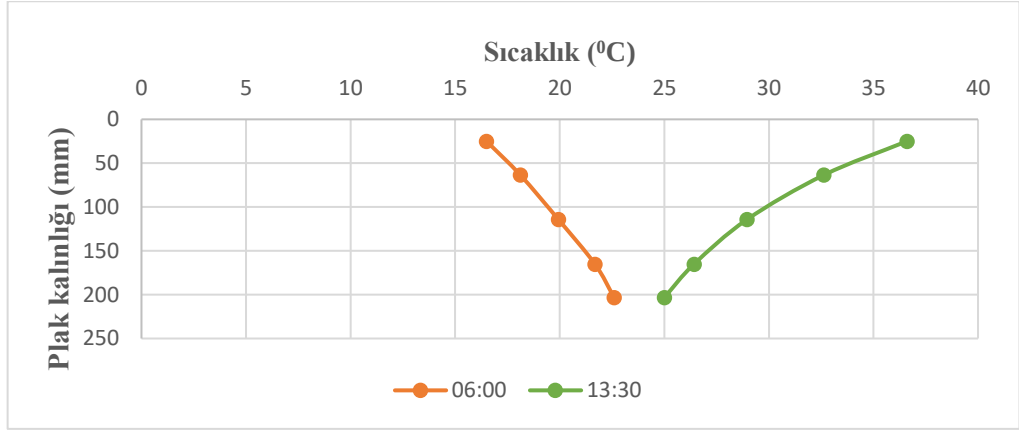
Armaghani et al. (1987), Florida’da 23 cm kalınlıktaki beton bir plak üzerinde hava sıcaklığı ile kaplama sıcaklığı arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Şekil 24’de görüldüğü üzere hava sıcaklığı ile beton plak sıcaklığı arasındaki fark güneşli günlerde yaklaşık 10 °C olarak ölçülmüştür. Bulutlu günlerde ise farkın önemli bir derecede düştüğünü belirtmişlerdir. Şekil 25’de görüldüğü üzere en yüksek pozitif sıcaklık farkı saat 13:30’da 11.6 °C (kaplama üstünde 36.6 °C ve kaplama altında 25.0 °C), en düşük sıcaklık farkı ise saat 06:00’da 6.1 °C (kaplama üstünde 16.5 °C ve kaplama altında 22.6 °C) olarak ölçülmüştür. Şekil 26’da maksimum pozitif ve negatif sıcaklık farklarının kaplama derinliğine göre değişimi verilmektedir.



Şekil 24. Hava sıcaklığı ile kaplama sıcaklığının zamana göre dağılımı

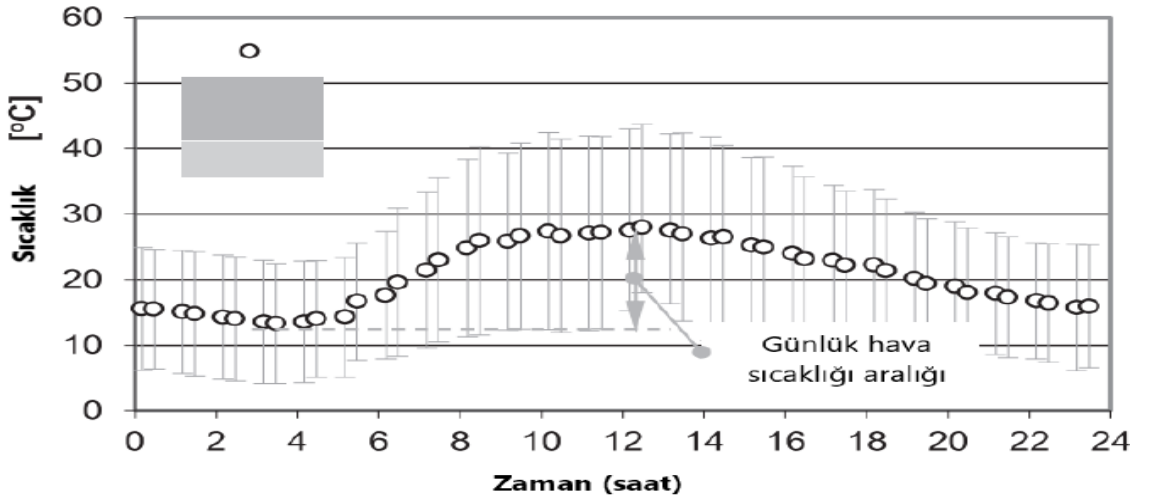


Şekil 25. Kaplama sıcaklığının derinlikle değişimi

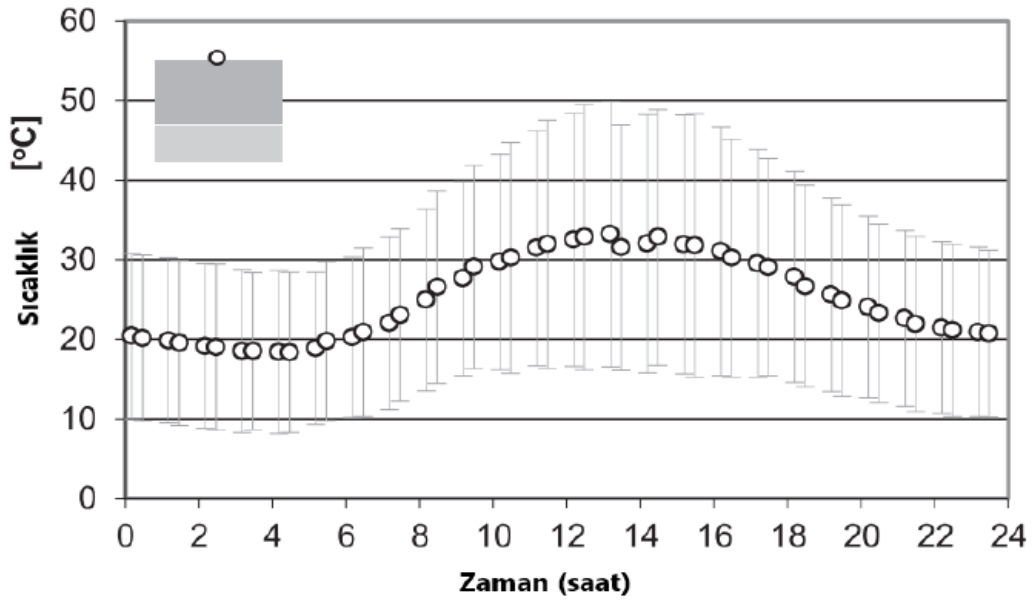


Şekil 26. Maksimum pozitif ve negatif sıcaklık farklarının kaplama derinliğine göre değişimi

Mackiewicz (2014), Polonya’da beton bir plak üzerinde hava sıcaklığı ile beton plak yüzey sıcaklığı arasındaki ilişkiyi incelemiştir. En yoğun hava sıcaklıkların yaşandığı temmuz ayı için 30 gün boyunca Şekil 27’de gösterildiği gibi kaplama sıcaklıkları ve Şekil 28’de gösterildiği gibi hava sıcaklıkları ölçülmüştür. Hava sıcaklığı ile kaplama üstü arasındaki sıcaklık farkını yaklaşık olarak 5 °C bulmuştur.

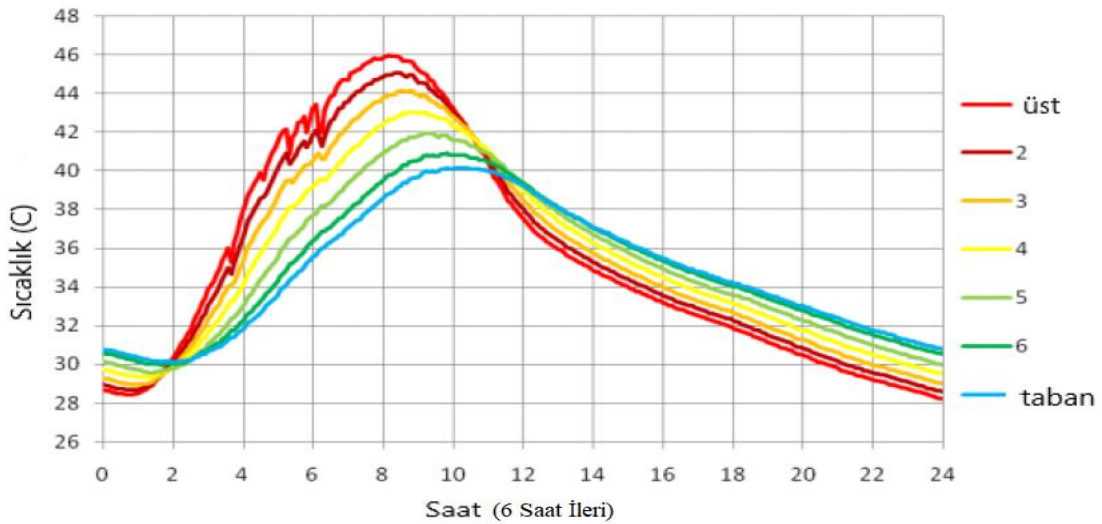


Şekil 27. 30 gün boyunca ölçülen hava sıcaklıkları

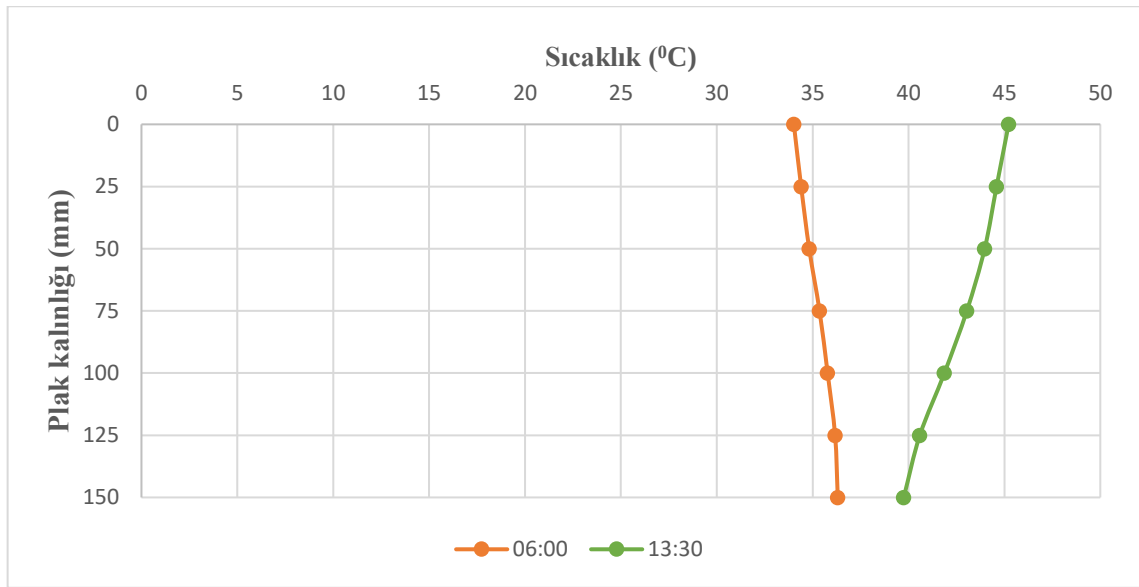


Şekil 28. 30 gün boyunca ölçülen beton plak üst yüzey sıcaklıkları

Karunaratne et al. (2010), Sri Lanka'da 150mm kalınlıktaki beton plak üzerinde hava sıcaklığı ile beton plak sıcaklığı arasındaki ilişkiyi incelemiştir. Şekil 29'da görüldüğü üzere en yüksek pozitif sıcaklık farkı saat 13:30'da 7.9 °C (kaplama üstünde 45.5 °C ve kaplama altında 37.6 °C), en düşük sıcaklık farkı ise saat 06:00'da 2.6 °C (kaplama üstünde 28.2 °C ve kaplama altında 30.8 °C) olarak ölçülmüştür. Şekil 30'da maksimum pozitif ve negatif sıcaklık farklarının kaplama derinliğine göre değişimi verilmektedir.

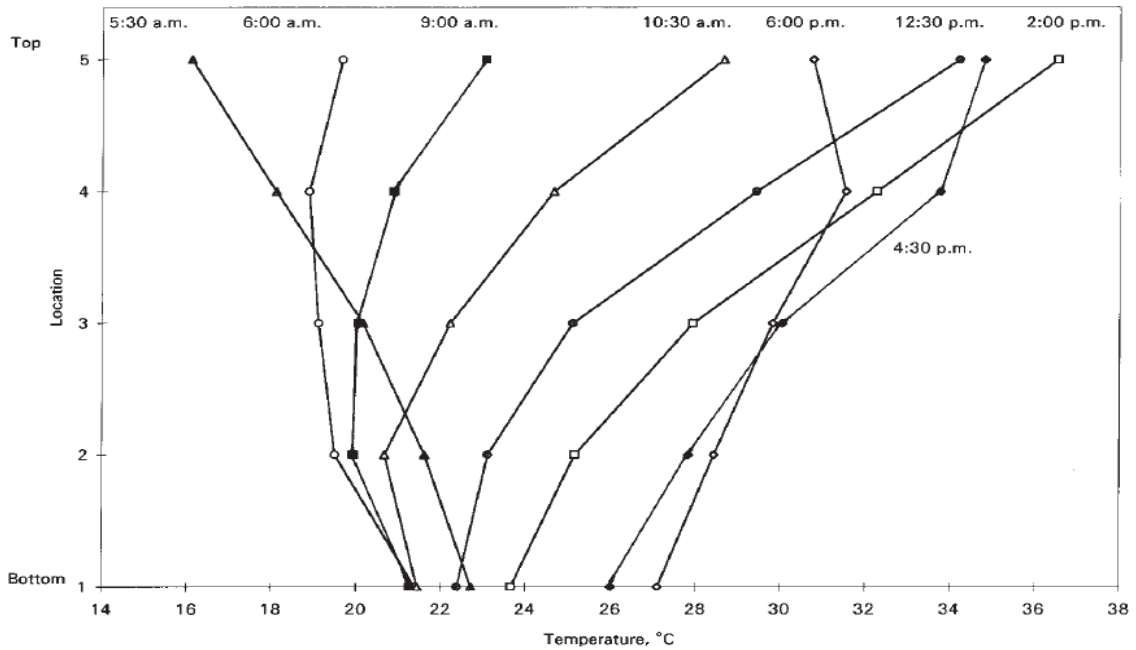


Şekil 29. Kalınlık boyunca günlük sıcaklık değişimi

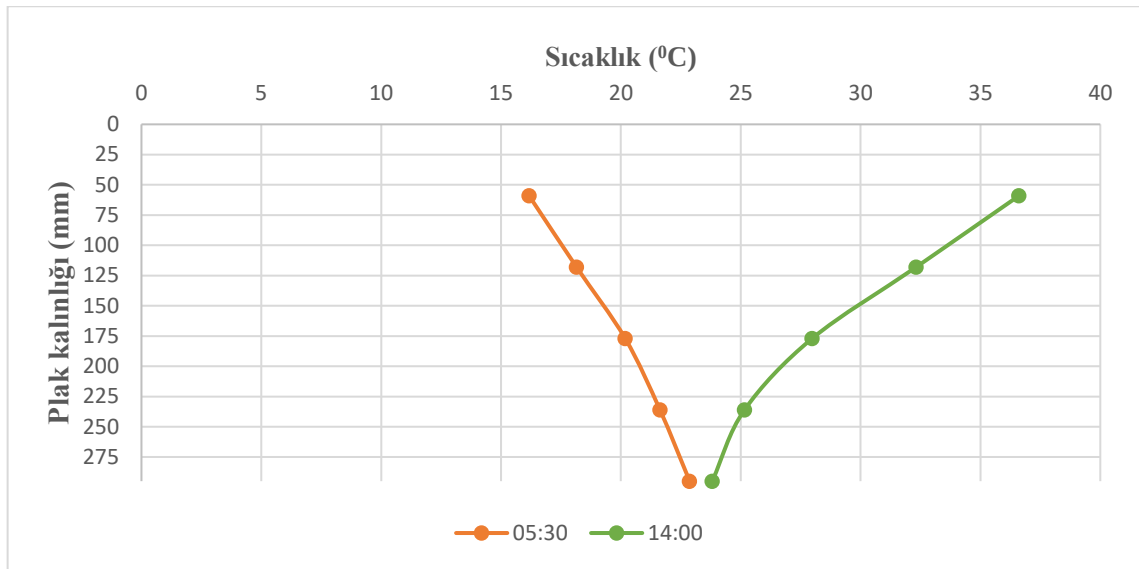


Şekil 30. Maksimum pozitif ve negatif sıcaklık farklarının kaplama derinliğine göre değişimi

Yu et al. (1998), Colora'da 295mm kalınlıktaki beton plak üzerinde hava sıcaklığı ile beton plak sıcaklığı arasındaki ilişkiyi incelemiştir. En yüksek pozitif sıcaklık farkı Şekil 31'de verildiği üzere saat 14:00'da 12.8 °C (kaplama üstünde 36.6 °C ve kaplama altında 23.8 °C), en düşük sıcaklık farkı ise saat 05:30'da 6.7 °C (kaplama üstünde 16.2 °C ve kaplama altında 22.9 °C) olarak ölçülmüştür. Şekil 32'de maksimum pozitif ve negatif sıcaklık farklarının kaplama derinliğine göre değişimi verilmektedir.

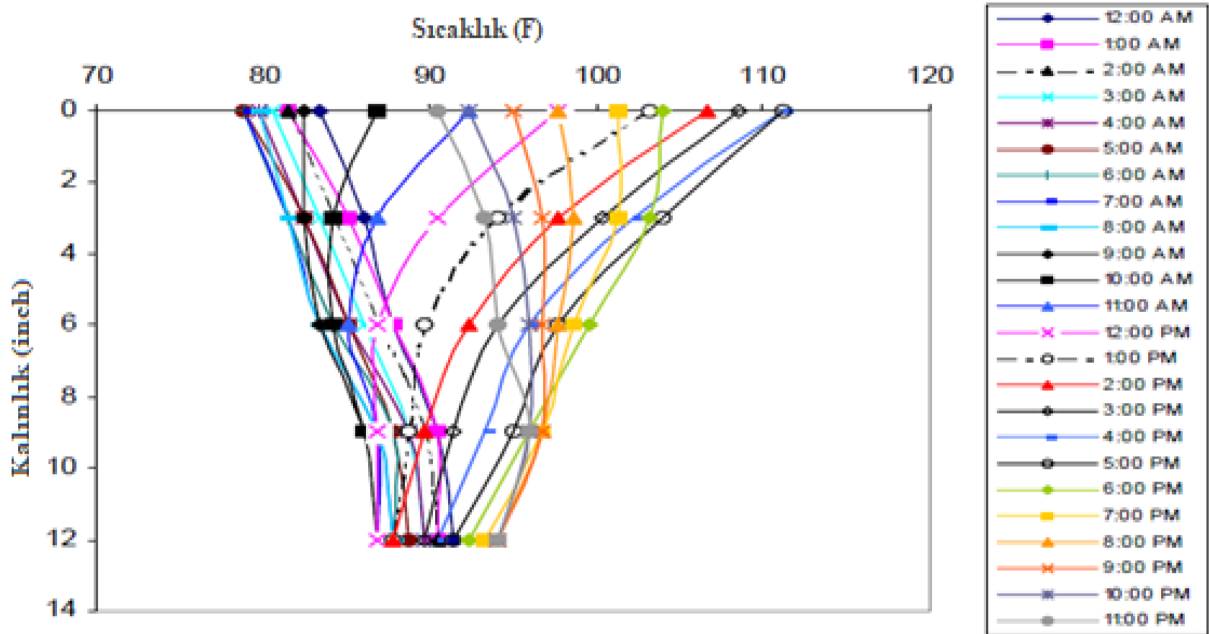


Şekil 31. Sıcaklık farklarının kaplama derinliğine göre değişimi

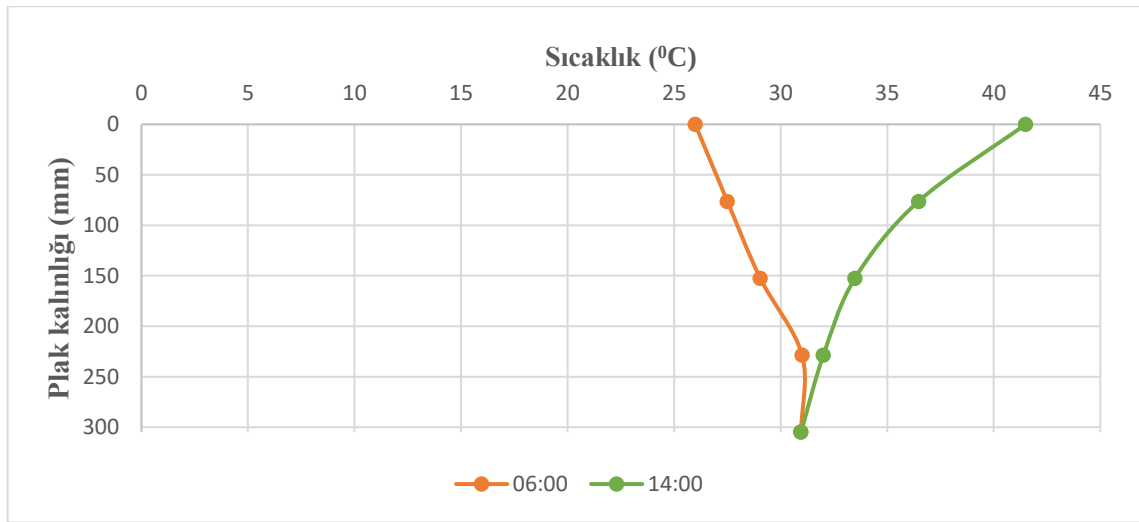


Şekil 32. Maksimum pozitif ve negatif sıcaklık farklarının kaplama derinliğine göre değişimi

Siddique et al. (2005), Kansas'ta 305mm kalınlıktaki beton plak üzerinde hava sıcaklığı ile beton plak sıcaklığı arasındaki ilişkiyi incelemiştir. En yüksek pozitif sıcaklık farkı Şekil 33'de verildiği üzere saat 14:00'da 10.5 °C (kaplama üstünde 41.5 °C ve kaplama altında 31.0 °C), en düşük sıcaklık farkı ise saat 06:00'da 5.0 °C (kaplama üstünde 26.0 °C ve kaplama altında 31.0 °C) olarak ölçülmüştür. Şekil 34'de maksimum pozitif ve negatif sıcaklık farklarının kaplama derinliğine göre değişimi verilmektedir.

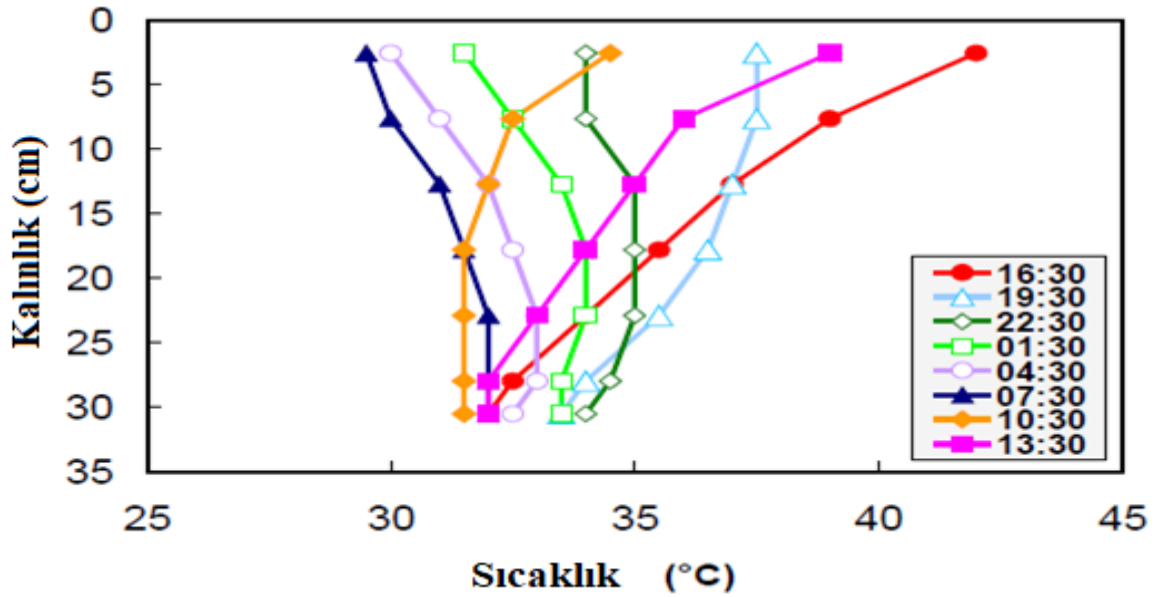


Şekil 33. Maksimum pozitif ve negatif sıcaklık farklarının kaplama derinliğine göre değişimi

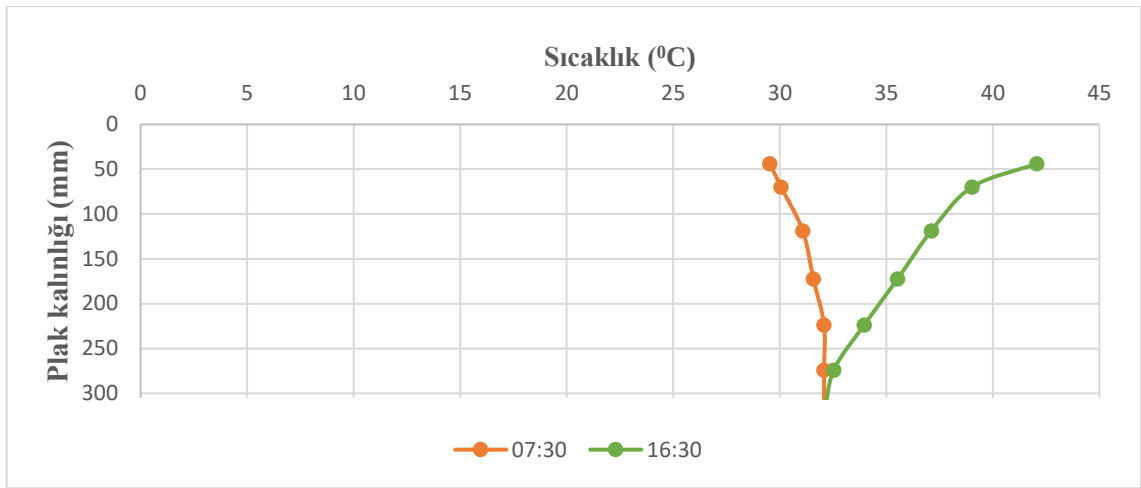


Şekil 34. Maksimum pozitif ve negatif sıcaklık farklarının kaplama derinliğine göre değişimi

Kim and Nam (2010), Cleveland'da 350 mm kalınlıktaki beton plak üzerinde hava sıcaklığı ile beton plak sıcaklığı arasındaki ilişkiyi incelemiştir. En yüksek pozitif sıcaklık farkı Şekil 35'de verildiği üzere saat 16:30'da 10.0 °C (kaplama üstünde 42.1 °C ve kaplama altında 32.1 °C), en düşük sıcaklık farkı ise saat 07:30'da 2.5 °C (kaplama üstünde 29.5 °C ve kaplama altında 32.1 °C) olarak ölçülmüştür. Şekil 36'da maksimum pozitif ve negatif sıcaklık farklarının kaplama derinliğine göre değişimi verilmektedir.

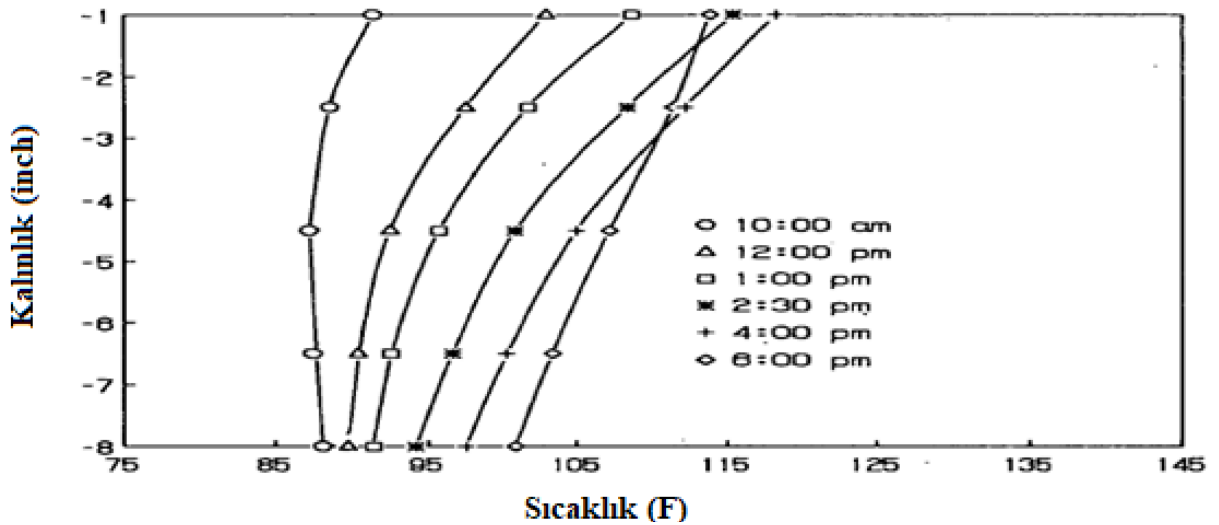


Şekil 35. Maksimum pozitif ve negatif sıcaklık farklarının kaplama derinliğine göre değişimi

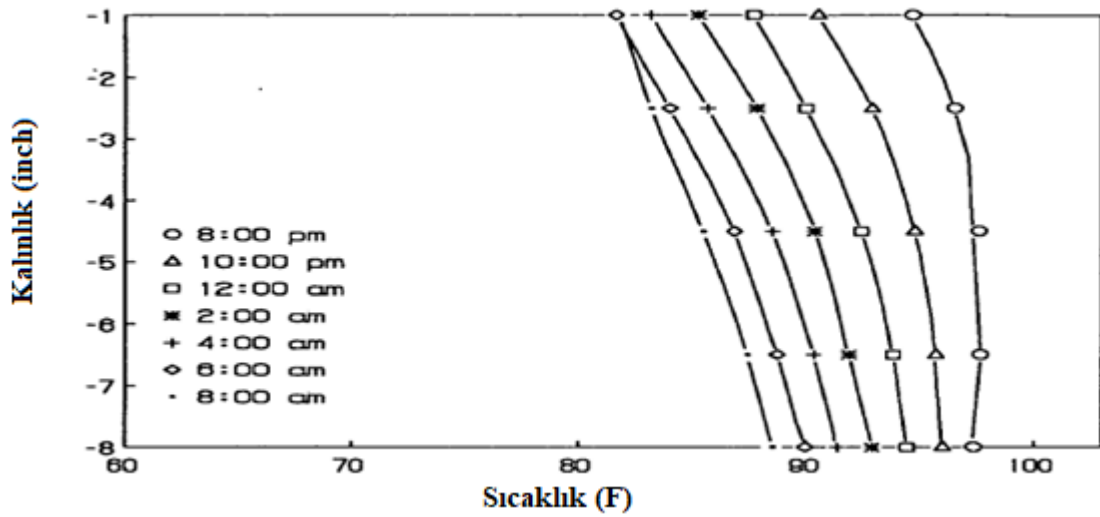


Şekil 36. Maksimum pozitif ve negatif sıcaklık farklarının kaplama derinliğine göre değişimi

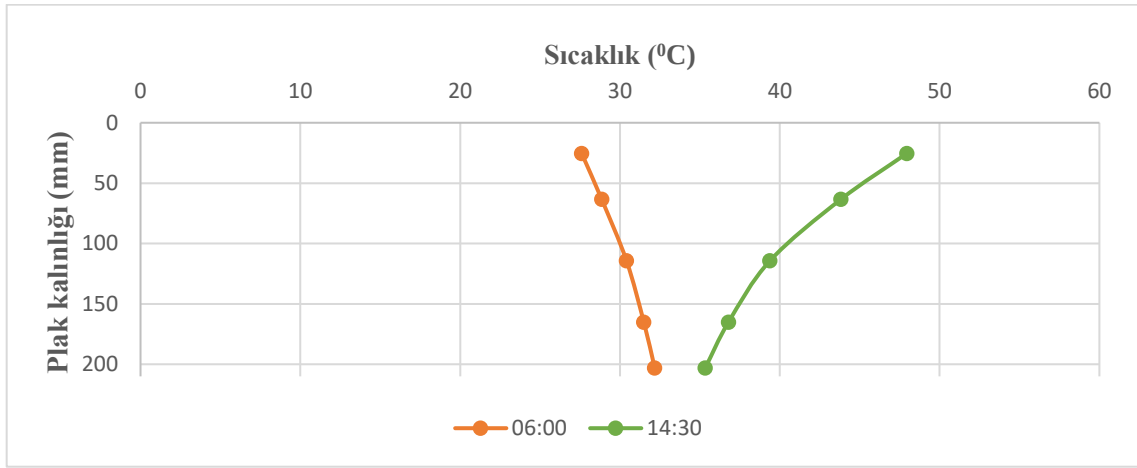
Choubane and Tia (1992), Florida’da 230mm kalınlıktaki beton plak üzerinde hava sıcaklığı ile beton plak sıcaklığı arasındaki ilişkiyi incelemiştir. En yüksek pozitif sıcaklık farkı Şekil 37 ve 38’de verildiği üzere saat 14:30’da 12.7 °C (kaplama üstünde 48.0 °C ve kaplama altında 35.3 °C), en düşük sıcaklık farkı ise saat 06:00’da 4.6 °C (kaplama üstünde 27.6 °C ve kaplama altında 32.2 °C) olarak ölçülmüştür. Şekil 39’da maksimum pozitif ve negatif sıcaklık farklarının kaplama derinliğine göre değişimi verilmektedir.



Şekil 37. Temmuz ayında ölçülen pozitif sıcaklık farkları



Şekil 38. Temmuz ayında ölçülen negatif sıcaklık farkları



Şekil 39. Maksimum pozitif ve negatif sıcaklık farklarının kaplama derinliğine göre değişimi

Kamalakara et al. (2018), beton plaklardaki sıcaklık değişimlerini incelemek üzere Hindistan'da 500x500 mm ölçülerinde ve 300 mm kalınlığında beton plak numunelerin dökümünü gerçekleştirmişlerdir. Günlük sıcaklık değişimlerini izlemek için, plakların üst, orta ve alt yüzeylerine sıcaklık sensörleri yerleştirilmiştir. Kaplamanın üstü ve altı arasındaki en büyük pozitif sıcaklık farkı 15 °C , en büyük negatif sıcaklık farkı ise -6 °C olarak ölçülmüştür.

Dhananjay and Abhilash (2014), beton plaklardaki sıcaklık değişimlerini incelemek üzere Hindistan'da 500x500 mm ölçülerinde ve 150 mm, 200 mm, 250 mm kalınlıklarında beton plak numunelerin dökümünü gerçekleştirmişlerdir. Günlük sıcaklık değişimlerini izlemek için, plakların üst, orta ve alt yüzeylerine sıcaklık sensörleri yerleştirilmiştir. Kaplamanın üstü ve altı arasındaki en büyük pozitif sıcaklık farkı 150 mm, 200 mm ve 250 mm kalınlığındaki beton plaklar için sırasıyla 11.9 °C, 12.4 °C ve 13.2 °C , en büyük negatif sıcaklık farkları ise -2.9 °C, -3.1 °C ve -3.5 °C olarak ölçülmüştür.

Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sultana (2010), BSK kaplama kalınlıkları, banket durumları, BSK elastisite modülü ve sıcaklık farkları ile farklı bağ kurma koşulları için BSK kaplamalar üzerindeki ince beton kaplamaların davranışını değerlendirmiştir. Solid Works sonlu elemanlar programını kullanarak, TWT kaplama, mevcut esnek kaplama ve tabii zeminden oluşan üç tabakalı yol sistemini modellemiştir. Kaplama uzunluğu 3,6 m, kaplama genişliği 0,9 m, mesh sayısının azaltılması amacıyla tabii zemin yüksekliği 76 cm, TWT tabakası için derz aralığı ise 1,8 m olarak ele alınmıştır. TWT davranışını esas alan farklı kamyon trafiği için hizmet ömürlerini hesaplayarak mevcut esnek kaplamaların üzerine yapılan ince beton kaplama tasarım kataloğu geliştirilmiştir. TWT ile mevcut AC katmanı arasındaki bağ durumu TWT davranışını etkileyen en önemli faktör olduğunu ortaya koymuştur. Enine çekme gerilmesi, bağ kurulma durumundan bağ kurulmama durumuna göre yaklaşık % 160 artmaktadır. Sürtünme katsayısının eklenmesi ile kaplama yapılmayan banket koşulları için çekme gerilmesinde önemli bir düşüş görülürken kaplama yapılmış olan banketlerde önemli bir etki göstermemiştir. Farklı TWT kalınlıkları için, gerilmelerdeki değişimlerin bağ kurulmamış TWT kaplamalar için %23 ila % 32 ve bağ kurulmuş TWT kaplamalar için % 14 ila % 20 arasında değiştiği bulunmuştur. Mevcut AC kalınlığının 125 mm kalınlığındaki beton kaplamadaki beton gerilmeleri üzerinde 150 ve 190 mm TWT kaplamalarından daha belirgin bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. AC kalınlığında 50 mm bir artışla beton çekme gerilmelerinin yaklaşık % 12 ila % 14 oranında azaldığı görülmüştür.

Zbiciak et al. (2019), sonlu elemanlar yöntemini kullanarak beton kaplama üzerinde sıcaklık farkları ve tekerlek yükleri nedeniyle oluşan yüklerin etkilerini araştırmıştır. Sıcaklık gradyanı ile birlikte tekerlek yükünün uygulandığı altmış altı farklı (6 farklı kalınlık ve 11 farklı uzunluk) beton kaplamanın analizi yapılmıştır. Yapılan analizlerde, kaplama uzunluğu ve kalınlığındaki değişikliklerin, termal ve servis yüklerinin neden olduğu gerilmeleri önemli ölçüde etkilediğini belirtmişlerdir. Kaplama uzunluğundaki artışın kaplamada meydana gelen gerilmenin artmasına neden olduğunu, bu durumun sıcaklık gradyanı yüklemesi halinde daha da arttığını ortaya koymuşlardır. Kaplama kalınlığındaki bir artışın, gerilme azalmasına neden olan etkisinin ise tekerlek yüklemesi durumunda daha önemli olduğunu belirtmişlerdir.

Salman and Patil (2014), beton kaplamalarda sıcaklık farkından dolayı oluşan gerilmelerin tahkiki için 3 boyutlu bir sonlu eleman modeli geliştirmiştir. Bunun için ANSYS yapısal analiz paketi kullanılmıştır. Çelik (2014), yalnız tekerlek yüklerinden dolayı oluşan gerilmelerin analizi için beton kaplama tabakası, alt temel tabakası ve zemin tabakasından

oluşan 3 boyutlu bir sonlu eleman modeli geliştirmiştir. Bunun için ANSYS yapısal analiz paketi kullanılmıştır.

Kumara et al. (2003), Florida koşulları için UTW test kaplama bölümlerini analiz etmek için kritik yükleme koşulları altında UTW kaplamaların gerilme analizi için 3 boyutlu bir sonlu eleman modeli geliştirmiştir. Bu çalışma, çeşitli kaplama malzemesi özelliklerinin ve tasarım parametrelerinin Hindistan koşullarında UTW kaplamaların davranışı ve performansı üzerindeki önemli etkilerini göstermektedir. Nishizawa et al. (2003), iki plaktan oluşan 3 boyutlu bir sonlu eleman modeli geliştirmiştir, ancak oluşturulan modelde enine derz, tam derz olarak kabul edilmiştir.

Mustaque and Sharmin (2010), bozulmuş BSK kaplama üzerine uygulanan beton kaplama davranışını araştırmak amacıyla 3 boyutlu bir sonlu elemanlar modeli geliştirmiştir. Farklı tabaka kalınlıkları ve farklı asfalt betonu elastisite modülleri ile iki tabaka arasındaki bağ durumunu da hesaba katarak beton kaplamada oluşan gerilmeleri incelemiştir. Yapılan çalışmada asfalt ve beton kaplama arasındaki bağ durumunun beton kaplama davranışını etkileyen en önemli faktör olduğu ortaya konulmuştur. Beton ve asfalt kaplama kalınlıklarının artırılması ile beton kaplamada oluşan çekme gerilmelerinin azaldığı belirtilmiştir.

Hu and Walubita (2011), kaplama tabakalarının arasındaki bağ durumunu araştırmak amacıyla 3 boyutlu bir sonlu elemanlar modeli geliştirmiştir. Esnek ve rijit temel tabakaları modellenerek şekil değiştirmeler incelenmiştir. Bağ durumunun aşınma tabakası altında oluşan şekil değiştirmelerin önemli bir ölçüde etkilediği belirtilmiştir.

Williamson (2015), ABAQUS programı kullanarak, mevcut bir asfalt kaplama üzerine iyileştirme amacıyla yapılan asfalt kaplamada uygulanan yapışma tabakasının etkisini araştırmışlardır. Yeni yapılan asfalt tabakası ile mevcut asfalt tabakası arasındaki bağ durumunun yeni yapılan tabaka altındaki çekme gerilmeleri üzerinde önemli bir etkisinin olduğu ortaya konulmuştur.

Li et al. (2012), asfalt ara tabakasının mekaniksel özelliklerini incelemişlerdir. Enine doğrultuda oluşan maksimum çekme ve kayma gerilmelerinin asfalt tabaka altındaki çatlama ölçütleri ile ilişkilendirmişlerdir. Asfalt-asfalt ve asfalt-temel tabakası ara yüzler için çeşitli yapıştırma yöntemleri düşünülmüştür. Tabakalar arasında tasarım yaklaşımlarında kullanılan tamamen bağ kurulmuş bir durum olmadığında gerilmelerin ve şekil değiştirmelerin önemli ölçüde yeniden dağıldığını ortaya koymuşlardır.

Ozer et al. (2012), asfalt ve beton kaplama arasındaki bağ durumunun etkisini araştırmak için sonlu elemanlar ve saha deney çalışmaları yapmışlardır. Kaplama sıcaklığı

arttıkça, bağ durumunun kaplama tepkileri üzerindeki etkisinin arttığı belirtilmiştir. Bağ durumunun, asfalt tabakanın altındaki gerilmeleri önemli ölçüde etkilediği gözlemlenmiştir. Asfalt ile beton tabakalar arasındaki sürtünme miktarı arttıkça beton kaplama altındaki gerilmelerin azaldığı belirtilmiştir.



MATERYAL ve YÖNTEM

Mühendislerin uğraştıkları kompleks problemlere doğrudan yaklaşamadıkları zaman ya da doğrudan yaklaşımla çözümün daha zor olduğu durumlarda, ana problemi daha kolay anlaşılabilen alt problemlere ayırıp, bu alt problemlerin çözümünden orijinal problemin çözümünü elde etmeleri çoğu zaman kullanılan bir metottur. Problemin çözümünde, iyi tanımlanmış sonlu sayıda eleman kullanarak yeterli bir model elde edilebilir. Böyle problemler sonlu elemanlar olarak adlandırılır. Gerçekte elastik sürekli ortamda elemanlar arası bağlantı noktalarının sayısı sonsuzdur (Çam ve Özdemir 2005; Moaveni 2011).

Sonlu elemanlar metoduyla bu sonsuz sayıdaki bağlantı sonlu bir sayıya indirgenir. Cisim sanki sadece bu noktalardan birbiriyle bağlıymış gibi düşünülür. Sonlu sayıda bu bağlantı noktaları ne kadar çoğaltılırsa bu metotla yapılan çözümdeki hata oranı o kadar küçülür. Diğer taraftan bu sayının çok fazla artması da sayısal çözümlemede büyük zorluk getirir. Bilgisayarlar yardımıyla bu zorluk bir derece giderilmiştir. Sonlu elemanlar metodunun önemli bir özelliği, tüm problemi temsil etmek üzere elemanları bir araya koymadan önce, her bir elemanın ayrı formüle edilebilmesidir. Eğer bir gerilme analizi problemi ile uğraşıyorsa her bir elemana etki eden dış kuvvetler ile elemanın düğüm noktalarının, yer değiştirme bağıntıları bulunduğu tüm sistem çözülmüş olur. Bu şekilde kompleks bir problem oldukça basit bir probleme dönüşür (Çam ve Özdemir 2005).

Sonlu elemanlar tekniği kavramı ilk olarak Hrennikoff (1941) tarafından makas ve giriş elemanları kullanılarak uçak analizi için kullanılmıştır. Günümüzde, sonlu eleman teknikleri, yapısal, mekanik, elektrik, jeolojik ve termal gibi çeşitli alanlarda karmaşık mühendislik problemlerinin çözülmesi amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Cheung and Zinkiewicz (1965), kaplama analizi için sonlu elemanlar analizini ilk uygulayanlardır.

Genel olarak, sonlu elemanlar analiz programları iki kategoriye ayrılabilir: ANSYS gibi doğrusal olmayan dinamik analiz için çok güçlü olan genel amaçlı sonlu elemanlar programları ve klasik ince plaka teorisi veya 3D katı elemanlar kullanılarak geliştirilen beton kaplama analizi için geliştirilen sonlu elemanlar programları.

ISLAB2000, J-SLAB, KENPAVE ve FECONS gibi kompozit kaplama analizleri için iki boyutlu (2-D) sonlu elemanlar programları mevcuttur (Cable et al. 2005). Bu programlar, Winkler temeline dayanan klasik teorileri kullanmaktadır.

Yukarıda belirtilen tüm programlarda, beton kaplamalar, her bir düğüm noktasında üç serbestlik derecesine, Z ekseninde defleksiyona, X ile Y eksenleri etrafında dönmeye ve eğilme kapasitesine sahip dikdörtgen plakaların bir bütünü olarak modellenmiştir. Ayrıca, bir alt temel tabakası ve / veya bir BSK tabakayı, plaka elemanları kullanılarak analize dahil edilebilir. Ek olarak, yukarıda bahsi geçen tabakaların ve beton kaplamaların ara kesitlerinde tam olarak bağ kurulmuş veya bağ kurulmamış bir sınır şartı simüle edilebilmektedir.

Tabii zemin, Winkler temel idealizasyonu ya da elastik katmanlı temel kullanılarak modellenmiştir. Yukarıda belirtilen programlarda sırasıyla kayma donatılarını (enine derz) ve agrega kilitlemesini simüle etmek için 2B kiriş elemanları ve dikey yay elemanları kullanılmıştır. Anahtar derzleri, kesme kuvvetini sadece derzler boyunca aktarabildiğinden ve davranışları agrega kilitlemesine benzer olduğundan, dikey yay elemanları kullanılarak simüle edilmiştir.

Lee (1999), derzli beton yollarda oluşan kritik gerilmeleri hesaplamak için alternatif bir gerilme tahmin yöntemi geliştirmiştir. Çalışmada, dingil konfigürasyonu, toplam tekerlek yükü, lastik basıncı, banket ve termal bükülmeler, gerilme tahminleri için kullanılan ana parametrelerdir. Çalışma sonunda basitleştirilmiş bir gerilme analiz yöntemi önerilmiş ve kullanımı kolay olan TKUPAV programı ile birleştirilmiştir.

Davids and Mahoney (1999), çeşitli dingil yükleri ve çevresel etkiler altında derzli donatısız beton kaplamaların davranışını simüle etmek için üç boyutlu bir sonlu analiz programı olan EverFE'yi geliştirmişlerdir.

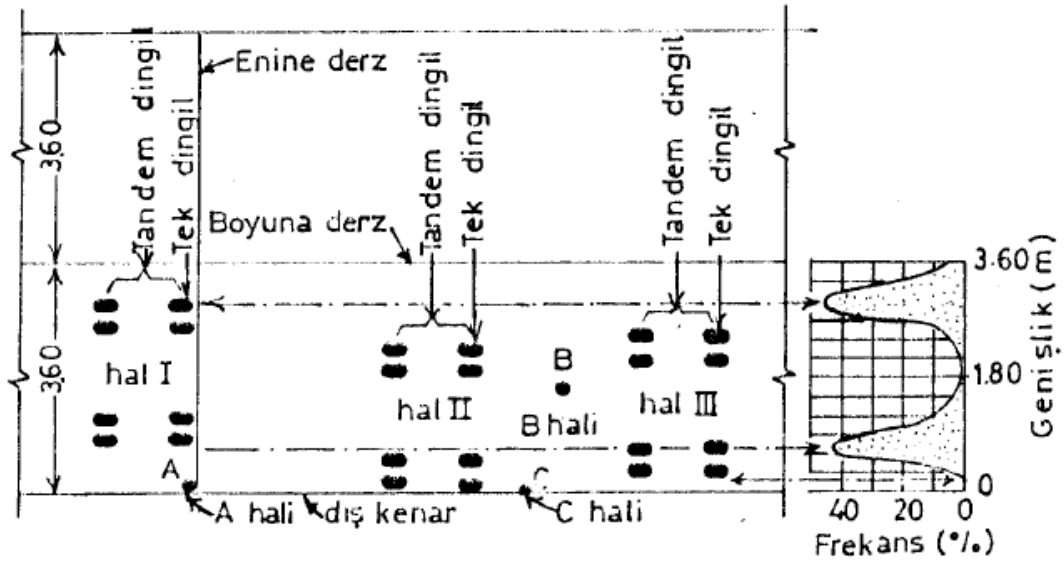
ABAQUS, ADINA, ANSYS ve Solid Works gibi üç boyutlu (3B) sonlu elaman analizi yapan yazılımlar mevcuttur. Bu çalışmada, 3B yazılım paketi ANSYS (2018 sürümü) mevcut BSK kaplama üzerine yapılan beton kaplamaların araştırılması için kullanılmıştır.

ANSYS, 100.000'den fazla satır kod içeren kapsamlı ve genel amaçlı sonlu elemanlar bilgisayar programıdır. ANSYS, statik, dinamik, ısı transferi, akışkan akımı ve elektromanyetizma analizlerini yapabilmektedir. Günümüzde ANSYS, havacılık, otomotiv, elektronik gibi birçok mühendislik alanlarında kullanılmaktadır (Akyol 2004).

Tabii zemin tabakasının modellenmesi için genellikle yoğun bir sıvı temel veya elastik bir katı temel kullanılmaktadır. Bununla birlikte yoğun sıvı temel, tabakalar arasında oluşacak temas veya sürtünme durumlarının incelenmesini engellemektedir (Kuo et al. 1995). Yapılan analizlerde yoğun sıvı temel analitik yöntemlerle bulunan sonuçların ANSYS ile bulunan sonuçlarla kıyaslanması amacıyla kullanılmıştır.

Analitik Yöntem ile Hesaplanan Gerilme ve Deplasmanların Kurulan ANSYS Sonlu Elemanlar Modeli ile Karşılaştırılması

Beton kaplama içinde oluşan gerilmeleri saptamak için teorik ve pratik çalışmalar yıllardan beri yapılmaktadır. Buna rağmen, Westergaard (1926) tarafından yapılan çalışma geçerliliğini korumaktadır. Westergaard üniform kalınlıktaki beton kaplamada yüklerden ve sıcaklık farkları nedeniyle oluşan eğilmeden doğan gerilmeler için formüller vermiştir. Deney bulgularına dayanarak bu formüllerde düzeltmeler yapılmışsa da esasta değişiklik olmamıştır. Westergaard yüklerden doğan gerilme formüllerini verebilmek için yükleri üç farklı kritik noktaya yüklemiştir. Şekil 40'da bu üç farklı yükleme görülmektedir.



Şekil 40. Beton plak için yükleme durumları

A HALİ: Yük büyük bir plağın dik köşesine yüklenmiştir. Böyle bir durum enine derz ile plak kenarının kesiştiği köşede olur. Bu yüklemenin etkili olabilmesi için plaklar arasında yük transferini sağlayan tedbirlerin alınmamış olması gerekir.

B HALİ: Yük beton plak kenarlarından uzak ortalama bir noktaya yüklenmiştir.

C HALİ: Yük köşelerden uzak olmak üzere plak kenarına yüklenmiştir.

Beton kaplamada yükten dolayı oluşan gerilmeleri saptamak amacıyla beton kaplama modeli oluşturulmuştur. Beton kaplama kalınlığı 200mm, üzerine oturduğu tabii zemin tabakası ise yoğun sıvı (Winkler) temel tabakası olarak ele alınmıştır. Zemin reaksiyon modülü (k -değeri) 0,035MPa/mm olarak alınarak beton kaplama altında oluşan çekme gerilmeleri ve maksimum deplasmanlar analitik yöntemle ve EverFE ve TKUPAV programları ile hesaplanmıştır. Beton kaplamada oluşan çekme gerilmeleri ve maksimum deplasmanlar ve ANSYS sonlu elemanlar programları ile de aynı veriler kullanılarak kurulan modeller ile hesaplanmıştır.

Yükten doğan gerilmelerin tahkiki

Lastik ile kaplama arasındaki temas alanının hesaplanması

Mekanik tasarım yönteminde, lastik ile kaplama arasındaki temas alanını bilmek gereklidir, böylece dingil yükünün temas alanı üzerinde eşit olarak dağıldığı varsayılabilir. Temas alanının büyüklüğü temas basıncına bağlıdır. Temas basıncı, düşük basınçlı lastikler için lastik basıncından daha büyüktür, çünkü lastiklerin duvarları basınç altındadır, duvar ve lastik basıncına bağlı dikey kuvvetlerin toplamı, temas basıncından kaynaklanan kuvvete eşit olmalıdır. Temas basıncı yüksek basınçlı lastikler için lastik basıncından daha küçüktür, çünkü lastiklerin duvarları gerilme durumundadır (Huang 2004).

Bununla birlikte, kaplama tasarımında, temas basıncının genel olarak lastik basıncına eşit olduğu varsayılır. Daha ağır dingil yükleri, daha yüksek lastik basıncına ve kaplamalar üzerinde daha fazla tahrip edici etkiye sahip olduklarından, temas basıncı olarak lastik basıncının kullanılması güvenli tarafta kalınmasını sağlamaktadır (Huang 2004).

Hudson and Seeds (1988), lastik kaplama temas alanının daireselden daha çok dikdörtgen olduğunu belirtmiştir. Shackel (1993), lastik kaplama temas alanının eliptik bir şekle sahip olduğunu ancak analiz sürecini basitleştirmek için eşdeğer bir dikdörtgen alanın kullanılmasını önermiştir. Gillespie (1993), yaptığı çalışmasında lastik kaplama temas alanının bir dikdörtgen olmadığını göstermiştir; ancak, dikdörtgen lastik temas alanı varsayımının beton kaplamaların tepkilerinde önemli bir fark olmadığını ortaya koymuştur. Lastik temas alanı aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır:

$$A_c = \frac{P}{q} \quad (7)$$

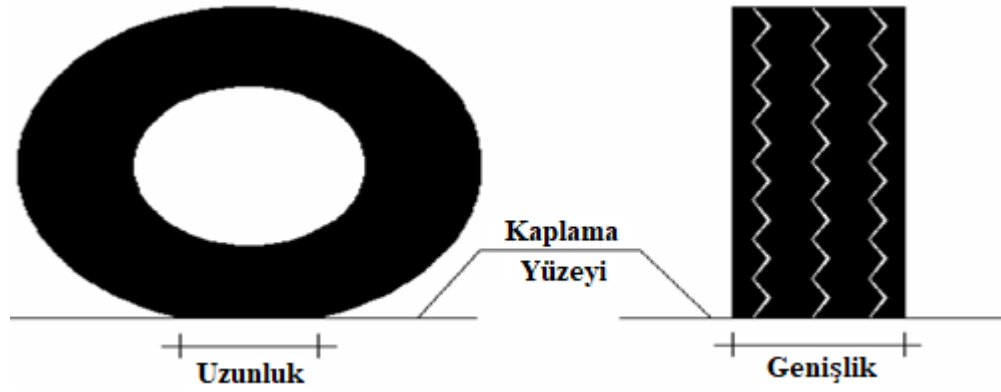
Burada;

A_c : Tekerlek temas alanı

P : Tekerlek yükü

q : Lastik basıncı

Kaplama analizlerinde araştırmacılar dikdörtgen bir lastik kaplama temas alanı düşünmüş olsalar da çeşitli boyutlar kullanmışlardır. Şekil 41’de gösterildiği gibi lastik kaplama temas alanı genişlik × uzunluk olarak tanımlandığında genişlik trafik yönünün normalidir.



Şekil 41. Lastik kaplama temas alanının uzunluk ve genişliği

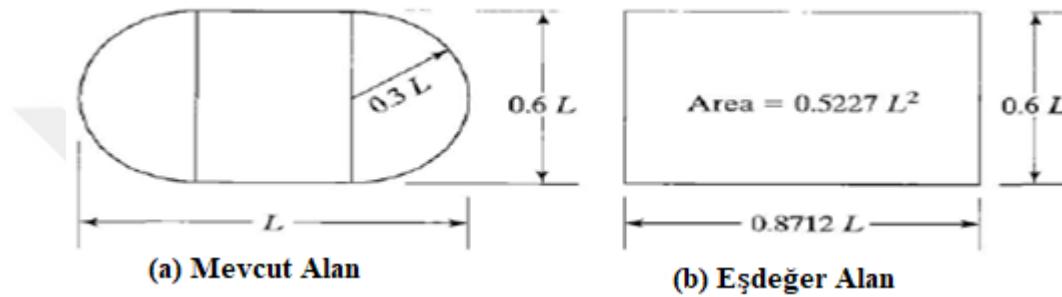
Literatürde kullanılmış olan lastik kaplama temas alanları Tablo 4'te verilmektedir. Packard and Tayabji (1983), 178 mm × 254 mm'lik bir dikdörtgen lastik kaplama temas alanını dikkate almıştır. Hudson and Seeds (1988), 11R24.5 tipindeki bir lastik izinin genişliğinin ve uzunluğunun sırasıyla 196 mm ve 250 mm olduğunu göstermiştir. Gillespie (1993), çift lastikler için 203 mm × 203 mm kare şeklini ve tek lastik için 203 mm × 229 mm dikdörtgen şeklini kullanmayı tercih etmiştir. Kim et al. (2002), 203 mm × 178 mm dikdörtgen şekli kullanmıştır. Bayrak (2007), tek lastik için 150 mm × 220 mm dikdörtgen şekli kullanmıştır. Nahi et al. (2011), tek bir lastik için 195 mm × 200 mm'lik dikdörtgen bir şekil kullanmıştır. Austroads (2017), merkezden merkeze 2130 mm uzaklıkta, eşit alana sahip iki üniform yüklü dairesel alan (yarıçap 102.4 mm, 800kPa lastik basıncı, 53kN tek dingil yükü) ile temsil edilen tek tekerlekli dingil yükü ile merkezden merkeze 1470 mm uzaklıkta eşit alana sahip dört eşit üniform yüklü dairesel alanı (yarıçap 92.1 mm, 750kPa lastik basıncı, 80kN çift lastikli tek dingil yükü) temsil edilen çift lastikli dingil yükünü kullanmıştır.

Tablo 4. Literatürde kullanılan lastik kaplama temas alanları

Çalışma	Temas Alanı	Tek dingil tek tekerlek				Tek dingil iki tekerlek				Adet
		Gen. (mm)	Uzun. (mm)	Çap (mm)	Alan (mm ²)	Gen. (mm)	Uzun. (mm)	Çap (mm)	Alan (mm ²)	
Packard and Tayabji (1983)	Dikdörtgen	0,178	0,254		0,045					
Gillespie (1993)	Dikdörtgen	0,203	0,229		0,046	0,203	0,203		0,082	2
Kim et al. (2002)	Dikdörtgen	0,203	0,178		0,036					
Huang (2004)	Dikdörtgen	0,151	0,219		0,033	0,427	0,219		0,094	1
Bayrak (2007)	Dikdörtgen	0,150	0,220		0,033					
Nahi et al. (2011)	Dikdörtgen	0,195	0,200		0,039					
Austroads (2017)	Dairesel			0,1024	0,033			0,092	0,053	2

Douglas et al. (2000), yaptıkları deneysel çalışmada farklı basınçlardaki radyal lastiklerde, lastik kaplama temas uzunluğu ile tekerlek yükü arasında grafiksel bir ilişki ortaya koymuşlardır. Lastik basıncındaki artışın temas uzunluğunu azalttığını, bununla birlikte lastik basıncının 480 kPa'yı aştığında lastik temas uzunluğundaki azalmanın nispeten daha küçük olduğunu belirtmişlerdir. 22,5 kN tekerlek yükü için lastik kaplama temas uzunluğunun, lastik basıncının 480 kPa'dan 690 kPa'ya yükseltildiğinde 240 mm'den 230 mm'ye düştüğünü belirtmişlerdir.

Şekil 42, Her lastik için bir dikdörtgen ve iki yarım daire şeklindeki temas alanının yaklaşık şeklini göstermektedir.



Şekil 42. Lastik temas alanının boyutları

Uzunluğu L ve genişliği $0,6L$ olarak varsayarak, temas alanı aşağıdaki formüllerle hesaplanır.

$$Ac = \pi(0,3L)^2 + (0,4L)(0,6)L = 0,5227L^2 \quad (8)$$

veya

$$L = \sqrt{\frac{Ac}{0,5227}} \quad (9)$$

Burada;

Ac = temas alanı, her lastikteki yükü lastik basıncına bölmek suretiyle elde edilir.

Şekil 42a'da gösterilen temas alanı, PCA (1966) tarafından daha önce beton kaplamaların tasarımında kullanılmaktaydı. Geçerli PCA (1984) yöntemi sonlu elemanlar yöntemine dayanmaktadır ve Şekil 42b'de gösterildiği gibi $0,5227L^2$ alanına sahip olan $0,8712L$ uzunluğunda ve $0,6L$ genişliğinde bir dikdörtgen alan varsayılmaktadır (Huang 2004).

Tekerlek yükü (P) : $53.000N/2 = 26.500N = 0,0265 MN$

Lastik basıncı (q) : $0,8 MPa$

$$Ac = \frac{P}{q} = \frac{0,0265}{0,8} = 0,033 m^2$$

$$L = \sqrt{\frac{Ac}{0.5227}} = \sqrt{\frac{0,033}{0.5227}} = 0,2517 \text{ m}$$

Dikdörtgenin uzunluğu;

$$0,8712L = 0,8712 \times 0,2517 = 0,219 \text{ m}$$

Dikdörtgenin genişliği;

$$0,6L = 0,6 \times 0,3912 = 0,151 \text{ m}$$

Lastik ile kaplama arasındaki temas alanı 0,219 m uzunluğunda ve 0,151 m genişliğinde bir dikdörtgen alan olarak hesaplanmıştır.

Lastik şişirme basıncı

Lastik boyutu genellikle lastik genişliği, uzunluğu ve temas alanı ile tanımlanmaktadır (Gillespie 1993). Lastik şişirme basıncı lastik – kaplama temas alanını etkilemektedir. Austroads (2017), yollardan geçen ağır taşıtlardaki lastik basıncının 500 kPa ila 1000 kPa arasında değiştiğini bildirmektedir. Shackel (1993), endüstriyel kaplamalarda kullanılan ağır taşıtlarda bu basıncın 700 kPa ile 1400 kPa arasında değiştiğini belirtmektedir. Austroads (2017), yapısal tasarım için 750 kPa ve 800kPa lastik basınçlarını önermektedir.

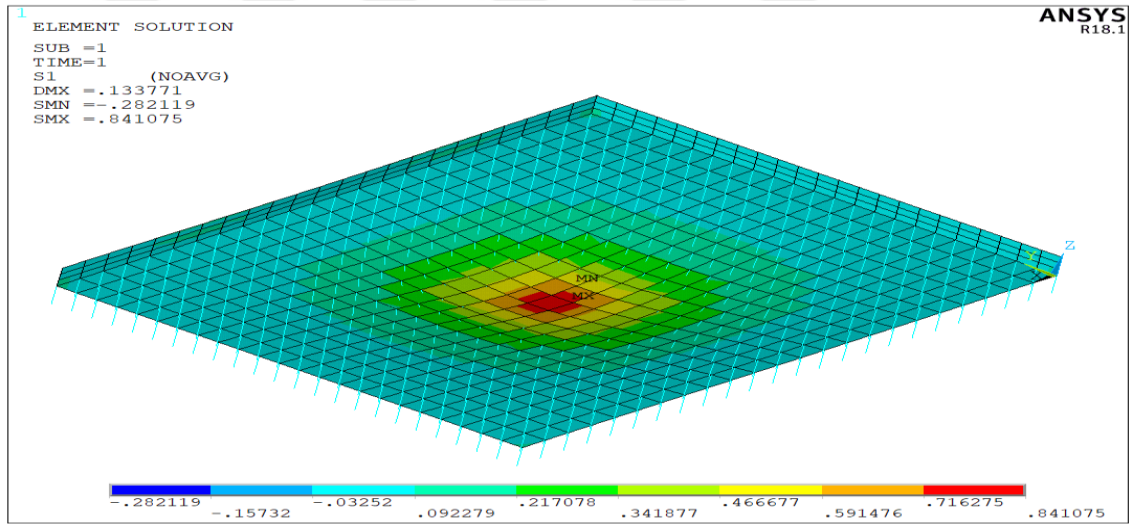
Okamoto and Packard (1989), lastik basıncının kaplama üzerindeki etkisi üzerine yaptığı araştırmasında lastik basıncının kaplama tepkisi üzerinde güçlü bir etkisi olmadığını belirtmektedir. Darestani (2007), lastik basıncındaki artışın, çekme gerilmesi üzerinde beton plağın defleksiyonundan daha fazla etki yarattığını belirtmektedir. Ek olarak, sonuçlar lastik şişirme basıncındaki artışın, orta kenar yüklemesinden köşe yüklemesinde daha büyük çekme gerilmelerine neden olduğunu ortaya koymaktadır. Bu durum çekme gerilmesi açısından kritik yükleme pozisyonunun lastik şişirme basıncına ve sonuç olarak lastik- kaplama temas alanına bağlı olduğunu göstermektedir. Köşe yükleme, daha düşük sertlik nedeniyle lastik-kaplama temas bölgesinin değişimine orta kenar yüklemeden daha hassastır (Darestani 2007).

Yükten doğan gerilmelerin analitik yöntem ve sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplanabilmesi için aşağıda verilen plak boyutları ve malzeme özellikleri kullanılmıştır.

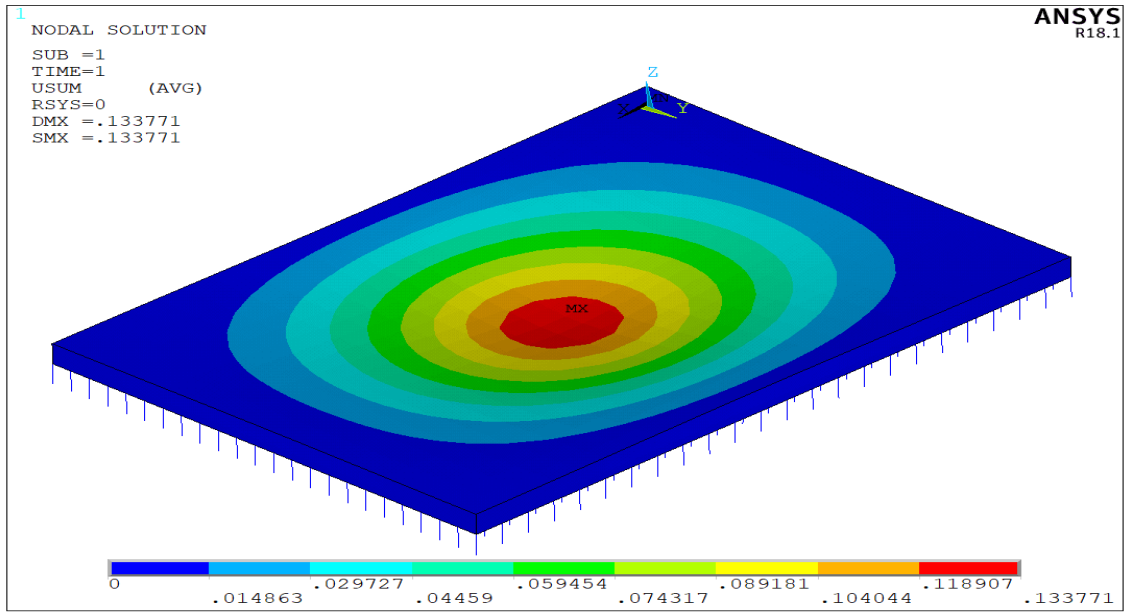
Plak genişliği (Ly)	: 3500 mm
Plak boyu (Lx)	: 5000 mm
Plak kalınlığı (h)	: 200 mm
Tekerlek yükü (P)	: 26.500 N
Beton elastisite modülü (E)	: 30.000 MPa

Beton Poisson oranı (μ)	: 0,15
Altyapı reaksiyon modülü (k)	: 0,035 MPa/mm
Euler sabiti (γ)	: 0,5772156649
Lastik basıncı (q)	: 0,8 MPa
Değme Alanı Yarıçapı (a)	: 103 mm
Basınç dağılımının eş değer yarıçapı (b)	: 103 mm
Göreceli sertlik katsayısı (l)	: 874 mm

26.500N'luk lastik yükü üniform ve orta yükleme olarak tatbik edildiğinde 200mm kalınlığındaki beton kaplamada oluşan maksimum asal gerilme Şekil 43'te gösterildiği gibi kaplama altında ve 0,841 MPa olarak hesaplanmıştır. Deplasman ise Şekil 44'te gösterildiği gibi 0,134 mm olarak hesaplanmıştır. Westergaard ve Ioannides'in ortaya koymuş oldukları denklemlerle maksimum çekme gerilmeleri ise 1,00 MPa olarak hesaplanmıştır. Ioannides'in denkleminde deplasman 0,123 mm olarak hesaplanmıştır.



Şekil 43. ANSYS ile hesaplanan orta yükleme maksimum asal gerilmesi

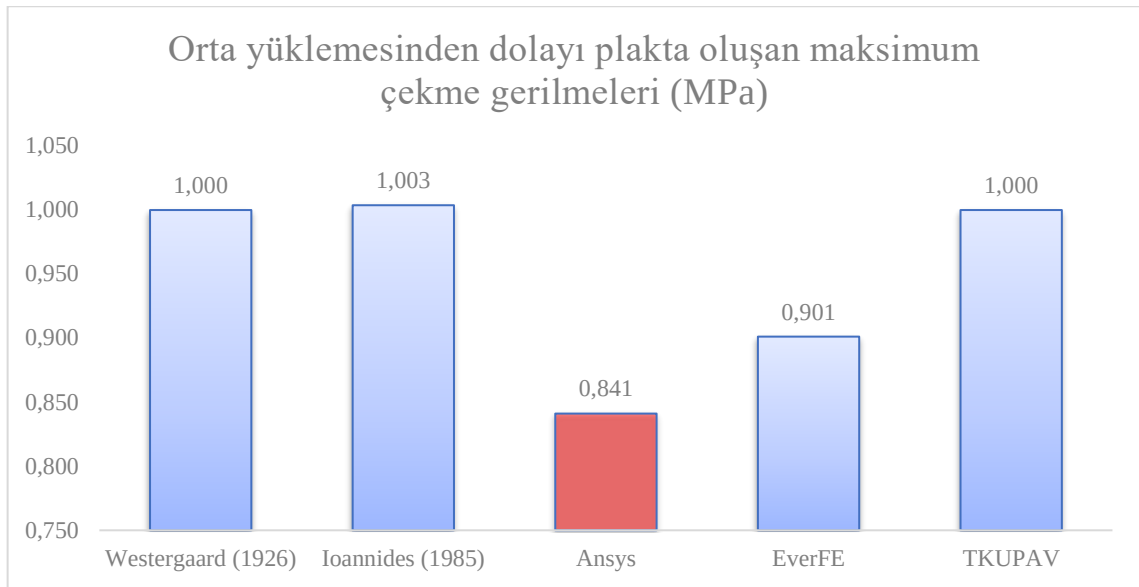


Şekil 44. ANSYS ile hesaplanan orta yüklemesi deplasmanı

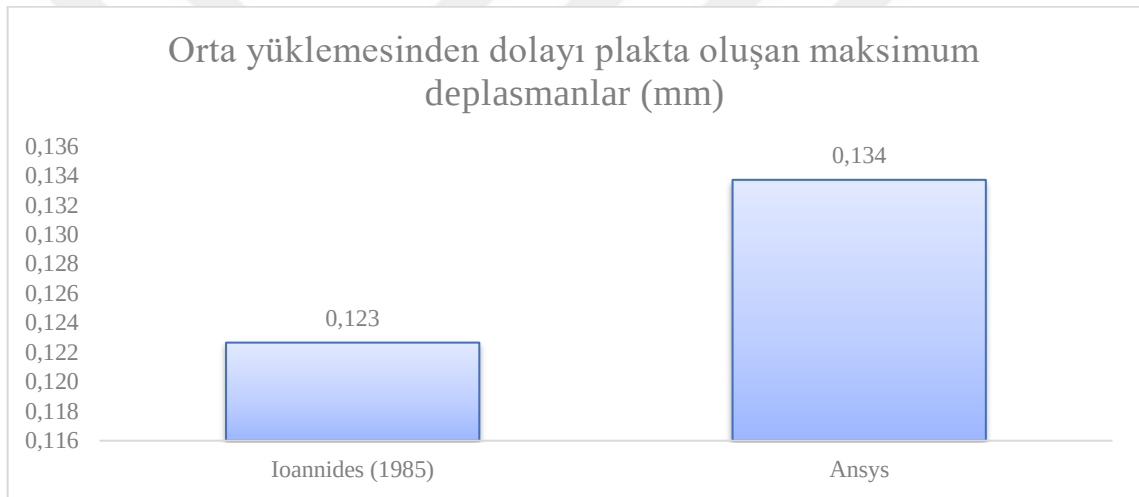
Yukarıda verilen beton plak özelliklerine göre yapılan orta yüklemesinden doğan gerilme ve deplasman tahkikleri Tablo 5 ile Şekil 45 ve 46'da verilmiştir.

Tablo 5. Orta yüklemesinden dolayı plakta oluşan maksimum gerilmeler ve deplasmanlar

Açıklama	Gerilme/ Deplasman	Birim	Kullanılan Formül
Westergaard (1926)	Çekme Gerilmesi	1,000 MPa	$\sigma_i = \frac{0,316P}{h^2} \left[4 \log \frac{l}{b} + 1,069 \right]$
Ioannides (1985)	Çekme Gerilmesi	1,003 MPa	$\sigma_i = \left[\frac{3P(1+\mu)}{2\pi h^2} \right] \left[\log_{10} \left(\frac{2l}{a} \right) + 0,5 - \gamma \right] + \left[\frac{3P(1+\mu)}{64h^2} \right] \left(\frac{a}{l} \right)^2$
	Deplasman	0,123 mm	$\delta_i = \frac{P}{8kl^2} \left\{ 1 + \frac{1}{2\pi} \left[\ln \frac{a}{2l} - 0,673 \right] \left(\frac{a}{l} \right)^2 \right\}$
Ansys	Çekme Gerilmesi	0,841 MPa	
	Deplasman	0,134 mm	
EverFE	Çekme Gerilmesi	0,901 MPa	
TKUPAV	Çekme Gerilmesi	1,000 MPa	

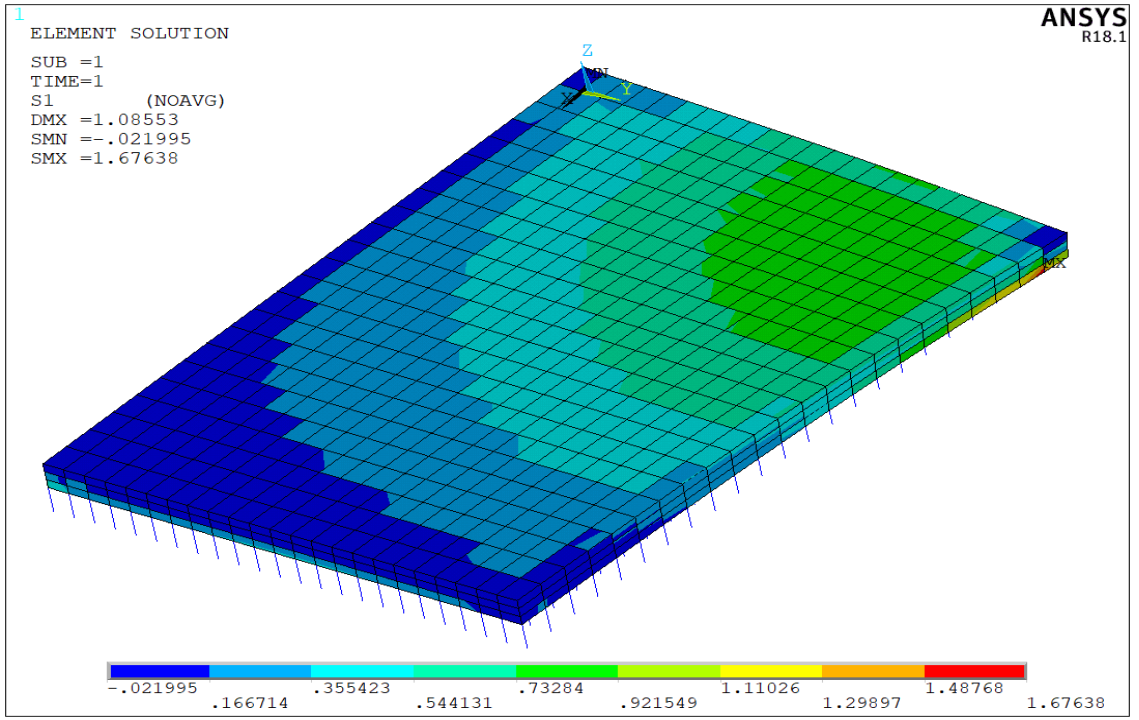


Şekil 45. Orta yüklemesinden dolayı plakta oluşan maksimum çekme gerilmeleri

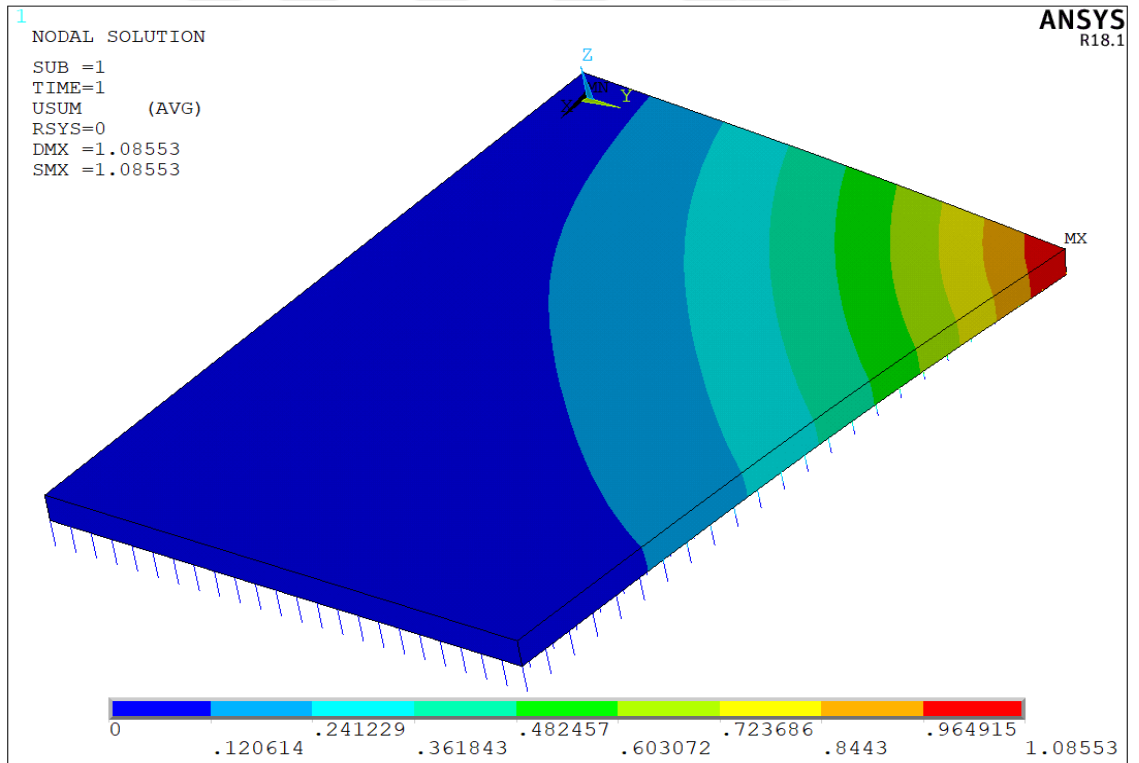


Şekil 46. Orta yüklemesinden dolayı plakta oluşan maksimum deplasmanlar

26.500N'luk lastik yükü üniform ve köşe yüklemesi olarak tatbik edildiğinde 200mm kalınlığındaki beton kaplamada oluşan maksimum asal gerilme Şekil 47'de gösterildiği gibi 1,676 MPa olarak hesaplanmıştır. Deplasman ise Şekil 48'de gösterildiği gibi 1,086mm olarak hesaplanmıştır. Ioannides ve Spangler'in ortaya koymuş oldukları denklemlerle maksimum çekme gerilmeleri sırasıyla 1,657 MPa ve 1,345MPa olarak hesaplanmıştır. Ioannides'in denklemleriyle deplasman 1,049mm olarak hesaplanmıştır.



Şekil 47. ANSYS ile hesaplanan köşe yüklemesi maksimum asal gerilmesi

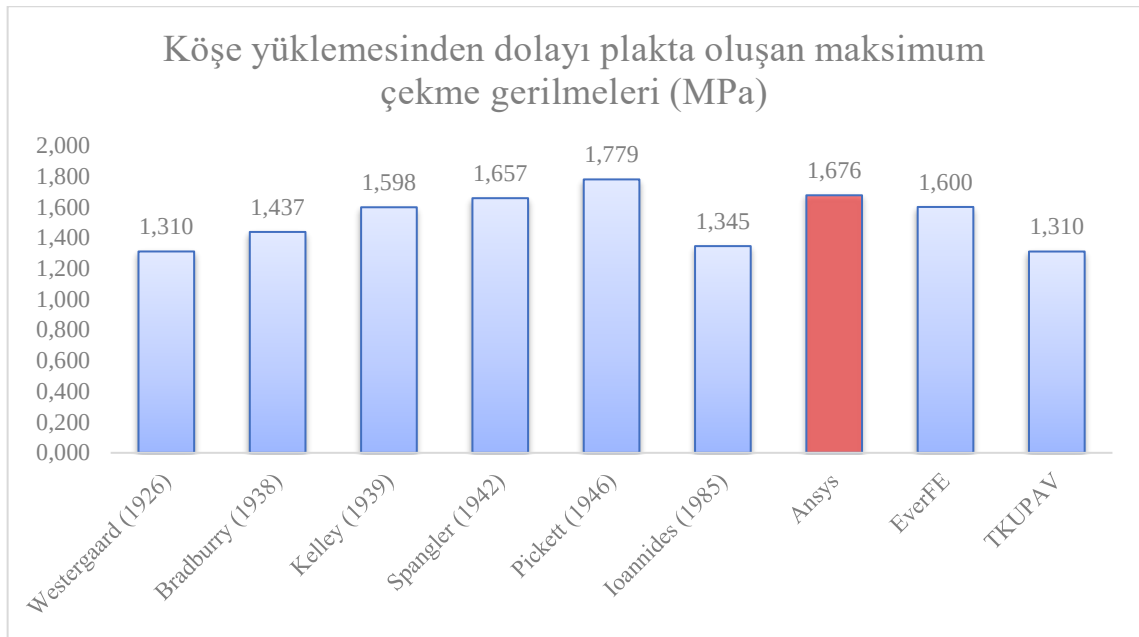


Şekil 48. ANSYS ile hesaplanan köşe yüklemesi deplasmanı

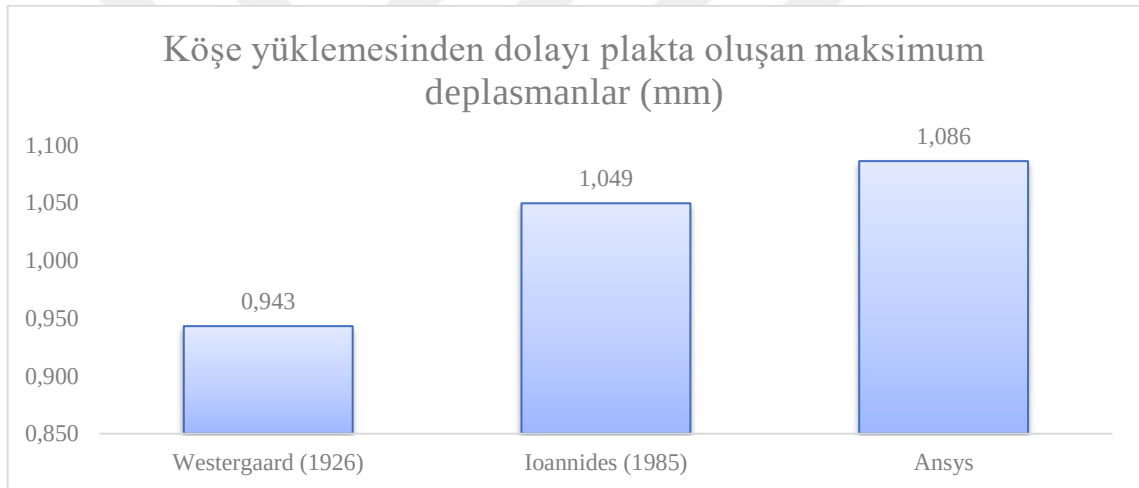
Yukarıda verilen beton plak özelliklerine göre yapılan köşe yüklemesinden doğan gerilme ve deplasman tahkikleri Tablo 6 ile Şekil 49 ve 50'de verilmiştir.

Tablo 6. Köşe yüklemesinden dolayı plakta oluşan maksimum çekme gerilmeleri ve deplasmanlar

Açıklama	Gerilme / Deplasman	Birim	Kullanılan Formül
Westergaard (1926)	Çekme gerilmesi	1,31 MPa	$\sigma_c = \frac{3P}{h^2} \left[1 - \left(\frac{a\sqrt{2}}{l} \right)^{0,6} \right]$
Bradburry (1938)	Çekme Gerilmesi	1,44 MPa	$\sigma_c = \frac{3P}{h^2} \left[1 - \left(\frac{a}{l} \right)^{0,6} \right]$
Kelley (1939)	Çekme Gerilmesi	1,60 MPa	$\sigma_c = \frac{3P}{h^2} \left[1 - \frac{a\sqrt{2}}{l} \right]^{1,2}$
Spangler (1942)	Çekme Gerilmesi	1,66 MPa	$\sigma_c = \frac{3P}{h^2} \left[1 - \frac{a\sqrt{2}}{l} \right]$
Pickett (1946)	Çekme Gerilmesi	1,78 MPa	$\sigma_c = \frac{4,2P}{h^2} \left[1 - \left(\frac{\sqrt{\frac{a}{l}}}{0,925 + 0,22 \left(\frac{a}{l} \right)} \right) \right]$
Ioannides (1985)	Çekme Gerilmesi (c=1,772xa)	1,35 MPa	$\sigma_c = \frac{3P}{h^2} \left[1 - \left(\frac{c}{l} \right)^{0,72} \right]$
Westergaard (1926)	Deplasman	0,94 mm	$\delta_c = \frac{P}{kl^2} \left[1,1 - 0,88 \left(\frac{a\sqrt{2}}{l} \right) \right]$
Ioannides (1985)	Deplasman (c=1,772xa)	1,05 mm	$\delta_c = \frac{P}{kl^2} \left[1,205 - 0,69 \left(\frac{c}{l} \right) \right]$
Ansys	Çekme Gerilmesi	1,676 MPa	
	Deplasman	1,086 mm	
EverFE	Çekme Gerilmesi	1,690 MPa	
TKUPAV	Çekme Gerilmesi	1,310 MPa	

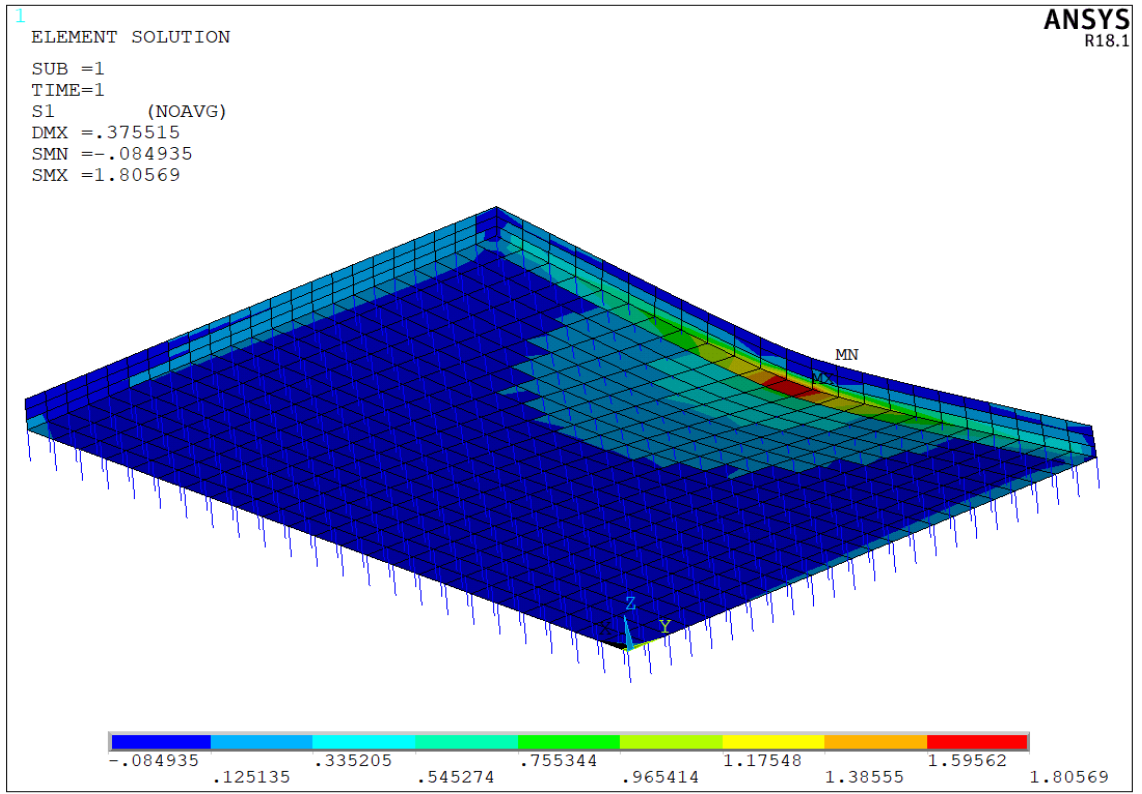


Şekil 49. Köşe yüklemesinden dolayı plakta oluşan maksimum çekme gerilmeleri

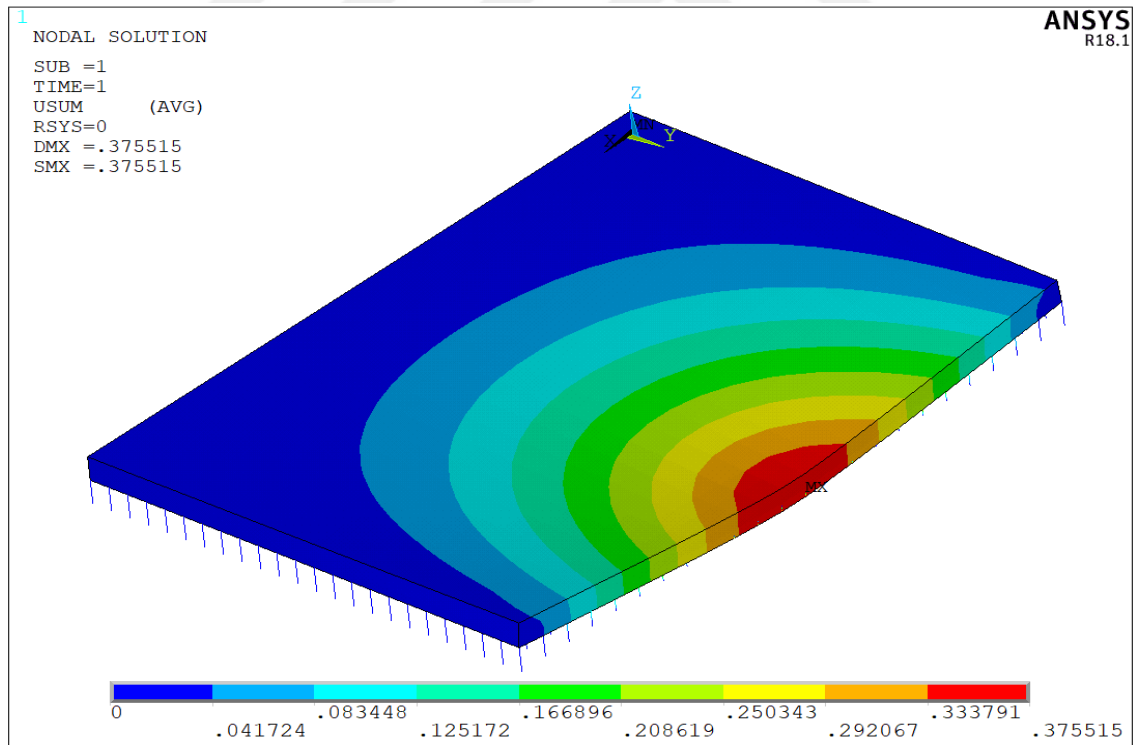


Şekil 50. Köşe yüklemesinden dolayı plakta oluşan maksimum deplasmanlar

26.500N’luk lastik yükü üniform ve kenar yüklemesi olarak tatbik edildiğinde 200mm kalınlığındaki beton kaplamada oluşan maksimum asal gerilme Şekil 51’te gösterildiği gibi kaplama alt kenarında ve 1,806 MPa olarak hesaplanmıştır. Deplasman ise Şekil 52’de gösterildiği gibi 0,376 mm olarak hesaplanmıştır. Westergaard ve Ioannides’in ortaya koymuş oldukları denklemlerle maksimum çekme gerilmeleri sırasıyla 1,540 MPa ve 2,002MPa olarak hesaplanmıştır. Ioannides’in denklemiyle deplasman 0,385 mm olarak hesaplanmıştır.



Şekil 51. ANSYS ile hesaplanan kenar yüklemesi maksimum asal gerilmesi

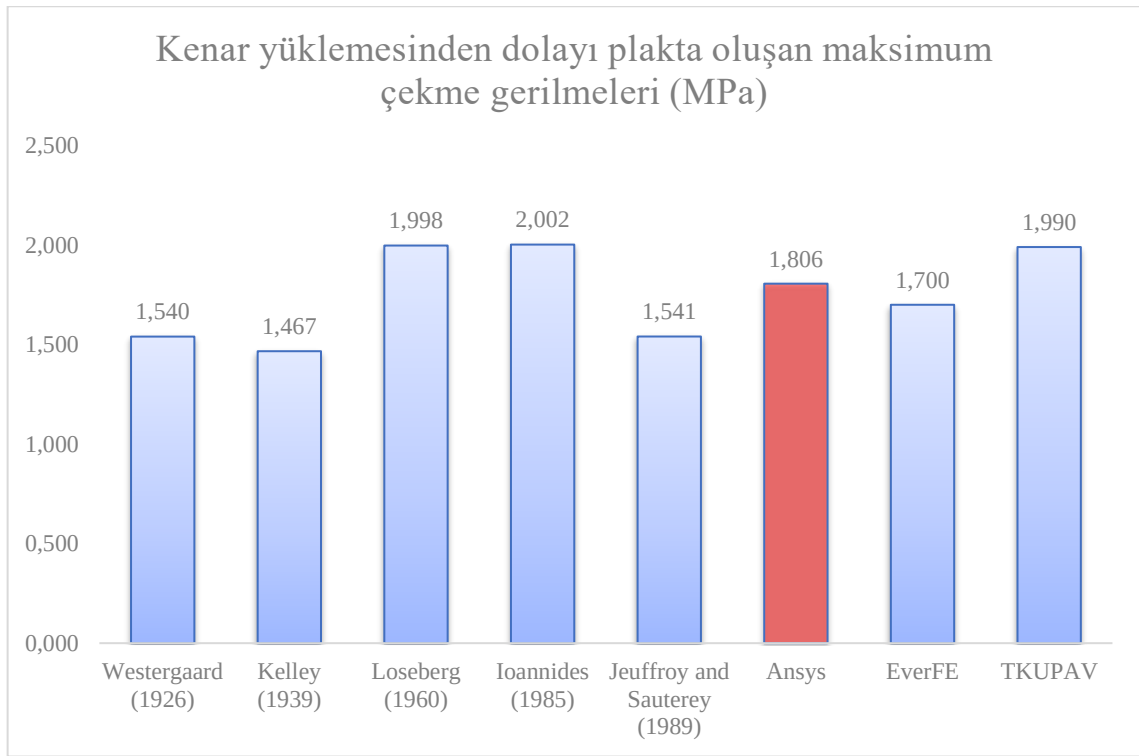


Şekil 52. ANSYS ile hesaplanan kenar yüklemesi deplasmanı

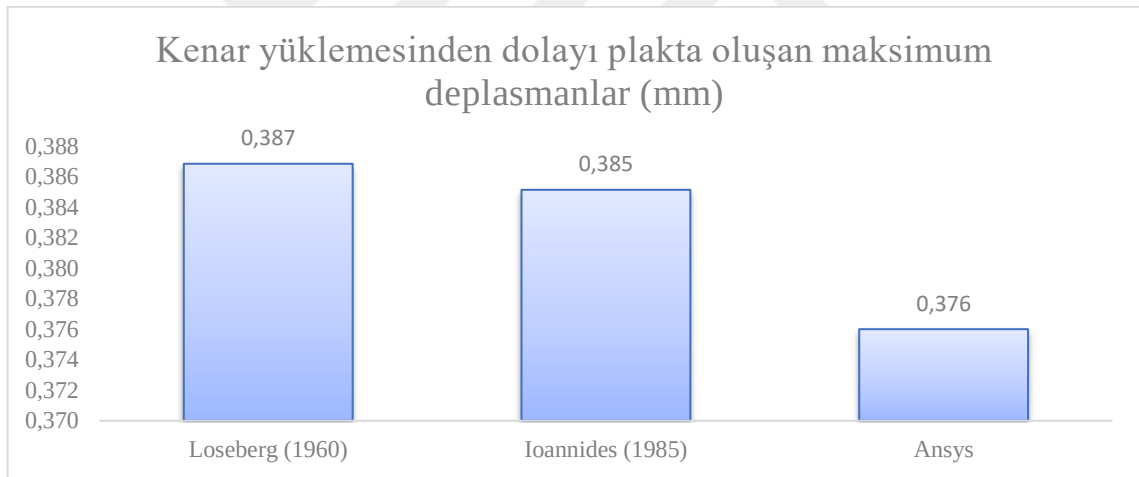
Yukarıda verilen beton plak özelliklerine göre yapılan kenar yüklemesinden doğan gerilme ve deplasman tahkikleri Tablo 7 ile Şekil 53 ve 54'de verilmiştir.

Tablo 7. Kenar yüklemesinden dolayı plakta oluşan maksimum çekme gerilmeleri ve deplasmanlar

Açıklama	Gerilme / Deplasman	Birim	Kullanılan Formül
Westergaard (1926)	Çekme Gerilmesi	1,54 MPa	$\sigma_e = 0,529(1 + 0,54\nu)\left(\frac{p}{h^2}\right)\left(4\log\left(\frac{l}{b}\right) + 0,359\right)$
Kelley (1939)	Çekme Gerilmesi	1,47 MPa	$\sigma_e = 0,529(1 + 0,54\nu)\left(\frac{p}{h^2}\right)\left(4\log\left(\frac{l}{b}\right) + \log(39,5)b\right)$
Loseberg (1960)	Çekme Gerilmesi	2,00 MPa	$\sigma_e = \frac{-6P}{h^2}(1 + 0,5\nu)\left[0,489\log\frac{a}{l} - 0,012 - 0,0063\frac{a}{l}\right]$
Ioannides (1985)	Çekme Gerilmesi	2,00 MPa	$\sigma_e = \frac{0,803P}{h^2}\left[4\log\frac{l}{a} + 0,666\frac{a}{l} - 0,034\right]$
Jeuffroy and Sauterey (1989)	Çekme Gerilmesi	1,54 MPa	$\sigma_e = \frac{0,572P}{h^2}\left[4\log\frac{l}{b} + 0,359\right]$
Loseberg (1960)	Deplasman	0,39 mm	$\delta_e = \left(\frac{1}{6^{0,5}}\right)(1 + 0,4\nu)\left(\frac{P}{kl^2}\right)\left[1 - 0,760(1 + 0,5\nu)\left(\frac{a}{l}\right)\right]$
Ioannides (1985)	Deplasman	0,39 mm	$\delta_e = \left(\frac{0,431P}{kl^2}\right)\left[1 - 0,82\left(\frac{a}{l}\right)\right]$
Ansys	Çekme Gerilmesi	1,806 MPa	
	Deplasman	0,376 mm	
EverFE	Çekme Gerilmesi	2,010 MPa	
TKUPAV	Çekme Gerilmesi	1,990 MPa	



Şekil 53. Kenar yüklemesinden dolayı plakta oluşan maksimum çekme gerilmeleri



Şekil 54. Kenar yüklemesinden dolayı plakta oluşan maksimum deplasmanlar

Sıcaklık farkından doğan gerilmelerin tahkiki

Gündüzleri plağın üst yüzü alt yüzüne göre daha fazla ısındığı için plak kenarları plak ortasına göre aşağı doğru bükülmek ister. Bu bükülmeye plak kendi ağırlığı ile direnir. Bu durumda plak kesitinde altta çekme, üstte basınç olmak üzere eğilme gerilmeleri oluşur. Geceleri ise plak altı, üstüne göre daha sıcak olacağından gerilme oluşumları ters olur. Westergaard aynı kritik noktalarda plağın alt ve üst yüzeyleri arasında sıcaklık farklarından doğan gerilmeler için de ayrı denklemler vermiştir. Westergaard (1926), Winkler temeli üzerinde oturan beton kaplamanın lineer ve izotropik olduğunu aynı zamanda kaplamanın lineer

Plak genişliği (Ly) : 3500 mm

Plak boyu (Lx) : 5000 mm

Göreceli sertlik katsayısı (I) : 874 mm

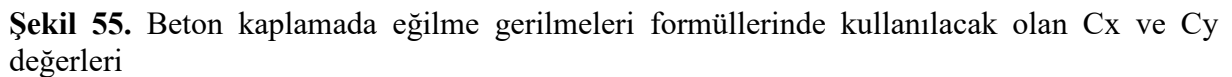
Beton genleşme katsayısı (e) : 0,0000089

Beton elastisite modülü (E) : 30.000 MPa

Beton Poisson oranı (μ) : 0,15

Plakta maksimum sıcaklık farkları : Gündüz beher (cm) plak kalınlığı için $t=+0,66^{\circ}\text{C}$

Cx ve Cy katsayıları : Plak boyu ve eni ile plak ve altyapı arasındaki göreceli sertlik oranının sıcaklık eğilme gerilmeleri ile bağlantısının belirlerler. Şekil 55'ten bulunurlar.



$Ly/l=3500/874=4,01$ Şekil 55'den $Cy=0,438$ bulunur.

$$\Delta t = t_{xh} = 0,66 \times 20 = 13,2 \text{ } ^\circ\text{C}$$
$$\sigma_x = \frac{Ee\Delta t}{2} \left[\frac{C_x + \mu C_y}{1 - \mu^2} \right] \quad (10)$$

$$\sigma_x=1,676 \text{ MPa}$$

Plağın derz kenarı ve boyuna dış kenarında eğilme gerilmesi aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$\sigma_{xe} = \frac{C_x E e \Delta t}{2} \quad (11)$$

$$\sigma_{xe}=1,522 \text{ MPa}$$

Enine derz kenarında eğilme gerilmesi aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$\sigma_{ye} = \frac{C_y E e \Delta t}{2} \quad (12)$$

$$\sigma_{ye}=0,773 \text{ MPa}$$

Plağın köşesinde oluşan eğilme gerilmesi aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$\sigma_c = \frac{E e \Delta t}{3(1-\mu)} \sqrt{\frac{a}{l}} \quad (13)$$

$$\sigma_{köşe}=0,474 \text{ MPa}$$

Literatür Çalışmaları ile Kurulan ANSYS Modelinin Doğrulanması

Sıcaklık farkından doğan gerilmelerin doğrulanması

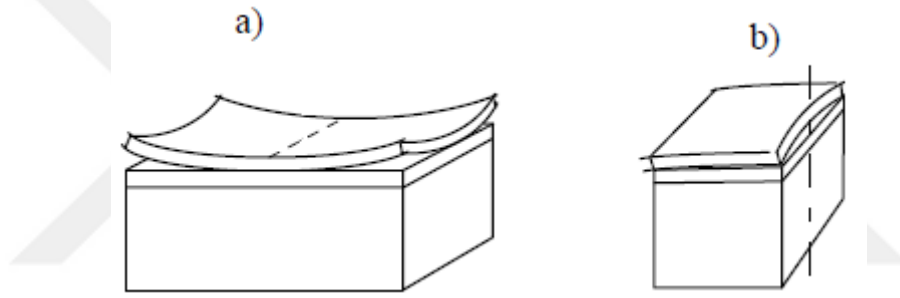
Beton plaklarda meydana gelen gerilmeler; trafik yüklerinden kaynaklanan eğilmede çekme gerilmeleri, plak üst ve tabanı arasındaki günlük sıcaklık farkı ile beton plağın eğilmesinden kaynaklanan eğilmede çekme gerilmeleri ve mevsimsel sıcaklık farkından dolayı betonun genleşmesi veya büzülmesi esnasında meydana gelen sürtünmeye bağlı gerilmelerdir.

Sıcaklık beton kaplamaları iki ana şekilde etkilemektedir. İlk olarak, mevsimsel sıcaklık değişimi beton kaplamaların büzülmesine neden olmaktadır. Bununla birlikte, beton plak ile altındaki tabaka arasındaki sürtünme büzülme hareketine direnerek beton plak içerisinde çekme gerilmelerinin meydana gelmesine sebep olur. İkinci etkiye ise, beton plak derinliği boyunca sıcaklık gradyanı neden olur. Bu doğrusal olmayan sıcaklık gradyanı, kaplama içindeki gerilmeleri, özellikle orta panel gerilmelerini büyük ölçüde etkilemektedir. Beton plaktaki gerilmelerin kaplamanın hizmet ömrü üzerinde doğrudan etkili olması nedeniyle kaplama kalınlığı boyunca sıcaklık gradyanının doğru bir şekilde modellenmesi çok önemlidir.

Beton kaplama üst yüzeyinin çevre ile doğrudan temas ettiğine dikkat edilmelidir. Güneş radyasyonunu emer, hava ile etkileşir ve yağmur ve karla doğrudan temas halindedir. Öte yandan, beton kaplama altındaki sıcaklık, yüzeydeki sıcaklıktan çok daha yavaş değişir. Bunun nedeni, alt yüzeydeki sıcaklık değişikliklerinin sadece ısı transferi nedeniyle

gerçekleşmesidir. Bu durum beton kaplamanın derinliği boyunca doğrusal olmayan bir sıcaklık gradyanına neden olur. Özellikle sıcak havalarda geçerli olan bu durumda meydana gelen sağanak yağışlar beton kaplama yüzeyinde ani bir sıcaklık düşüşüne neden olurken, kaplama alt yüzeyindeki sıcaklık ise sabit kalır. Bu doğrusal olmayan sıcaklık gradyanı, beton kaplamanın ortasında büyük gerilmelere neden olur.

Beton kaplama üst yüzeyinin soğumasına neden olan sıcaklık gradyanı, negatif sıcaklık gradyanı olarak adlandırılır. Benzer şekilde, beton kaplama üst yüzeyinin ısınmasına neden olan sıcaklık gradyanına pozitif sıcaklık gradyanı denir. Negatif sıcaklık gradyanları, kaplama köşelerinin yukarı doğru kıvrılmasına ve üst kaplama yüzeyinde çekme gerilmeleri ve alt yüzeyde ise basınç gerilmelerine neden olabilir (Şekil 56a). Pozitif sıcaklık gradyanları, kaplama kenarlarının aşağı doğru kıvrılmasına neden olabilir (Şekil 56b). Pozitif bir sıcaklık gradyanı altında, beton kaplamanın üst kısmında basınç gerilmeleri alt yüzeyinde ise çekme gerilmeleri meydana gelir.



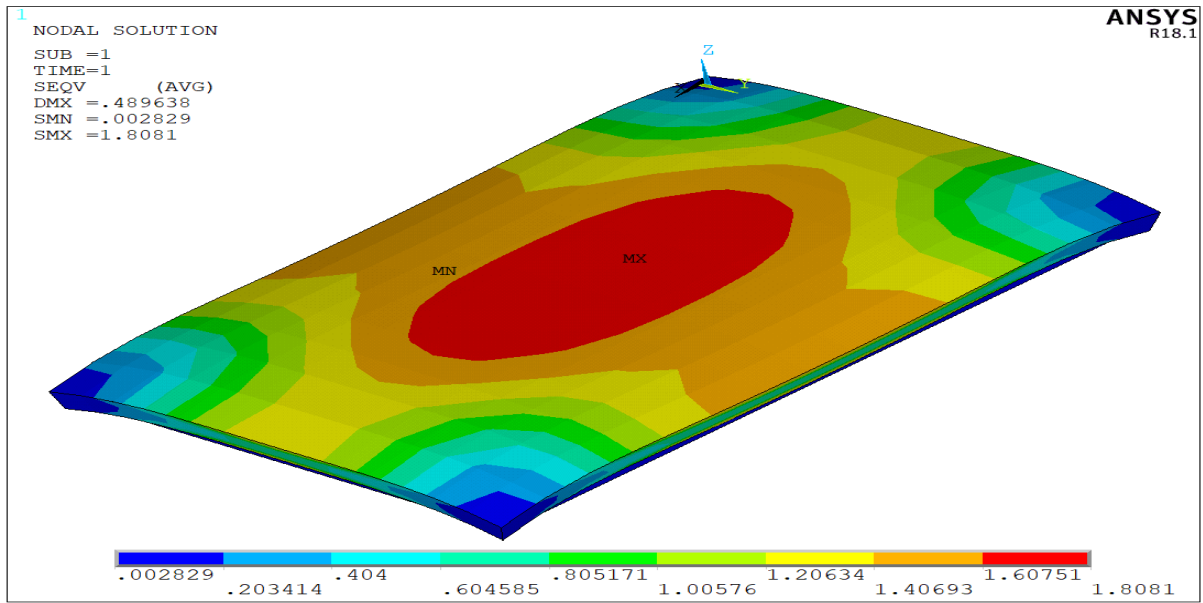
Şekil 56. Kaplamanın bükülmesi a) Negatif sıcaklık gradyanı b) Pozitif sıcaklık gradyanı

Salman and Patil (2014), beton kaplamalarda sıcaklık farkından dolayı oluşan gerilmelerin tahkiki için 3 boyutlu bir sonlu eleman modeli geliştirmiştir. Bunun için ANSYS yapısal analiz paketi kullanılmıştır. Beton kaplama ve zemin tabakasının modellenmesi için 3 boyutlu tuğla elemanı olan SOLID 45 kullanılmıştır. Beton kaplama 6.1 m uzunluğunda ve 3.7 m genişliğinde alınmıştır. Her iki tabaka için kalınlık 20.32 cm olarak alınmıştır. Beton plağa sırasıyla, $0.66^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ 'lik pozitif sıcaklık gradyanı ve $-0.33^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ 'lik negatif sıcaklık gradyanı uygulanmıştır. Beton kaplamanın elastisite modülü ve poisson oranı sırasıyla 34500 MPa ve 0.2 olarak alınmıştır. Beton genleşme katsayısı olarak $9 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ alınmıştır. Zemin tabakasının elastisite modülü ve poisson oranı sırasıyla 153 MPa ve 0.3 olarak alınmıştır. Beton kaplama katmanlarına uygulanan lineer sıcaklık dağılımları Tablo 8' de verilmiştir.

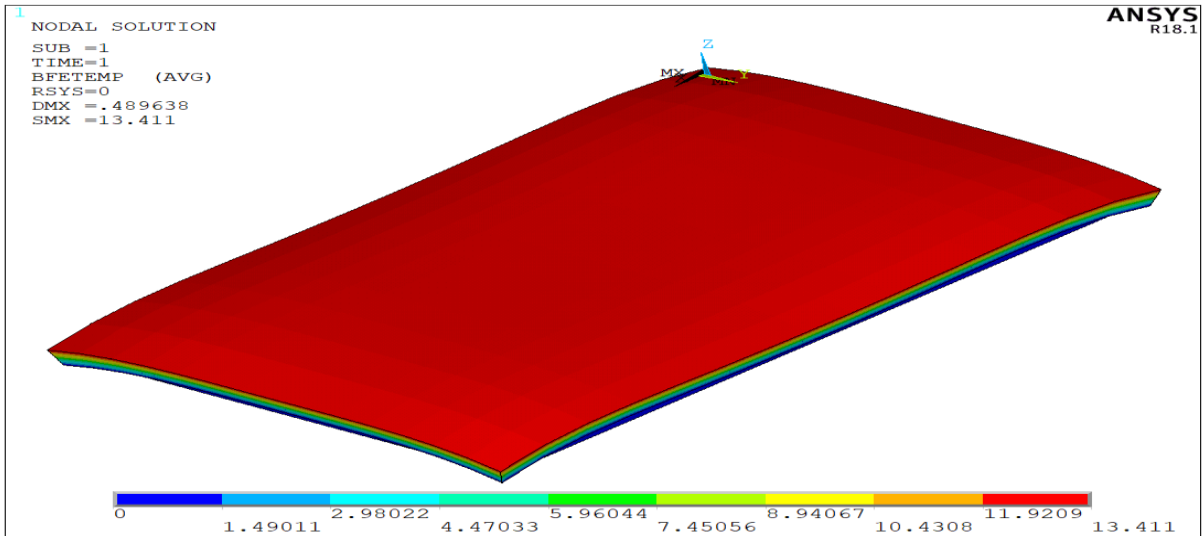
Tablo 8. Beton kaplama katmanlarına uygulanan lineer sıcaklık dağılımları ($^{\circ}\text{C}$)

Pozitif Gradyan $0.66\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{cm}$	Negatif Gradyan $-0.33\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{cm}$
13,411 (Üst)	0,000 (Üst)
8,941	2,235
4,470	4,470
0,000 (Alt)	6,706 (Alt)

Salman and Patil (2014) model parametreleri kullanılarak ANSYS 'de kurulan modelin doğrulaması yapılmıştır. Pozitif gradyan kullanılarak beton kaplamaya uygulanan lineer sıcaklık dağılımları sonucu oluşan maksimum gerilmeler Şekil 57 'de, lineer sıcaklık dağılımları ise Şekil 58'de verilmektedir.

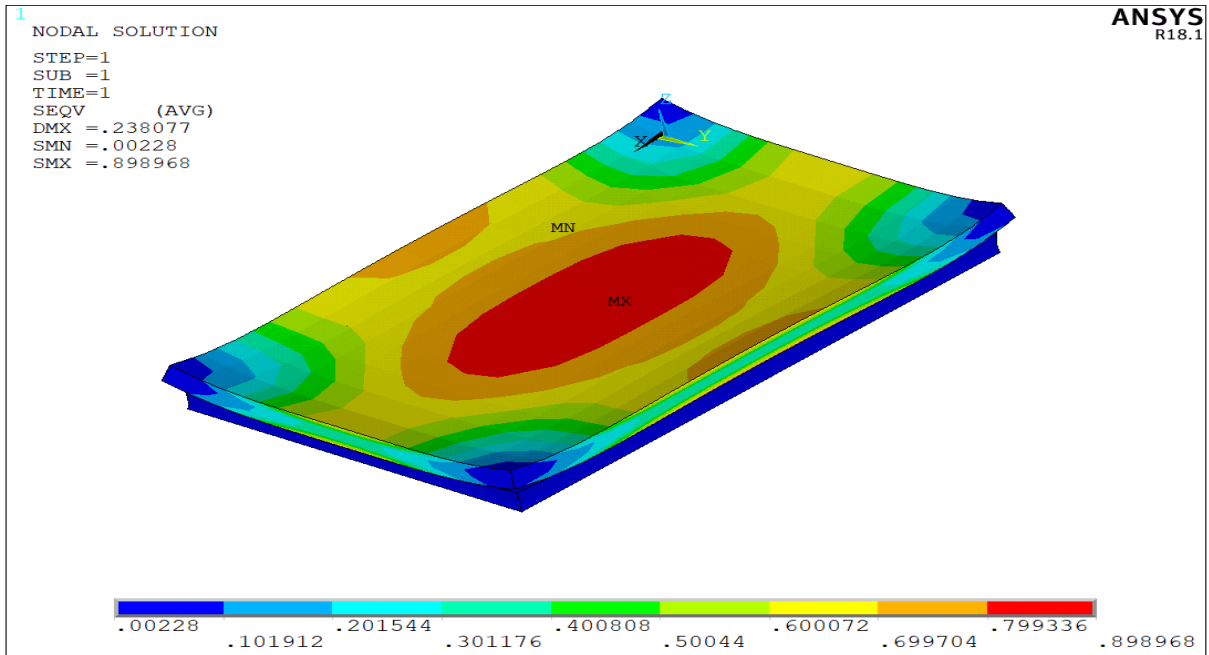


Şekil 57. Pozitif gradyan sonucu oluşan maksimum gerilmeler

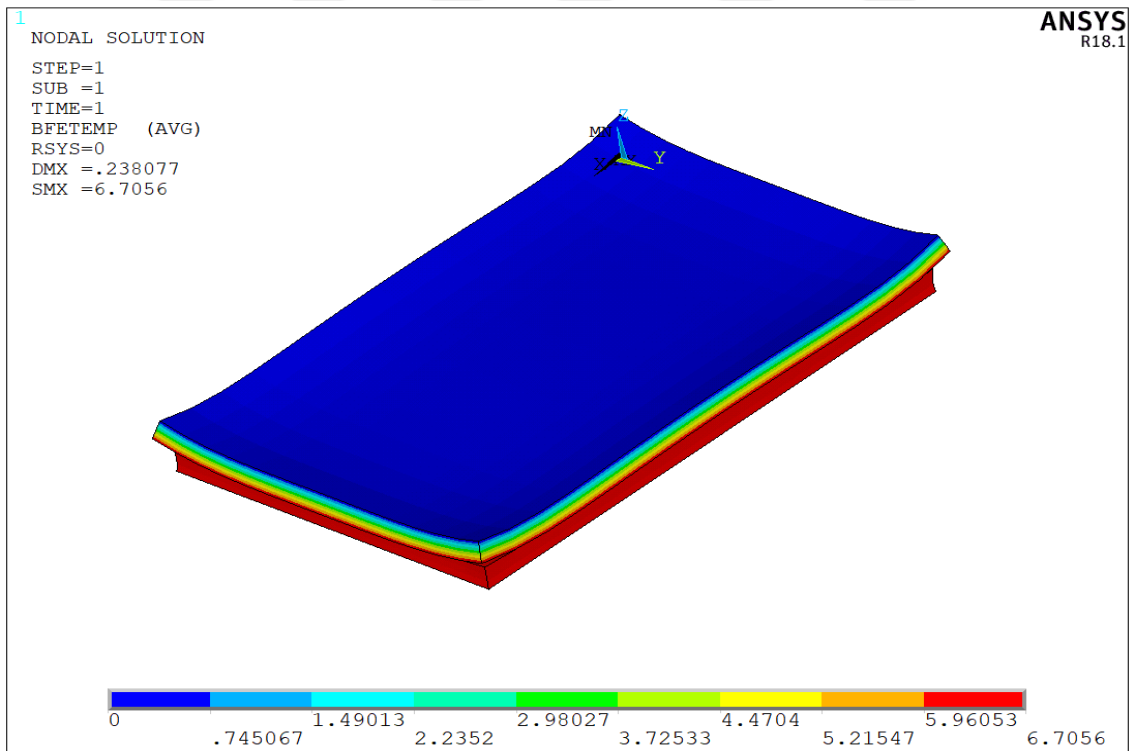


Şekil 58. Pozitif gradyan sıcaklık dağılımları

Negatif gradyan kullanılarak beton kaplamaya uygulanan lineer sıcaklık dağılımları sonucu oluşan maksimum gerilmeler Şekil 59 'da lineer sıcaklık dağılımları ise Şekil 60' da verilmektedir.



Şekil 59. Negatif gradyan sonucu oluşan maksimum gerilmeler



Şekil 60. Negatif gradyan sıcaklık dağılımları

Salman and Patil (2014), $0,66^{\circ}\text{C} / \text{cm}$ 'lik pozitif sıcaklık gradyanından dolayı beton kaplamada oluşan maksimum gerilmeyi $1,809 \text{ MPa}$, $- 0,33^{\circ}\text{C} / \text{cm}$ 'lik negatif sıcaklık

gradyanından dolayı beton kaplamada oluşan maksimum gerilmeyi ise 0,897 MPa olarak bulmuştur. Kurulan ANSYS doğrulama modelinde ise oluşan sıcaklık gerilmeleri sırasıyla 1,808 MPa ve 0,899 MPa olarak hesaplanmıştır. Karşılaştırma tablosu Tablo 9'da verilmektedir.

Tablo 9. Sıcaklık doğrulama modelinin karşılaştırılması

Yapılan Çalışmalar	Maksimum Termal Gerilmeler (N/mm ²)	
	Pozitif Gradyan 0.66 °C/cm	Negatif Gradyan -0.33 °C/cm
Salman & Patil (2014)	1,809	0,897
ANSYS Doğrulama Modeli	1,808	0,899

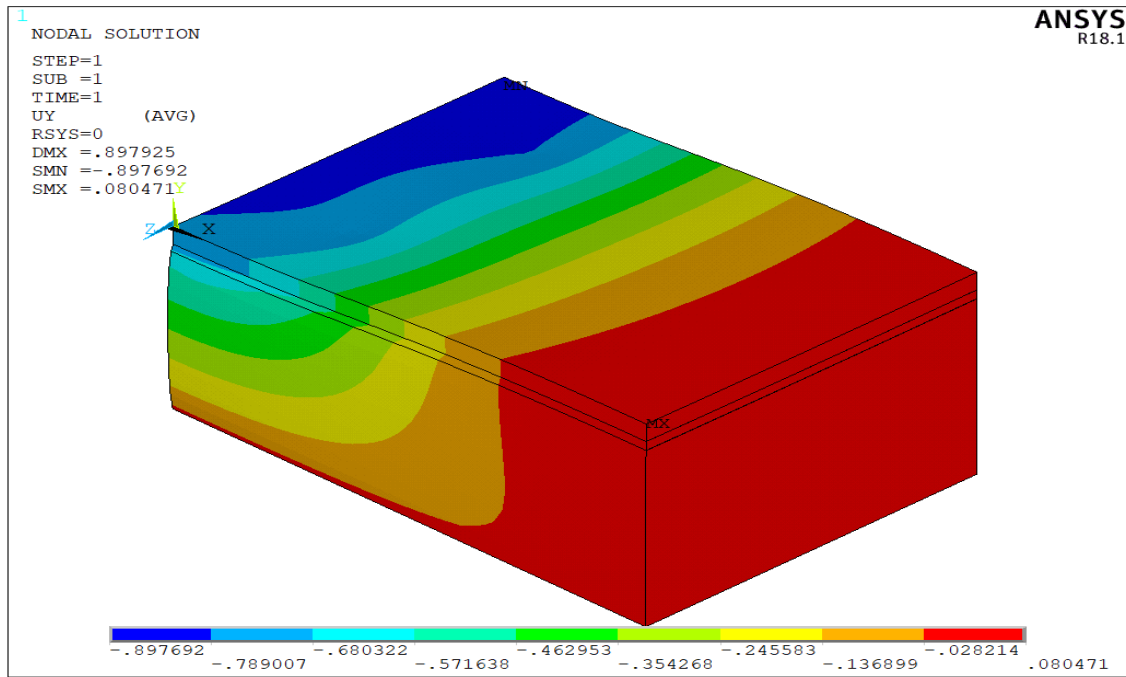
Yalnız tekerlek yüklerinden doğan gerilmelerin doğrulanması

Çelik (2014), yalnız tekerlek yüklerinden dolayı oluşan gerilmelerin analizi için beton kaplama tabakası, alt temel tabakası ve zemin tabakasından oluşan 3 boyutlu bir sonlu eleman modeli geliştirmiştir. Bunun için ANSYS yapısal analiz paketi kullanılmıştır.

Derz aralıkları kesilmiş kabulü yapılarak plaklar; X yönünde 500 cm, Y yönünde ise 350 cm olarak düzenlenmiştir. Tasarım yükü olarak yasal çift teker tek dingil yükü olan 11.5 ton ve yasal çift teker çift dingil yükü olan 16 ton kullanılmıştır. Tek tekerlek için temas alanı 10 cm X 30 cm alınmıştır. Rijit kaplama element tipi olarak Solid65 kullanılmıştır. Beton sınıfı olarak C8/10, C12/15, C16/20 ve C20/25 kullanılmış, elastisite modülleri ise sırasıyla 24500 MPa, 25800 MPa, 27000 MPa ve 28000 MPa olarak ele alınmıştır. Beton kaplamanın birim hacim ağırlığı 2400 kg / m³, poisson oranı ise 0.2 olarak alınmıştır. Beton kaplama kalınlıkları ise 10 cm / 15 cm ve 20 cm olarak alınmıştır. Alt temel tabakası element tipi olarak granüler malzemeyi yansıtan Solid186 kullanılmıştır. Elastisite modülü 100 MPa, birim hacim ağırlığı 2200 kg / m³, poisson oranı ise 0.3 olarak alınmıştır. Alt temel kalınlıkları ise 0 cm / 10 cm ve 20 cm olarak alınmıştır. Zemin tabakası element tipi Solid45 kullanılmıştır. Elastisite modülü 30 MPa, birim hacim ağırlığı 2200 kg / m³, poisson oranı ise 0.3 olarak alınmıştır. Zemin tabakası kalınlığı ise 200 cm olarak alınmıştır.

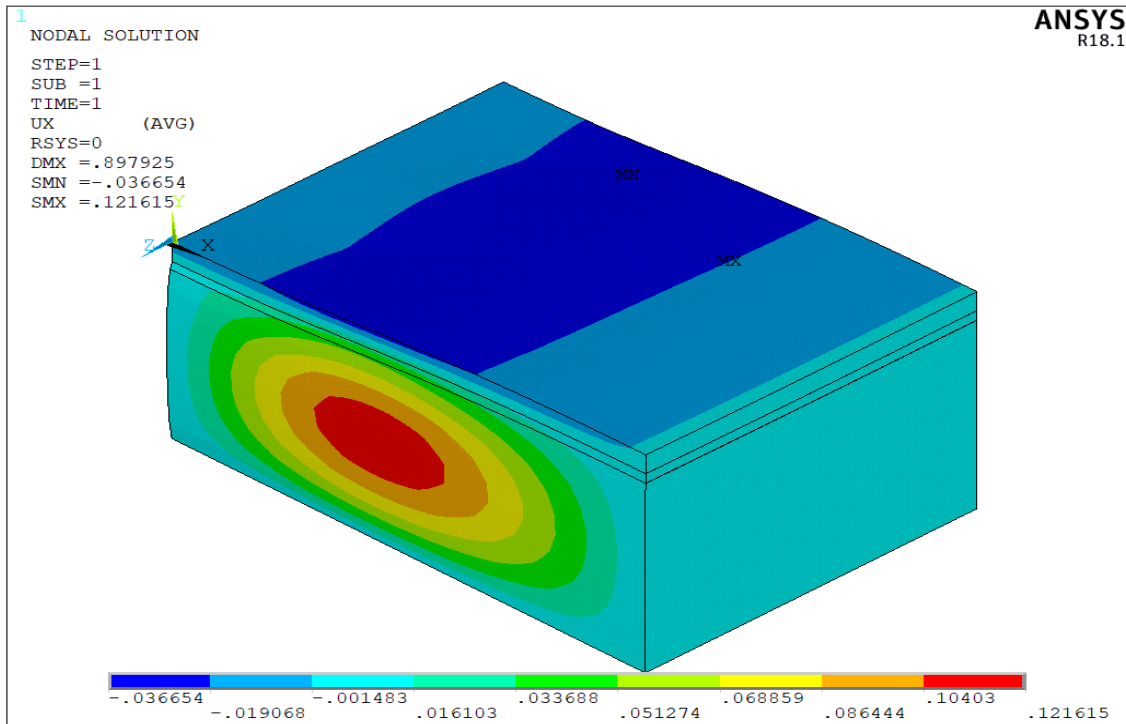
Oluşturulan doğrulama modelinde beton kaplama sınıfı için C20/25 alınmıştır. Beton kaplama, alt temel ve zemin tabakası kalınlıkları sırasıyla 20 cm, 10 cm ve 200 cm olarak alınmıştır. Tasarım yükü olarak yasal çift teker tek dingil yükü olan 11.5 ton kullanılmıştır. Tek tekerlek için temas alanı 10 cm X 30 cm alınmıştır. Bu parametreler kullanılarak ANSYS 'de kurulan modelin doğrulanması yapılmıştır.

Şekil 61’de Y doğrultusunda oluşan minimum ve maksimum şekil değiştirmeler verilmektedir. Minimum ve maksimum şekil değiştirmeler sırasıyla -0.897692 mm ve 0.080471 mm olarak hesaplanmıştır.



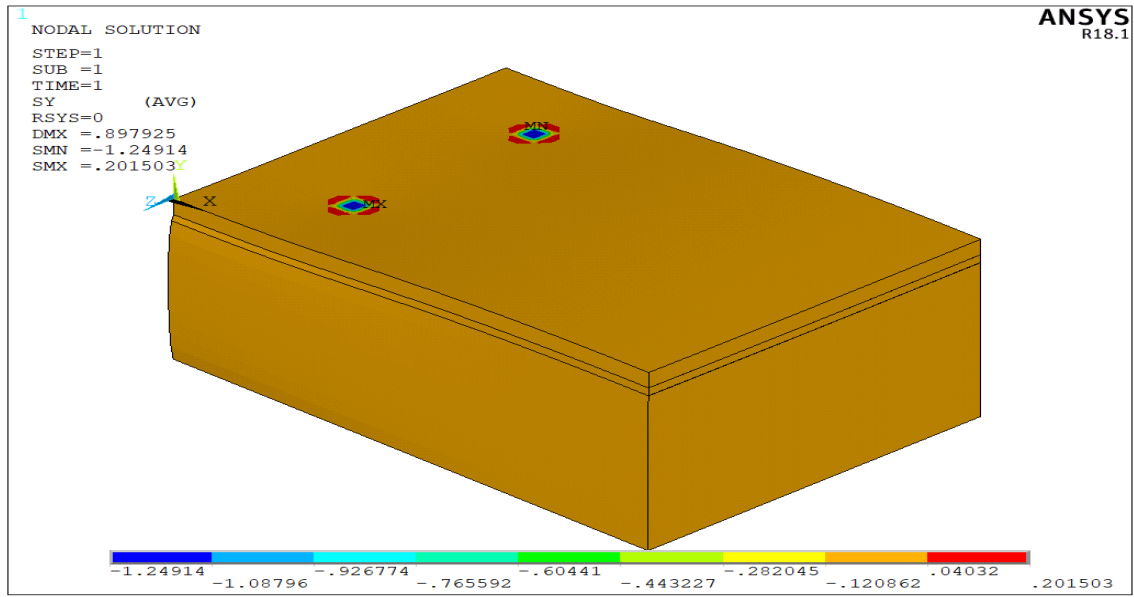
Şekil 61. Y doğrultusunda oluşan minimum ve maksimum şekil değiştirmeler.

Şekil 62’de X doğrultusunda oluşan minimum ve maksimum şekil değiştirmeler verilmektedir. Minimum ve maksimum şekil değiştirmeler sırasıyla -0.036654 mm ve 0.121615 mm olarak hesaplanmıştır.



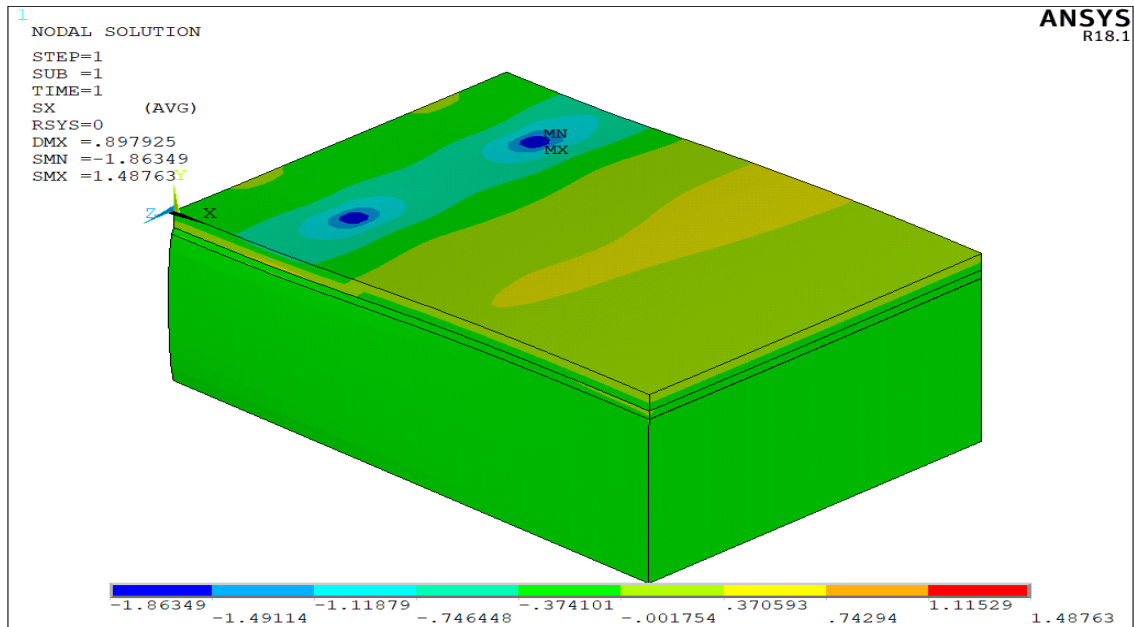
Şekil 62. X doğrultusunda oluşan minimum ve maksimum şekil değiştirmeler.

Şekil 63’de Y doğrultusunda oluşan minimum ve maksimum gerilmeler verilmektedir. Minimum ve maksimum gerilmeler sırasıyla -1.24914 MPa ve 0.201503 MPa olarak hesaplanmıştır.



Şekil 63. Y doğrultusunda oluşan minimum ve maksimum gerilmeler.

Şekil 64’de X doğrultusunda oluşan minimum ve maksimum gerilmeler verilmektedir. Minimum ve maksimum gerilmeler sırasıyla -1.86349 MPa ve 1.48763 MPa olarak hesaplanmıştır.

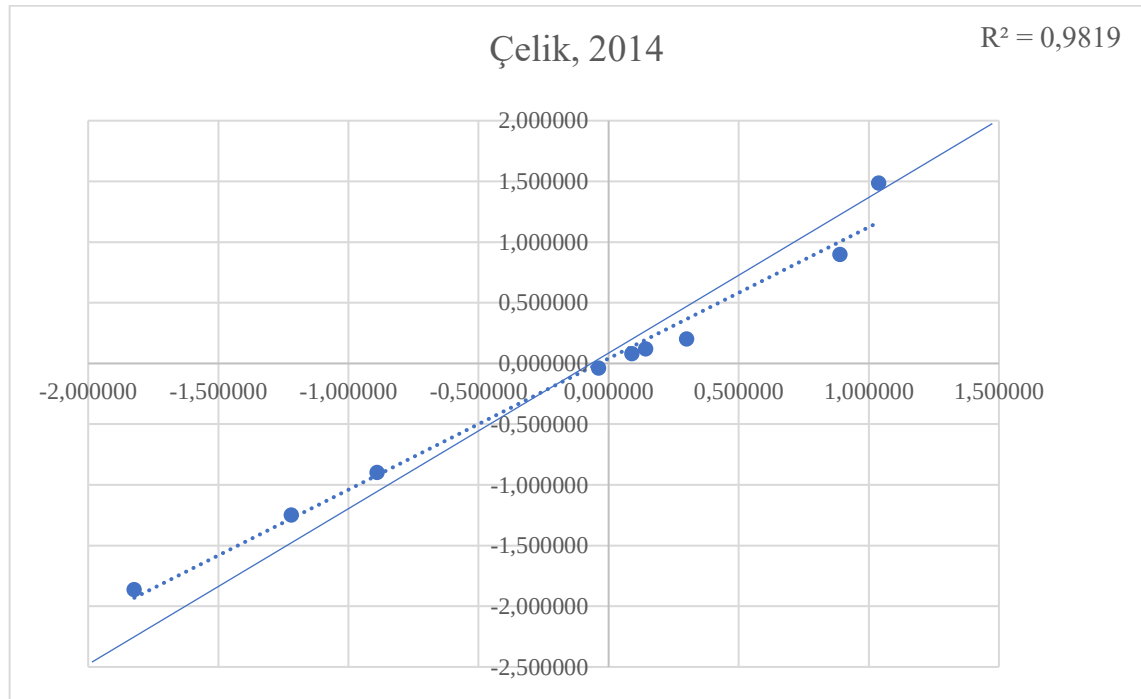


Şekil 64. X doğrultusunda oluşan minimum ve maksimum gerilmeler.

Oluşturulan doğrulama modeli ile hesaplanan gerilme ve şekil değiştirmelerin Çelik (2014) sonuçları ile karşılaştırması Tablo 10’da verilmektedir. Şekil 65’de ise regresyon analizi sonuçları verilmektedir.

Tablo 10. Tekerlek yükleri doğrulama modelinin karşılaştırılması

Yapılan Çalış.	Toplam Şekil Değiş. mm	Y Doğ. Oluşan Şekil Değiş. mm		X Doğ.Oluşan Şekil Değiş. mm		Y Doğ.Oluşan Gerilme Mpa		X Doğrultusunda Oluşan Gerilme Mpa	
		DMX	SMN	SMX	SMN	SMX	SMN	SMN	SMX
Çelik (2014)	0,8892	-0,8888	0,0903	-0,0380	0,1433	-1,2194	0,3008	-1,8227	1,0387
ANSYS Doğ. Modeli	0,8979	-0,8977	0,0805	-0,0367	0,1216	-1,2491	0,2015	-1,8635	1,4876

**Şekil 65.** Regresyon analizi sonuçları

AASHTO Metodu ile BSK Kaplama Üzeri Bağ Kurulmamış Beton Kaplama Kalınlığının Hesaplanması

ASHTO tasarım yönteminde BSK kaplamalar üzerine beton kaplama yapılması için efektif dinamik zemin reaksiyon modülünün bulunması gerekmektedir. Bunun için ise yıl boyunca tabii zeminin donmuş ve çözünmüş halleri için esneklik modülünün ölçülerek gerekli üstyapı efektif modülünün geri hesaplaması yapılarak Şekil 11 üzerinden her ay için kompozit zemin reaksiyon modülünün bulunması gerekmektedir. Eğer tabii zemin yüzeyinin altında rijit bir kaya tabakası mevcut ise Şekil 12 üzerinden bulunan kompozit zemin reaksiyon modülünün modifiye edilmesi gerekmektedir. Daha sonra her ay için tespit edilen kompozit k modülü değerinin rölatif hasar faktörü Şekil 11 yardımıyla bulunduktan sonra rölatif hasar faktörlerinin aritmetik ortalamasına ait efektif dinamik k-değeri yine Şekil 11 yardımıyla bulunur. Tablo 11'

de verildiği üzere AASHTO test yolunun altında bulunan tabii zemin için efektif dinamik k- değeri 540 pci olarak hesaplanmıştır.

Tablo 11. Rölatif hasarın tahmin edilerek efektif dinamik k- değerinin bulunması

Ay	Tabii Zemin Esneklik Modülü M_R (psi)	Üstyapı efektif modülü E_P (psi)	Şekil 10	Şekil 11	Şekil 12
			Kompozit k-değeri (pci)	Rijit Temel Üzerinde k- değeri (pci)	Rölatif Hasar U_r
Ocak	20.000	50.000	1.100	1.350	0,35
Şubat	20.000	50.000	1.100	1.350	0,35
Mart	2.500	15.000	160	230	0,86
Nisan	4.000	15.000	230	300	0,78
Mayıs	4.000	15.000	230	300	0,78
Haziran	7.000	20.000	410	540	0,60
Temmuz	7.000	20.000	410	540	0,60
Ağustos	7.000	20.000	410	540	0,60
Eylül	7.000	20.000	410	540	0,60
Ekim	7.000	20.000	410	540	0,60
Kasım	4.000	15.000	230	300	0,78
Aralık	20.000	50.000	1.100	1.350	0,35
Toplam					7,25
Ortalama Rölatif Hasar $U_r=7.25/12$			0,60		
Efektif Dinamik Tabii Zemin Reaksiyon Modülü k (pci)			540		

Yapılan sonlu eleman analizlerinde yer değiştirme miktarının daha iyi görülebilmesi için zemin hesaptan çıkarılarak temel tabakası altı ankastre mesnet olarak alınmıştır (Kayıpmaz 2019). Aynı şartların sağlanması amacıyla efektif dinamik k – değeri 1000 pci ve efektif statik k değeri de 500 pci olarak alınmıştır (PI 2020). AASHTO metoduyla C20/25 ila C50/60 beton sınıfları için hesaplanan esnek kaplama üzerine yapılacak beton kaplama kalınlıkları Tablo 12’de verilmiştir.

Tablo 12. AASHTO metoduyla C20/25 ila C50/60 beton sınıfları için hesaplanan beton kaplama kalınlıkları

Beton Sınıfı	C20/25	C25/30	C30/37	C35/45	C40/50	C45/55	C50/60
18 kip (8,2 t) Eşdeğer tek dingil yükü tekrerrür sayısı - $W_{8,2}$	3,00E+06	3,00E+06	3,00E+06	3,00E+06	3,00E+06	3,00E+06	3,00E+06
Güvenilirlik - R	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%
Standart Normal Sapma - Z_R	-1,645	-1,645	-1,645	-1,645	-1,645	-1,645	-1,645
Trafik tahmini ve performans tahmininin birleşik standart hatası - S_0	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
Nihai servis kabiliyeti indeksi - P_t	2	2	2	2	2	2	2
Başlangıç servis kabiliyeti indeksi - P_0	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5
Servis kabiliyetinde azalma miktarı - $\Delta PSI = P_0 - P_t$	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Beton kopma modülü - S_c (psi)	464	522	551	609	638	667	725
Drenaj katsayısı - C_d	1	1	1	1	1	1	1
Yük aktarma katsayısı - J	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8
Beton elastisite modülü - E_c (psi)	4,06E+06	4,35E+06	4,64E+06	4,79E+06	4,93E+06	5,22E+06	5,37E+06
Tabii zemin statik reaksiyon modülü - k (pci)	500	500	500	500	500	500	500
$\log_{10} W_{8,2}$	6,477	6,477	6,477	6,477	6,477	6,477	6,477
$\log_{10} W_{8,2}$ Formülle hesaplanan	6,477	6,477	6,477	6,477	6,477	6,477	6,477
Kaplama kalınlığı - D (inç)	10,44	9,78	9,51	8,97	8,73	8,54	8,12
Kaplama kalınlığı - D (m)	0,265	0,248	0,242	0,228	0,222	0,217	0,206

Sonlu Elemanlar Modeli

Dingil konfigürasyonları

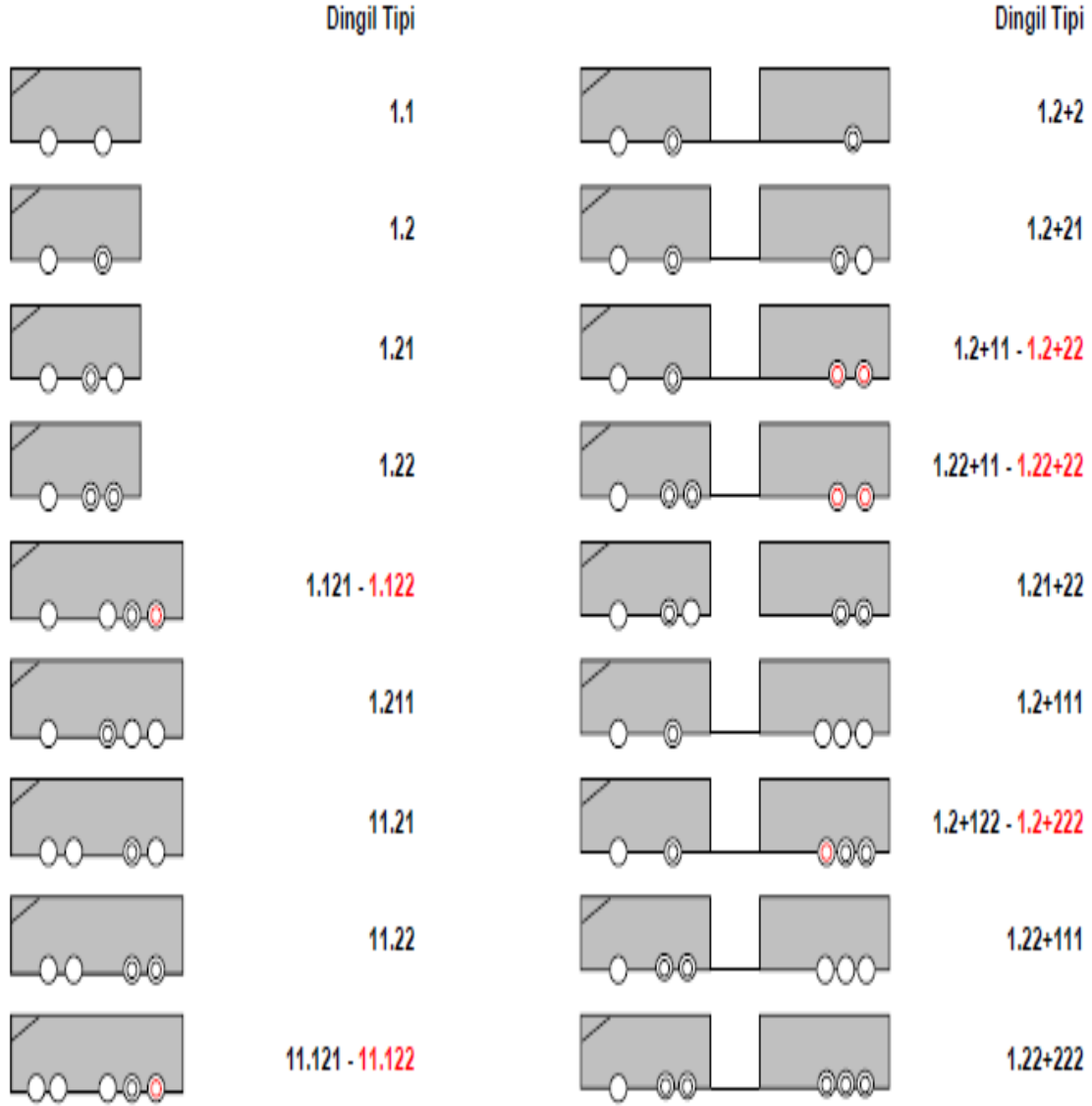
Kamyon, treyler, otobüs gibi ticari ağır taşıtların izin verilen maksimum ağırlıkları dünya genelinde değişiklik göstermektedir. İzin verilen tek dingil yükü 8.2 ila 13.3 ton arasında değişirken, tandem dingil yükü 14.8 ila 21.4 ton arasında değişmekte ve genellikle 16.3 ton olarak alınmaktadır. Birçok ülkede standart tek dingil yükü ağırlığı için 8.2 ton veya 10.2 ton kullanılmaktadır. Ülkemizde, tek dingilli taşıtlara 11.5 ton, tandem dingilli taşıtlara 16 ton ve tridem dingilli taşıtlara 24 ton yasal sınırlaması getirilmiştir.

Ülkemizde araçların yüklenmesine ilişkin Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından izin verilen dingil ağırlıkları ile toplam taşıt ağırlıkları Tablo 13’de verilmektedir. Tartı toleransı; en çok [(aracın azami ağırlığının % 3.75’i) + 500] kilogram olarak kabul edilir. Ocaklardan çıkartılmış ancak ocak içinde tartımı yapılamamış maddelerin belirlenen stok sahalarına taşınması ve tarım ürünlerin üretilmiş oldukları arazilerden stok alanlarına yapılacak taşımalarla sınırlı olmak üzere, araçların karayolu üzerinde ancak 1 kilometreye kadar seyretmesi ve hızlarının 60 km/s’den fazla olmaması koşuluyla, maksimum yüklü ağırlıkları en fazla % 15 oranında aşılabilir.

Tablo 13. Türkiye’de izin verilen azami dingil ağırlıkları ve toplam taşıt ağırlıkları

Araç ve Dingil Tipi	Yükleme Kapasitesi
Dingil ağırlığı en çok:	
Tahriksiz tek dingilde	10 ton
Tahrikli tek dingilde	11.5 ton
İki dingilli aks grubu ağırlığı en çok:	
Motorlu araçlarda aks grubu ağırlığı:	
Dingiller arası mesafe 1m’den az ise ($d < 1m$)	11.5 ton
Dingiller arası mesafe 1 m ile 1.3 m arası ise ($1 m \leq d < 1.3 m$)	16 ton
Dingiller arası mesafe 1.3 ile 1.8m arası ise ($1.3 m \leq d < 1.8 m$)	18 ton
Dingiller arası mesafe 1.3 m ile 1.8 m arası ise ($1.3 m \leq d < 1.8 m$) (Motorlu Araçlar ve Römorkları Tip Onay Yönetmeliği veya Araçların İmal, Tadil ve Montajı Hakkında Yönetmeliğinde belirtilen şartlarla)	19 ton
Römork ve yarı römorklarda aks grubu ağırlığı en çok:	
Dingiller arası mesafe 1m’den az ise ($d < 1m$)	11 ton
Dingiller arası mesafe 1 m ile 1.3 m arası ise ($1 m \leq d < 1.3 m$)	16 ton
Dingiller arası mesafe 1.3 ile 1.8m arası ise ($1.3 m \leq d < 1.8 m$)	18 ton
Dingiller arası mesafe 1.8 m veya daha büyük ise ($1.8 m \leq d$)	20 ton
Üç dingilli aks grubu ağırlığı en çok:	
Dingiller arası mesafe 1.3 m veya daha az ise ($d \leq 1.3 m$)	21 ton
Dingiller arası mesafe 1.3 m ile 1.4 m arası ise ($1.3 m < d \leq 1.4 m$)	24 ton
Toplam ağırlıklar (Değişik: RG-02/11/2000-24218):	
İki dingilli motorlu araçlar ve römorklarda	18 ton
Üç dingilli motorlu araçlarda (*Tip Onay Yönetmeliğindeki şartlarla)	25 (26*) ton
Üç dingilli yarı römorklu araçlarla mafsallı otobüslerde	28 ton
Dört dingilli motorlu araçlarda	32 ton
Dört dingilli römorklu ve yarı römorklu araçlarda	36 ton
Dört dingilli yarı römorklu araçlarda yarı römork dingil grubu:	
Dört dingilli yarı römorklu araçlarda yarı römork dingil grubu ağırlığı 20 ton olan araçlarda	38 ton
Beş veya daha çok dingilli yarı römorklu veya römorklu katarlarda	40 ton
Kombine bir taşıma faaliyeti olarak 40 ft. boyutunda ISO konteynır taşıyan:	
İki veya üç dingilli yarı römorka sahip üç dingilli motorlu araçlar	44 ton

Dünya çapında ağır taşıtlarda kullanılmakta olan dingil tipleri Şekil 66’da verilmektedir. Karayolları Genel Müdürlüğü’nün, Türkiye genelinde toplam 20.917 taşıt dikkate alınarak 109 noktada yapılan dingil ağırlığı etütlerinden elde edilen taşıt sınıflarına göre dingil dağılımı ise Tablo 14’de verilmektedir (KGM 2020).

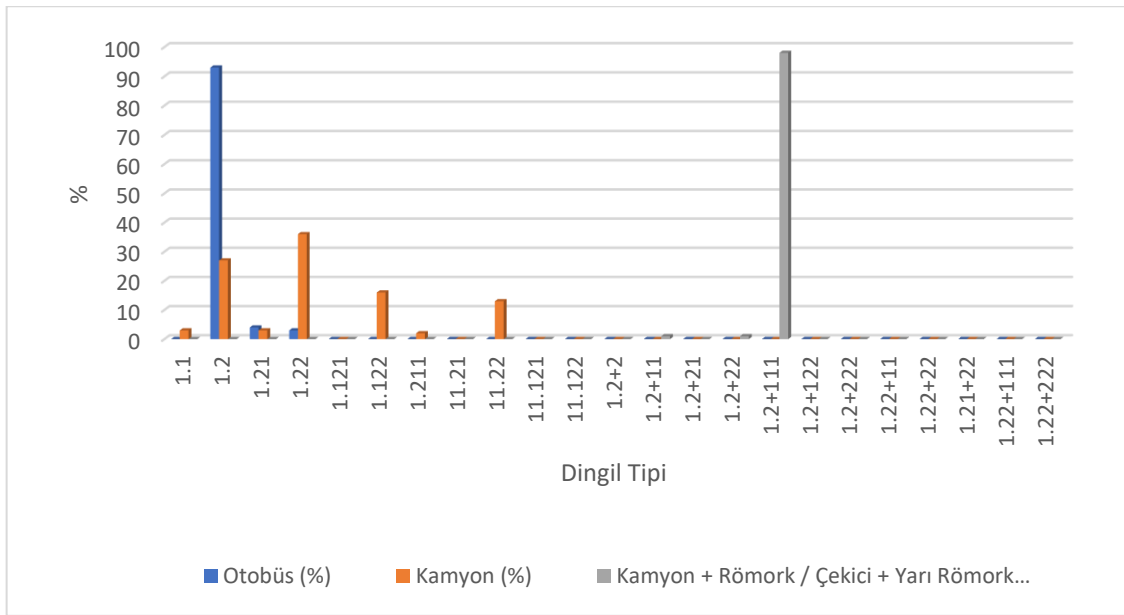


Şekil 66. Ağır taşıtlarda kullanılan dingil tipleri (KGM 2020)

Tablo 14. Taşıt sınıflarına göre dingil tipleri dağılımı (KGM 2020)

Dingil Tipi Sınıfları	Otobüs (%)	Kamyon (%)	Kamyon + Römork / Çekici + Yarı Römork (%)
1.1	0	3	0
1.2	93	27	0
1.21	4	3	0
1.22	3	36	0
1.121	0	0	0
1.122	0	16	0
1.211	0	2	0
11.21	0	0	0
11.22	0	13	0
11.121	0	0	0
11.122	0	0	0
1.2+2	0	0	0
1.2+11	0	0	1
1.2+21	0	0	0
1.2+22	0	0	1
1.2+111	0	0	98
1.2+122	0	0	0
1.2+222	0	0	0
1.22+11	0	0	0
1.22+22	0	0	0
1.21+22	0	0	0
1.22+111	0	0	0
1.22+222	0	0	0

Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından 2019 yılında yapılan ağır taşıt etütleri incelendiğinde; Şekil 67’de verildiği üzere otobüslerde % 93’lük bir oranla en çok 1.2 dingil tipinin kullanıldığı, kamyonlarda %36’lık bir oranla en çok 1.22 dingil tipinin kullanıldığı, kamyon + römork – çekici + yarı römorklarda ise % 98’lik bir oranla en çok 1.2+111 dingil tipinin kullanıldığı görülmektedir.



Şekil 67. Ağır taşıtlarda kullanılan dingil tipleri dağılım grafiği (KGM 2020)

Tablo 15 ve 16’da dingil tipi ve sayılarına göre 2010-2014 yılları arasındaki beş yıllık dönemde Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından etüde alınan taşıtlara ait ortalama boş ağırlık, ortalama taşınan yük, ortalama toplam ağırlık ve her bir dingilin ortalama ağırlık bilgileri verilmektedir (KGM 2016). Etütlerde en fazla karşılaşılan dingil tiplerinden; 1.22 dingil tipindeki 3 akslı kamyonlarda ortalama toplam ağırlık 16,4 ton ve ortalama taşınan yük 7,2 ton, 1.122 dingil tipindeki 4 akslı kamyonlarda ortalama toplam ağırlık 23,3 ton ve ortalama taşınan yük 11,6 ton ’dur. Kamyon + römork – çekici + yarı römork grubunda ise en fazla görülen 5 akslı 1.2+111 dingil tipindeki taşıtların ortalama toplam ağırlığı 29,1 ton ve ortalama taşınan yükü 14,5 ton ’dur.

Tablo 15. Kamyon dingil tiplerine göre ağırlık bilgileri (KGM 2016)

Taşıt Cinsi	Aks Sayısı	Dingil Tipi	Taşıt Sayısı	Ort.Boş. Ağır.(ton)	Ort.Taş.Yük (ton)	Ort. Top. Ağır. (ton)	Ortalama Ağırlık (ton)							Toplam
							1.Dingil	2.Dingil	3.Dingil	4.Dingil	5.Dingil	6.Dingil	7.Dingil	
Kamyon	2	1.1	462	2,1	0,9	3	1,4	1,6	-	-	-	-	-	3
		1.2	6.572	4	2,4	6,3	2,6	3,7	-	-	-	-	-	6,3
	3	1.21	851	6,9	4,6	11,4	3,7	5,6	2,1	-	-	-	-	11,4
		1.22	18.152	9,2	7,2	16,4	4,9	7,1	4,3	-	-	-	-	16,3
		11.21	13	11,4	9,7	21	5,6	4,4	7,4	3,5	-	-	-	20,9
		11.22	3.770	11,9	12,3	24,2	5,5	5	8,1	5,6	-	-	-	24,2
	4	1.121	66	11,3	9,7	21	5,5	3,1	8	4,3	-	-	-	20,9
		1.122	7.745	11,7	11,6	23,3	5,7	3,8	8,5	5,3	-	-	-	23,3
	5	1.211	26	11,7	10	21,7	5,9	4,7	6,6	4,5	-	-	-	21,7
		11.121	13	13,9	12,8	26,7	6	6,8	3,7	5,3	4,9	-	-	26,7
		11.122	34	13	14,7	27,7	5,7	5,7	4,2	7,2	4,8	-	-	27,6
	6 ve üzeri	Diğerleri	1	15	4,1	19,1	4,9	7,1	-	3,8	3,2	-	-	19
Toplam			37705	8,9	7,7	16,6	4,7	5,5	4,7	1,7	0,0	0,0	0,0	16,5

Tablo 16. Kamyon + römork – çekici + yarı römork dingil tiplerine göre ağırlık bilgileri (KGM 2016)

Taşıt Cinsi	Aks Sayısı	Dingil Tipi	Taşıt Sayısı	Ort. Boş. Ağır. (ton)	Ort. Taş. Yük (ton)	Ort. Top. Ağır (ton)	Ortalama Ağırlık (ton)							Toplam
							1.Dingi	2.Dingi	3.Dingi	4.Dingi	5.Dingi	6.Dingi	7.Dingi	
Kamyon + Römork - Çekici + Yarı Römork	3	1.2+2	36	11,1	5,3	16,3	4,9	5,8	5,4	-	-	-	-	16,3
		1.2+11	30	14,1	7,7	21,8	5,6	6,6	5,0	4,7	-	-	-	21,8
	4	1.2+21	1	12,5	1,0	13,5	3,6	3,4	3,5	3,0	-	-	-	13,5
		1.2+22	368	14,5	9,8	24,4	5,5	7,4	5,8	5,5	-	-	-	24,4
		1.21+22	124	15,1	11,5	26,7	5,5	7,5	3,9	5,0	4,8	-	-	26,7
		1.22+11	47	14,6	7,9	22,5	4,8	7,0	3,0	3,9	3,8	-	-	22,5
	5	1.22+22	197	14,9	9,5	24,4	5,1	6,4	4,3	4,4	4,2	-	-	24,4
		1.2+111	28.356	14,5	14,5	29,1	6,1	8,0	4,4	5,3	5,3	-	-	29,1
		1.2+122	74	14,5	13,9	28,4	5,9	7,6	3,9	5,8	5,2	-	-	28,4
		1.2+222	170	15,1	14,1	29,2	5,8	7,5	4,8	5,6	5,4	-	-	29,2
	6	1.22+111	55	14,8	12,8	27,5	5,9	7,1	3,7	4,5	4,6	1,9	-	27,5
		1.22+222	28	15,8	16,3	32,1	5,9	6,6	5,6	5,2	4,9	4,7	-	32,1
	7 ve üzeri	Diğerleri	14	16,5	12,5	29,0	5,6	6,4	6,2	4,7	3,0	2,1	1,4	29,0
Toplam			29500	14,6	14,4	28,9	6,1	8	4,5	5,3	5,2			28,9

Taşıt sınıflarına göre dingil tipleri dağılımı incelendiğinde kamyonlarda sırasıyla % 36, % 27 ve % 16'lık oranlarla en çok 3 dingilli (1.22), 2 dingilli (1.2) ve 4 dingilli (1.122) kamyonların, kamyon + römork – çekici + yarı römorklarda ise % 98'lik bir oranla en çok 5 dingilli (1.2+111) kamyon çekici + yarı römorkların yollarda seyrettiği görülmektedir. Bu nedenle sonlu eleman analizlerinde belirtilen dingil tipleri kullanılmıştır. Dingil tiplerine göre ağırlık verileri incelendiğinde ise ortalama ağır taşıt toplam ağırlıklarının Tablo 17'de verildiği üzere yasal toplam ağırlık sınırlarının çok altında olduğu görülmektedir. Etütlerden elde edilen verilerin ortalama değer olması, yani bazı kamyonların yasal ağırlık sınırlarında seyrederken bazı kamyonların ise yüksüz veya az bir yükse seyretmeleri, nedeniyle sonlu elemanlar analizleri yapılırken Türkiye'de yürürlükte olan yasal toplam ağırlıklar kullanılmıştır. Ancak kamyon ve kamyon çekicilerin ön aksları için yasal yükleme sınırı olan 11.5 ton yerine teknik olarak yüklenebilecek değer olan 8.2 ton kullanılmıştır.

Tablo 17. Modellemede kullanılan tam konfigürasyon yüklemesi için dingil tipleri

Taşıt Cinsi	%	Dingil Tipi	Dingil Yeri	Lastik Tipi	KGM Ort. Dingil Ağırlığı (ton)	KGM Ort. Top. Ağırlık (ton)	Yasal Maks. Top. Ağırlık (ton)	Yasal Maks. Uzunluk (m)
	27	1.2	1. Dingil	Tek	2,6	6,3	18	≤ 12,0
			2. Dingil	Dual	3,7			
	36	1.22	1. Dingil	Tek	4,9	16,3	25	≤ 12,0
			2. Dingil	Dual	7,1			
			3. Dingil	Dual	4,3			
	16	1.122	1. Dingil	Tek	5,7	23,3	32	≤ 12,0
			2. Dingil	Tek ≥ 375mm	3,8			
			3. Dingil	Dual	8,5			
			4. Dingil	Dual	5,3			
	98	1.2+111	1. Dingil	Tek	6,1	29,1	40	≤ 16,5
			2. Dingil	Dual	8			
			3. Dingil	Tek ≥ 375mm	4,4			
			4. Dingil	Tek ≥ 375mm	5,3			
			5. Dingil	Tek ≥ 375mm	5,3			

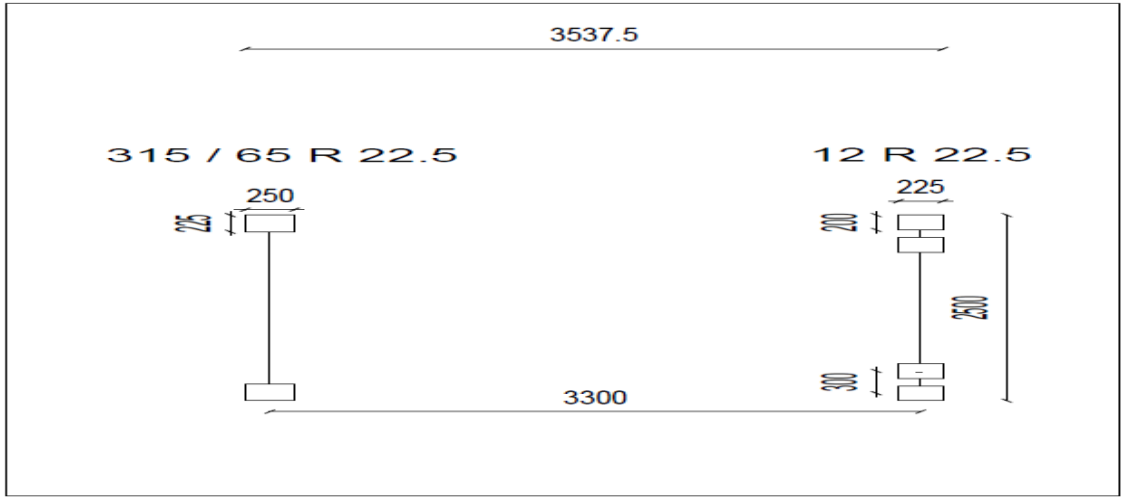
AASHTO gibi üst yapı tasarım yöntemleri, yol testi sonuçları ile standart dingil yükü tekerrür sayısının kaplamanın performansına etkisi dikkate alınarak geliştirilmiştir. Daha önce yapılmış literatür çalışmalarında sonlu elemanlar analiziyle modellenen BSK kaplama ve rijit kaplama modellerinde ise yüklemeler tek dingil, tandem dingil veya da tridem dingil olarak yapılmıştır. Ancak bu durum karayolunda gerçekte olan yükleme durumunu tam olarak

yansıtmamaktadır. Bu nedenle yapılan bu çalışmada tam konfigürasyon dingil yüklemesi gerçekleştirilmiştir. Tablo 18’de dünya genelinde ve ülkemiz karayollarında seyretmekte olan çeşitli ticari markaların kamyon ve kamyon çekicileri için dingil açıklıkları verilmektedir. Trafikte seyretmekte olan aracın hangi markaya ait olduğu ve hangi dingil açıklıklarında olduğunun bilinmemesi nedeniyle yapılan bu çalışmada dingil açıklıkları için araç markaları arasından araç dingil sayılarına göre kritik yükleme açısından en kısa dingil açıklıkları alınarak modellerler yapılmıştır.

Tablo 18. Çeşitli ticari markalarda kullanılan dingil açıklıkları

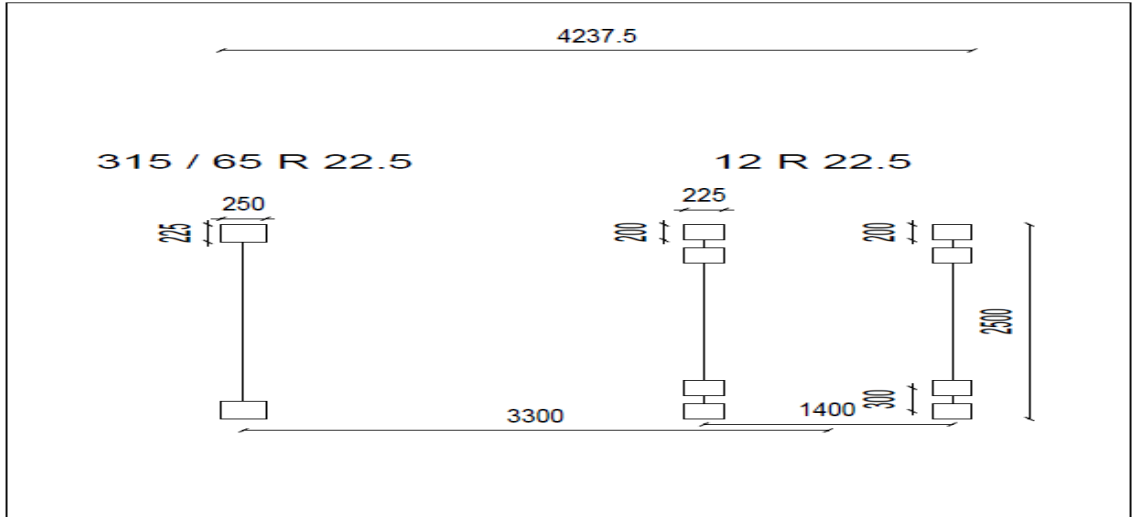
Taşıt Cinsi	Dingil Tipi	Dingil Açıklığı (mm)					
		Mercedes (Arahık 300mm)	Ford	Man	Volvo (Arahık 300mm)	Daf	Renault
 2 Dingilli Kamyon	1.2	3300 ila 6600	4750 - 5500	3900 ila 5100	3400 ila 6700	3450 ila 7300	3400 ila 6700
 3 Dingilli Kamyon	1.22	3600 ila 5700	4460 - 5410	3300 ila 5100	3885 ila 6685	4500 ila 6600	3500 ila 6000
 4 Dingilli Kamyon	1.122	3600 ila 5700	5100 - 5200 - 5900	3600 ila 5700	4300 ila 5885	4700 - 5300	4300 ila 6400
 5 Dingilli Yarı Römork	1.2+111	3300 - 3600 - 3900	3600	3600 - 3900	3500 - 3600 - 3700 - 3800	3600 - 3800	3500 - 3700- 3800 - 3900

Sonlu eleman analizlerinde 1.2 dingil tipine haiz olan 2 dingilli kamyonlar için modellenen yükleme durumu Şekil 68’de verilmiştir. Ölçüler mm olarak verilmiştir.



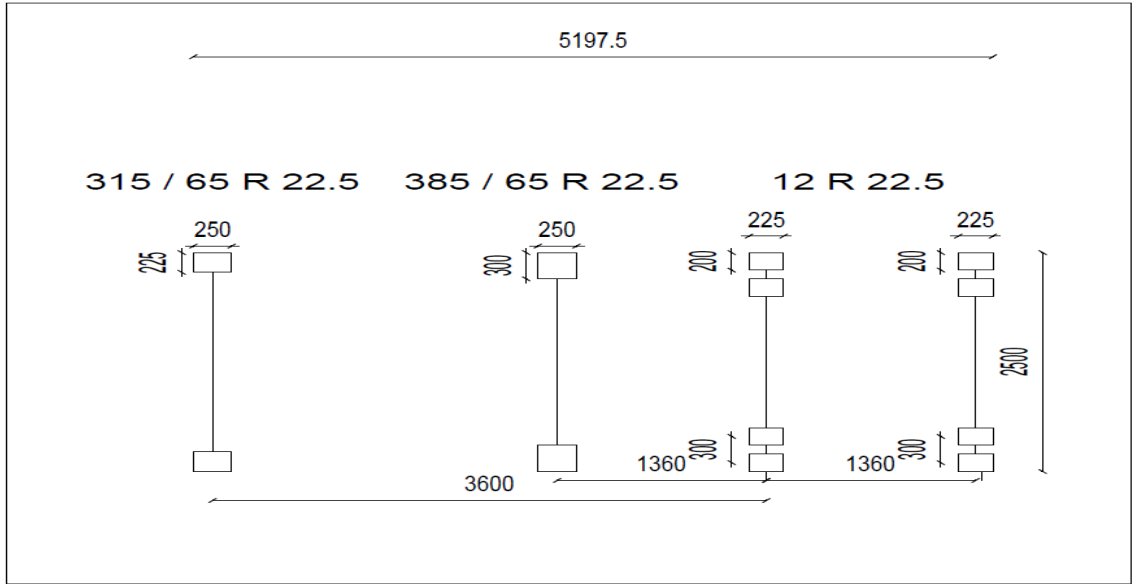
Şekil 68. 2 dingilli kamyonlar için yükleme durumu

1.22 dingil tipine haiz olan 3 dingilli kamyonlar için modellenen yükleme durumu Şekil 69’da verilmiştir. Ölçüler mm olarak verilmiştir.



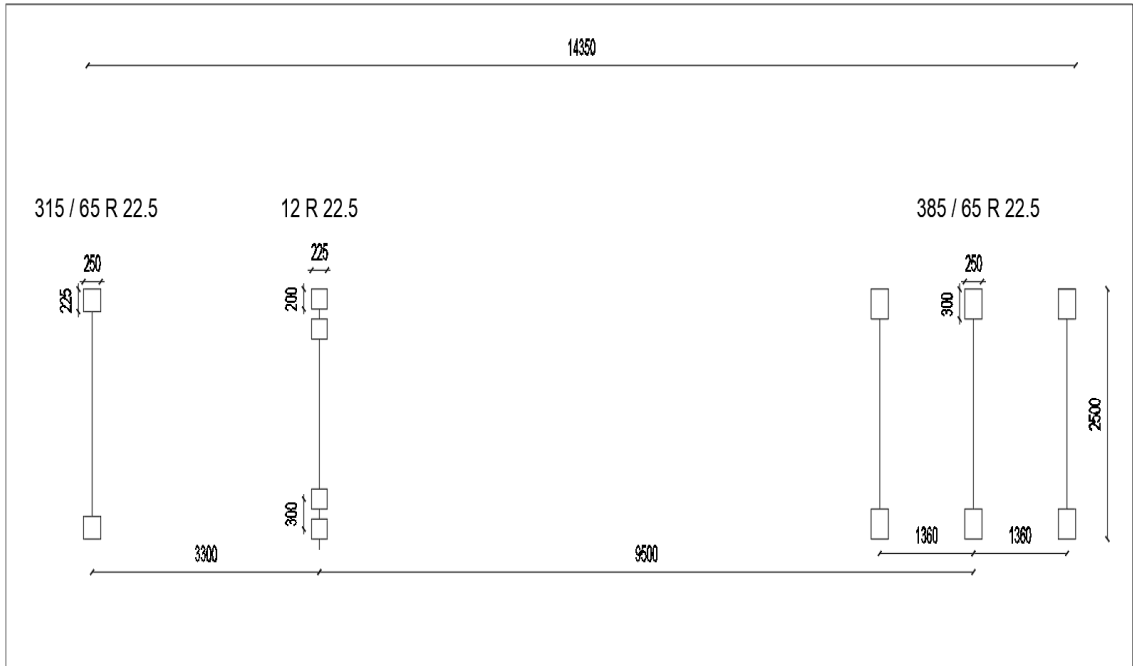
Şekil 69. 3 dingilli kamyonlar için yükleme durumu

1.122 dingil tipine haiz olan 4 dingilli kamyonlar için modellenen yükleme durumu Şekil 70’de verilmiştir. Ölçüler mm olarak verilmiştir.



Şekil 70. 4 dingilli kamyonlar için yükleme durumu

1.2+111 dingil tipine haiz olan 5 dingilli kamyonlar için modellenen yükleme durumu Şekil 71’de verilmiştir. Ölçüler mm olarak verilmiştir.



Şekil 71. 5 dingilli kamyonlar için yükleme durumu

Lastik temas alanları ve şişme basıncı

Michelin Türkiye geneli satış verilerinden elde edilen ticari ağır taşıtlarda en çok kullanılmakta olan lastik ebat ve sınıfları Tablo 19’da verilmektedir (Özcanan ve Akpınar 2014). Bu veriler doğrultusunda tam konfigürasyon sonlu elemanlar modellemesi için rijit kamyonlarda ön tekerlekler için 315 / 80 R 22.5 sınıfı, arka dual tekerlekler için ise 12 R 22.5 sınıfı lastikler kullanılmıştır. Çekici kamyon + yarı römorklarda 315 / 80 R 22.5 sınıfı, dual

tekerlekler için 12 R 22.5 sınıfı, yarı römorkta bulunan tek tekerlekler için ise 385 / 65 R 22.5 sınıfı lastikler kullanılmıştır.

Tablo 19. Türkiye’de kullanılmakta olan lastik sınıfları ve oranları (Özcanan ve Akpınar 2014)

Ebatlar	Kullanım Oranı (%)	Tavsiye Edilen Kullanım Yeri
12 R 22.5	31,0	Kamyon ve Otobüslerde Tüm Dingiller
315 / 80 R 22.5	27,0	Kamyon ve Otobüslerde Tüm Dingiller
215 / 75 R 17.5	8,4	Kamyonet ve Minibüs Dingilleri
295 / 80 R 22.5	8,1	Kamyon ve Otobüslerde Tüm Dingiller
385 / 65 R 22.5	6,5	Treylerde Arka Üç Dingiller

Yapılan bu çalışmada bütün tekerleklerin şişme basıncı, ortalama tekerlek şişme basıncı değeri olan 700 kPa olarak ele alınmıştır (Korkiala-Tanttu 2009). Sonlu elemanlar modelinde kullanılacak tekerlek temas alanları için, Korkiala-Tanttu (2009) tarafından hızlandırılmış yol testleri ve laboratuvar çalışmaları ile elde edilmiş farklı tekerlek yükleri ve tekerlek basınçları altında dual tekerlekler ve geniş tipte tek tekerlekler için oluşan temas alanları verilerden yararlanılarak bulunan alanlar kullanılmıştır (Özcanan ve Akpınar 2014). Tam konfigürasyon modellemede kullanılan temas alanları ve kullanıldığı akslar Tablo 20’de verilmektedir.

Tablo 20. Modellenen teker sınıfları ve temas alanları

Tekerlek Sınıfı	Tekerlek Yüğü (kg)	Tekerlek Şişme Basıncı (kPa)	Tekerlek Temas Alanı Uzunluk (mm) X Genişlik (mm)	Kullanım Yeri
315 / 80 R 22.5	4100	700	250 x 225	Kamyon ve Çekici Kamyonlarda Ön Tekerler
385 / 65 R 22.5	4100	700	250 x 300	Yarı Römorklarda Bulunan Tekerler
12 R 22.5	4100	700	225 x 200 + 225 x 200	Dual Tekerler

Üstyapı tabaka kalınlıkları ve malzeme özellikleri

Malzemenin uygulanan bir yük karşısında hasara uğrayıp uğramayacağı akma ve kırılma kriterleri kullanılarak belirlenmektedir. Uygulanan bir kuvvet karşısında malzeme ya akarak yani uzayarak veya doğrudan kırılarak deforme olmaktadır. Sünek malzemeler kopmadan önce uzarlarken gevrek malzemeler uzamadan aniden kırılırlar. Sünek malzemelerin akma kriterleri olarak Von-Mises gerilmesi kullanılmaktadır. Üç eksenli gerilme halinde birim hacime düşen maksimum şekil değiştirme enerjisinin kopma mukavemetini aşması halinde kopma meydana gelir. Gevrek malzemelerin akma kriterleri olarak Maksimum Asal Gerilme kullanılmaktadır. En büyük asal gerilme malzemenin akma veya kopma mukavemetine eşit

olduğunda, malzemede akma veya kopma meydana gelmektedir (Ovalı ve Esen 2017). Shoukry et al. (2007), maksimum asal gerilmenin, özellikle sıcaklık ve dingil yüklerinin birleşik etkileri dikkate alındığında, kaplamadaki genel gerilme durumunun daha iyi bir göstergesi olduğu sonucuna varmıştır. Bu nedenle yapılan sonlu eleman analizlerinde beton plak altındaki çekme gerilmelerini değerlendirmek amacıyla maksimum asal gerilmeler kullanılmıştır.

BSK kaplamalar üzerine yapılan bağ kurulmuş veya bağ kurulmamış beton kaplama uygulamaları dünya genelinde hızla artmakta iken ülkemizde henüz uygulanmamaktadır. Yapısal olarak sağlam ancak pürüzsüzlük, sürtünme ve gürültü gibi yüzey sorunlarına haiz iyi veya orta durumdaki bir BSK kaplamanın üzerine yapısal kapasitenin artırılması ve yüzey sorunlarının giderilmesi amacıyla bağ kurulmuş olarak tasarlanan beton kaplama yapılması bugünkü şartlar altında ülkemizde gerçekleşmeyecektir. Bu nedenle yapılan sonlu eleman analizlerinde kırsal yollar esas alınarak, BSK kaplama durumu için kötü durum (önemli yüzey bozulmaları, agrega sıyrılmaları, termal genleşme ve yapısal sıkıntılar) yani bağ kurulmamış tasarım şekli kullanılmıştır.

Sonlu elemanlar modeli üstten aşağı doğru sırasıyla beton kaplama, BSK kaplama ve temel tabakalarından oluşturulmuştur. Hacimler arasında temas yüzeyleri oluşturulurken bağ kurulmamış durumun yansıtılabilmesi amacıyla BSK kaplama ile beton kaplama arasındaki temas durumu standart, tabakalar arası sürtünme katsayısı ise sıfır olarak alınmıştır (Sultana 2010; Diallo 2019). BSK kaplama ile temel tabakası arasındaki sürtünme katsayısı ise 0,55 olarak alınmıştır (STRUCT 2020). Beton kaplamanın kendi ağırlığıyla yüklenebilmesi ve sıcaklık farkları etkisinde eğilme hareketini yapabilmesi amacıyla yerçekimi ivmesi $9,81 \text{ m/s}^2$ olarak modele atanmıştır.

Rijit kaplama beton sınıfı olarak C40/50, C45/55 ve C50/60 kullanılmıştır. Elastisite modülleri sırasıyla 34000 MPa, 36000 MPa ve 37000 MPa olarak ele alınmıştır. Beton kopma modülleri ise sırasıyla 4,4 MPa, 4,6 MPa ve 5 MPa olarak alınmıştır (Ersoy ve Özcebe 2001). Beton kaplamanın birim hacim ağırlığı 2400 kg / m^3 , poisson oranı ise 0,2 olarak alınmıştır.

Yapısal analiz için gerekli girdilerden biri, mevcut BSK kaplamanın elastik modülüdür. Düşen Ağırlık Testi (FWD) ile BSK tabakasının sertliği karakterize edilebilmektedir, ancak test sırasındaki sıcaklık durumu yapılacak geri hesaplamaların değerlerini tamamıyla etkileyecektir. Çünkü, BSK kaplama malzemesinin elastisite modülü yıl boyunca önemli ölçüde değişebilmektedir. Bu nedenle, ortalama bir değer kullanılmalıdır.

Kötü durumdaki (ciddi yorulma çatlakları) eski bir BSK kaplama için elastisite modülünün yaklaşık 690 MPa, orta durumdaki (bazı yapısal sıkıntılar) bir BSK kaplama için yaklaşık 2413 MPa ve iyi durumdaki (yalnızca frezeleme ile çoğunlukla ortadan kaldırılabilen

tekerlek izi, yığılma gibi yüzeysel sıkıntılar) bir BSK kaplama için yaklaşık 4136 MPa alınması önerilmektedir (Roesler et al. 2008; ACPA 2020). Yapılan çalışmada mevcut asfalt tabakasının elastisite modülü 690, 1379 ve 2068 MPa, birim hacim ağırlığı 2400 kg / m³ ve poisson oranı ise 0,3 olarak alınmıştır.

AASHTO'ya göre tabii zemin esneklik modülleri 20 ila 275 MPa (3.000 ila 40.000 Psi) arasında değişmektedir. Test yolu altında bulunan tabii zemin esneklik modülü (M_R) 20 MPa (3.000 psi) dır. Test yolu üzerinde yapılan çalışmalardan üretilmiş olan ampirik formüller bu esneklik modülü baz alınarak hazırlanmıştır. Bu nedenle yapılan çalışmada tabii zemin esneklik modülü (M_R) 20 MPa olarak alınmıştır. AASHTO'ya göre granüler malzeme elastisite modülü 103 ila 310 MPa (15.000 ila 45.000 psi) arasında değişmektedir. En kötü durumun yansıtılması amacıyla yapılan bu çalışmada BSK kaplamanın altındaki temel tabakası için elastisite modülü 103 MPa, birim hacim ağırlığı 2100 kg/m³ ve poisson oranı ise 0,3 olarak alınmıştır.

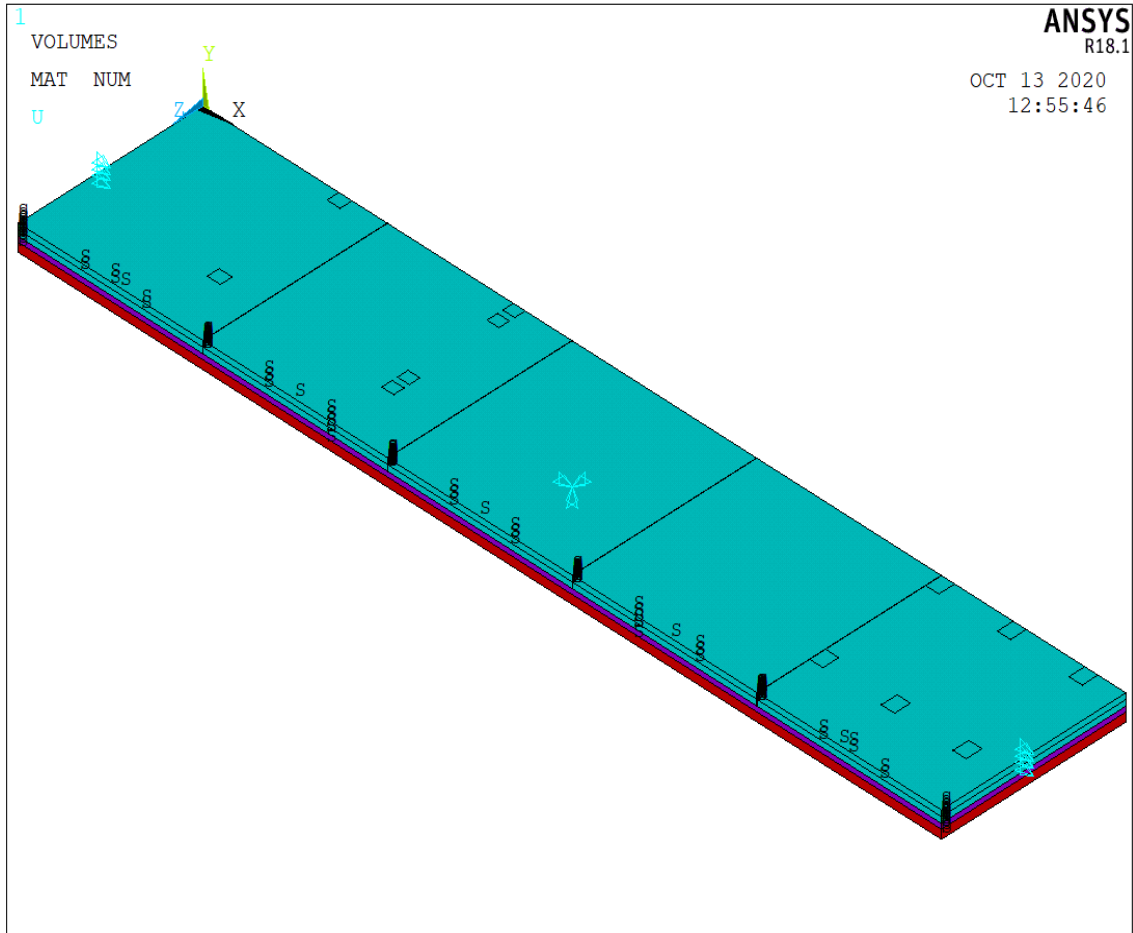
Karayolları Genel Müdürlüğü, Esnek Üstyapı Projelendirme Rehberi'nde eşdeğer tek dingil yükü tekerrür sayısının 3 milyonun altında olduğu yollar, düşük hacimli yollar olarak tanımlanmaktadır. AASHTO yönteminde ise düşük hacimli yollar için 1 milyon eşdeğer tek dingil yüküne (ETDY) kadar rijit plak kalınlıkları verilmektedir. Kötü durumun yansıtılması amacıyla yapılan çalışmada eşdeğer tek dingil yükü tekerrür sayısı 3.000.000 olarak alınmıştır.

AASHTO eşdeğer tek dingil yükü tekerrür sayısına göre minimum BSK ve temel tabakası kalınlıklarını Tablo 21'de gösterildiği gibi vermektedir. Yapılan çalışmada BSK tabakası kalınlığı 87,5 mm ve temel tabakası kalınlığı 150 mm olarak alınmıştır. Beton kaplama kalınlıkları ise 100 mm, 150 mm ve 200 mm olarak alınmıştır. Enine derz aralıkları 3,5mt, 5mt ve 7mt olarak alınmıştır. Enine derz derinliği, plak kalınlığının dörtte biri, derz genişliği ise 6 mm olarak alınmıştır.

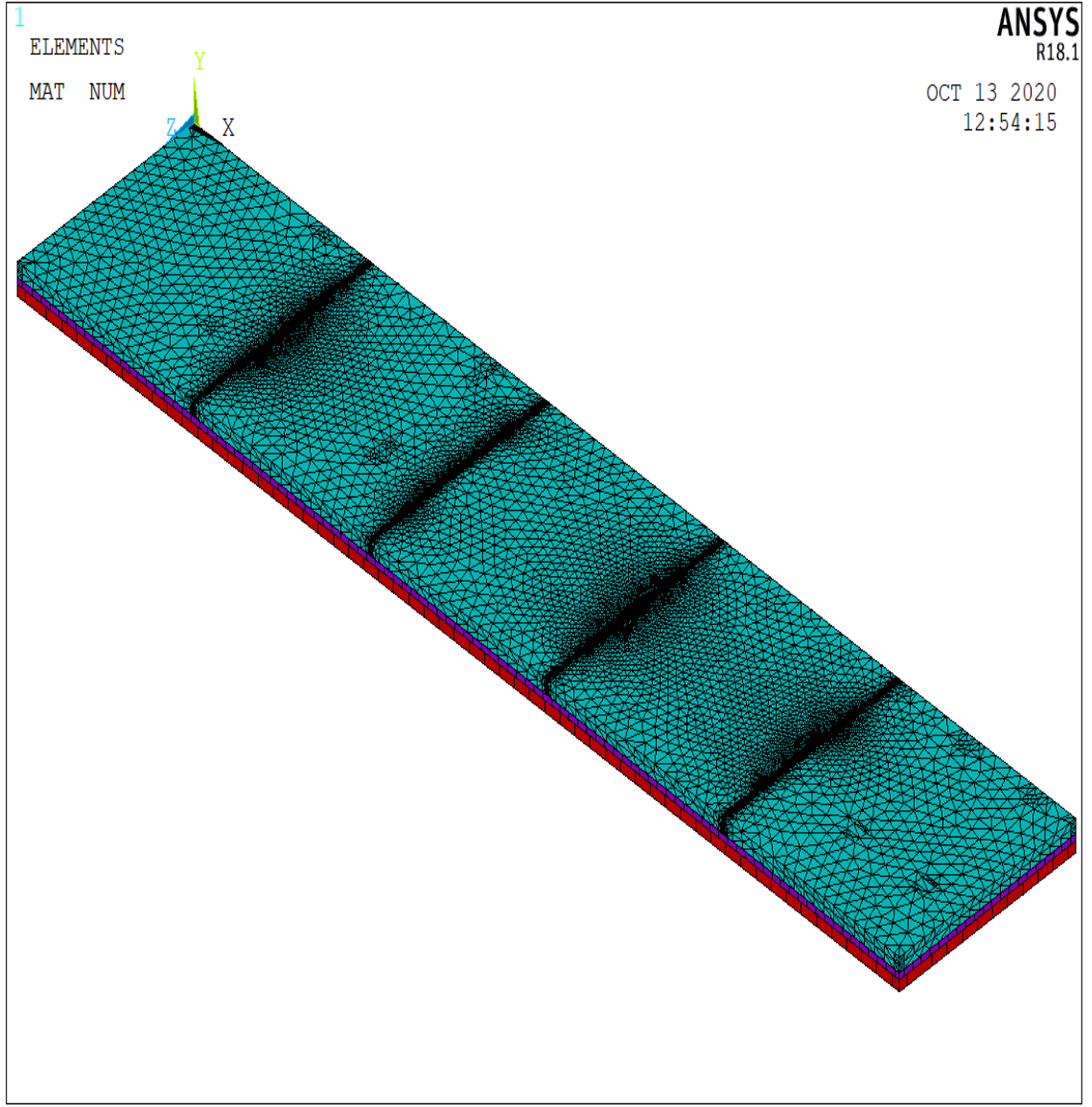
Tablo 21. AASHTO minimum BSK ve temel tabakaları kalınlıkları

Minimum Kalınlıklar (mm)		
Trafik Eşdeğer tek dingil yükü sayısı	BSK Kaplama	Temel Tabakası
50.000'den az	25	100
50.001-150.000	50	100
150.001-500.000	62,5	100
500.001-2.000.000	75	150
2.000.001-7.000.000	87,5	150
7.000.000'den fazla	100	150

Rijit kaplama element tipi olarak Solid65 kullanılmıştır. BSK ve temel tabakası element tipi olarak granüler malzemeyi yansıtan Solid186 kullanılmıştır. Sınır şartları olarak yer değiştirme miktarının daha iyi görülebilmesi için zemin hesaptan çıkarılarak temel tabakası altı ankastre mesnet alınarak modelin alt kısmında bütün serbestlikler kısıtlanmıştır (Kayıpmaz 2019). Modelin sağ tarafına herhangi bir kısıtlama uygulanmazken sol tarafına ise simetri kısıtlamaları uygulanmıştır. Modelin kısa kenarları ise enine derz durumunu yansıtabilmek amacıyla sadece X yönünde (boyuna) kısıtlanmıştır. Şekil 72’de sınır şartları verilmektedir. Şekil 73’de verildiği üzere deneme çalışmaları yapılarak ve smart size seçeneği kullanılarak modelin ağ sıklığı (mesh size) belirlenmiştir.

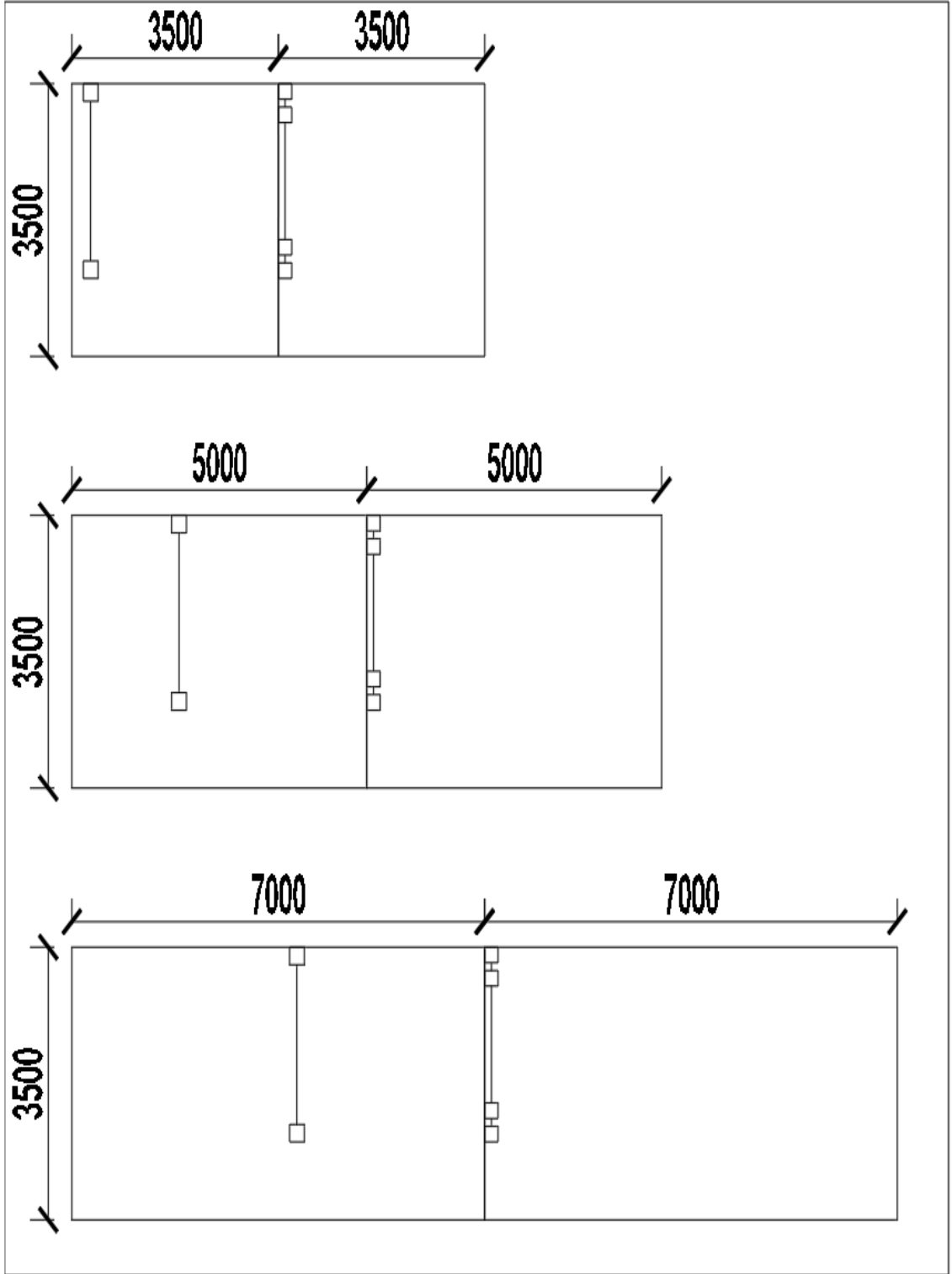


Şekil 72. Model sınır şartları



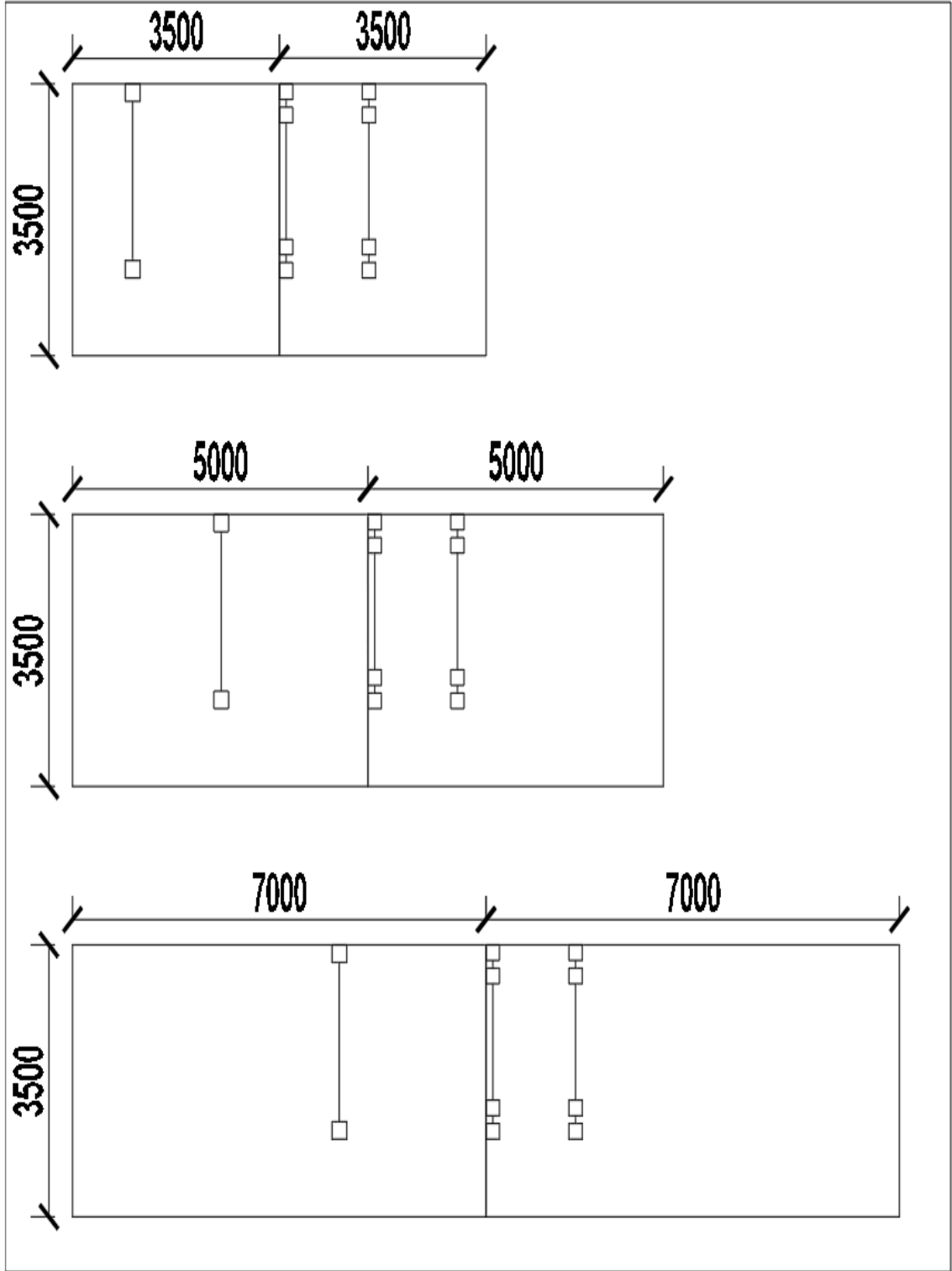
Şekil 73. Model ağ şekli

1.2 dingil tipine haiz olan 2 dingilli kamyonlar için modellenen plak boyutları Şekil 74’de verilmiştir. Ölçüler mm olarak verilmiştir.



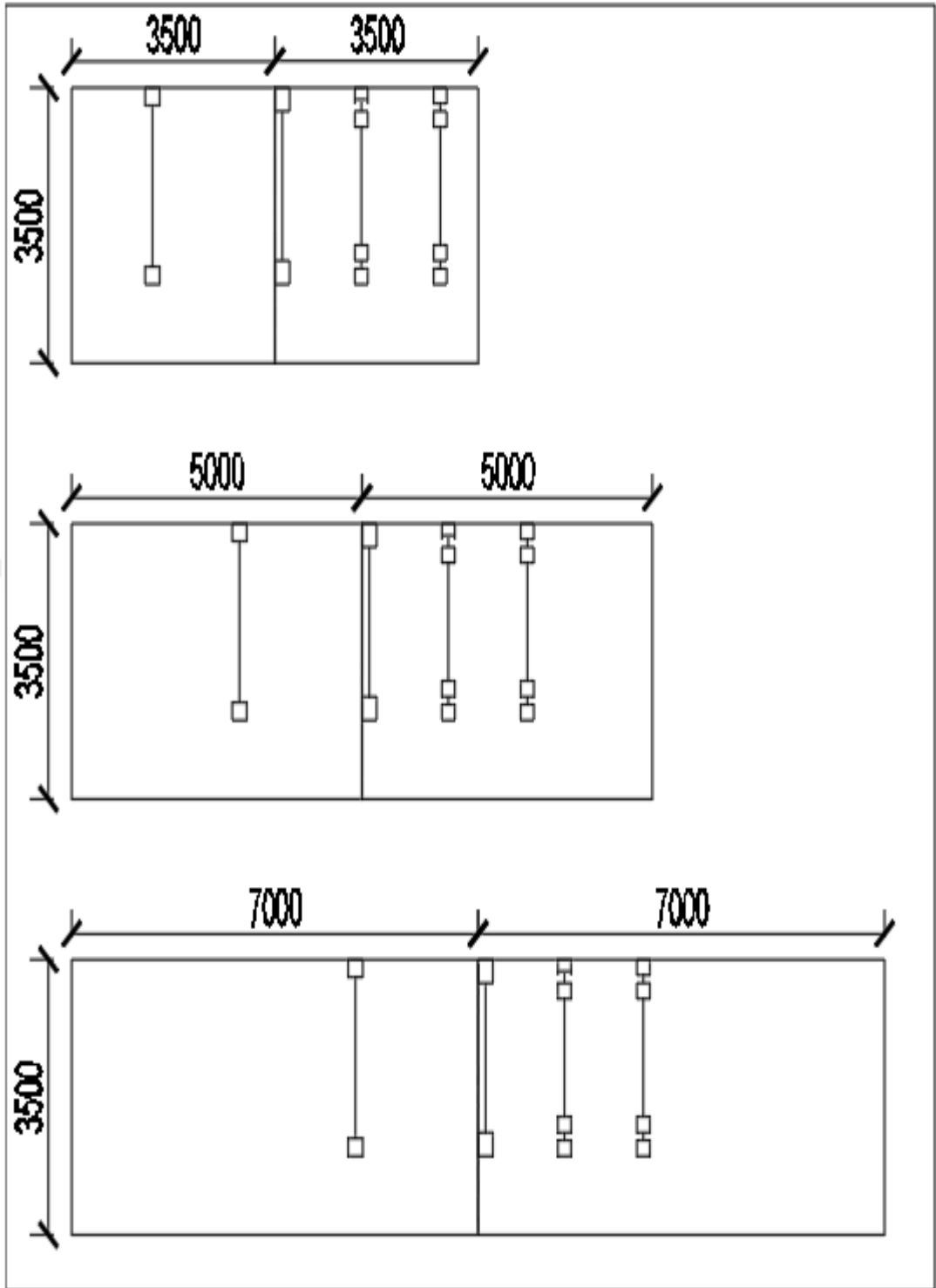
Şekil 74. 2 Dingilli kamyonlar için modellenen plak boyutları

1.22 dingil tipine haiz olan 3 dingilli kamyonlar için modellenen plak boyutları Şekil 75’de verilmiştir. Ölçüler mm olarak verilmiştir.



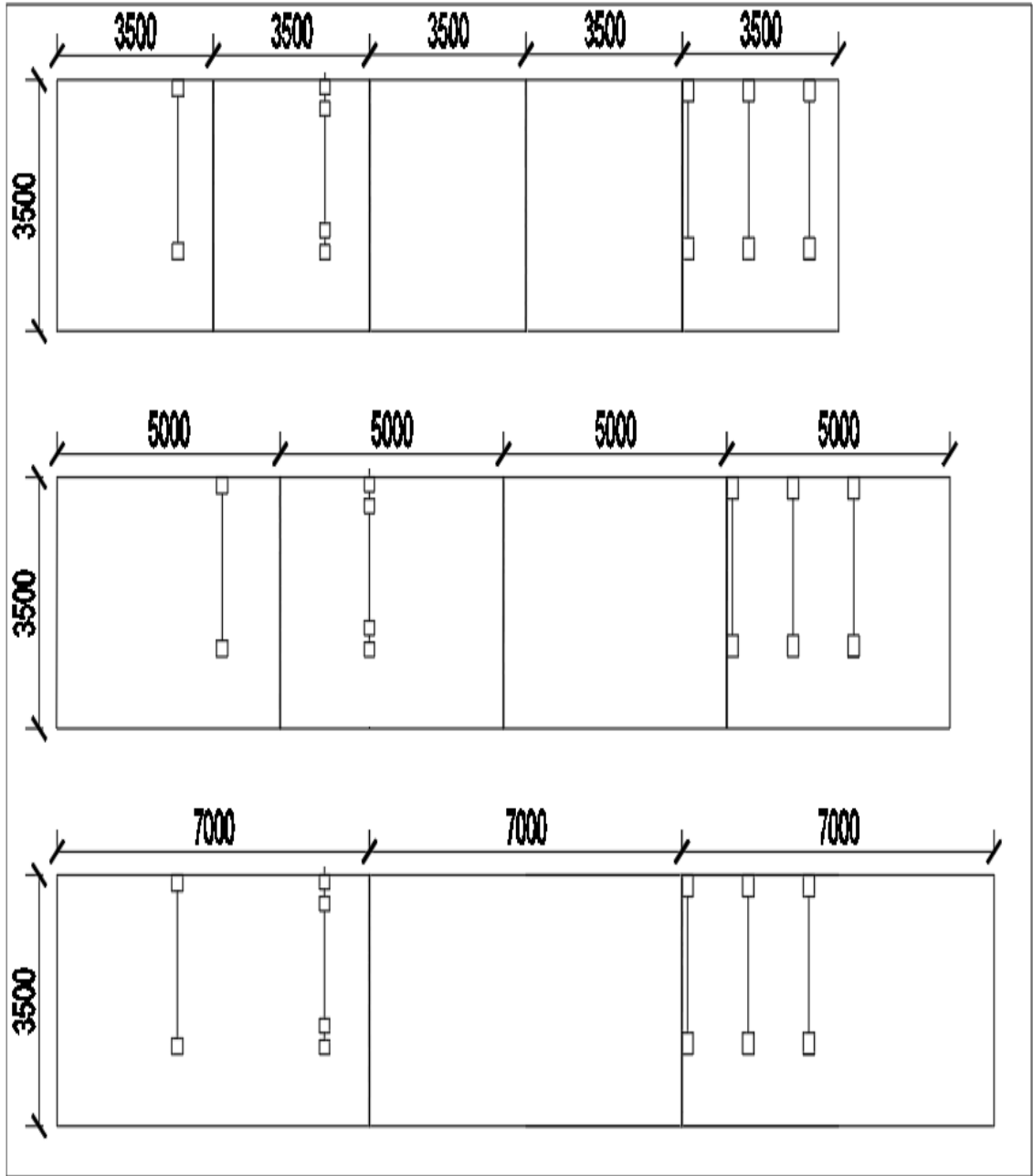
Şekil 75. 3 Dingilli kamyonlar için modellenen plak boyutları

1.122 dingil tipine haiz olan 4 dingilli kamyonlar için modellenen plak boyutları Şekil 76'da verilmiştir. Ölçüler mm olarak verilmiştir.



Şekil 76. 4 Dingilli kamyonlar için modellenen plak boyutları

1.2+111 dingil tipine haiz olan 5 dingilli kamyonlar için modellenen plak boyutları Şekil 77’de verilmiştir. Ölçüler mm olarak verilmiştir.



Şekil 77. 5 Dingilli kamyonlar için modellenen plak boyutları

Taguchi Metodu

Geleneksel deney tasarımlarında, bir değişken değiştirilirken geri kalan bütün değişkenler sabit tutulmaktadır. Deney tasarımında değişkenler ve seviyelerin artmasıyla birlikte yapılacak olan deney sayıları da artmaktadır. Bu nedenle böyle bir tasarımın pratikte uygulanması pek mümkün olmamaktadır. Ayrıca, değişkenler arasında iç etkileşimlerin oluşması durumunda, geleneksel deney tasarımlarına göre elde edilen optimum şartlar, gerçekte optimum şartlara karşılık gelmeyebilir. Deney tasarım yöntemlerinden biri olan Taguchi Metodunda sistematik dizaynlarda optimizasyon, başarılı şekilde yapılabilmektedir (Bayrak 2007).

Taguchi metodu yüksek kalite sistemlerinin tasarımında kullanılabilen iyi bir yöntemdir (Roy 1990). Bu yöntem performans ve kalite tasarımlarının optimizasyonunda sistematik bir yaklaşım sağlamaktadır. Bu yöntemin kullanılmasıyla yapılan optimizasyonlar, aşağıda sıralanan 8 adımda gerçekleştirilir.

1. Değerlendirilecek parametrelerin belirlenmesi
2. Bu parametrelere ait seviyelerin ve mümkün olan iç etkileşimlerin belirlenmesi
3. Uygun ortogonal dizisinin belirlenmesi
4. Ortogonal diziye dayanarak deney sonuçlarının metoda uyarlanması
5. Performans istatistiklerinin hesaplanması
6. Performans karakteristikleri kullanılarak sonuçların varyans analizi ile değerlendirilmesi
7. Optimum seviyelerin seçilmesi
8. Sonuçların doğrulanması

Taguchi yönteminde optimizasyon kriteri olarak performans istatistiği (S/N) kullanılmaktadır. En büyük – en iyi, nominal – en iyi ve en küçük – en iyi olmak üzere üç çeşit performans istatistiği vardır. Deney sonuçlarından bulunan veriler kullanılarak S/N değerleri en küçük en iyi (the smaller the better) performans istatistiği S/N esas alınarak aşağıdaki (14) eşitliğine göre hesaplanmıştır.

$$S/N_L = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i^2 \right] \quad (14)$$

Burada;

S/N_L : Performans istatistiği

n : Bir deney kombinasyonunda yapılan tekrar sayısı

Y_i : i. deneyin performans istatistiğidir.

Taguchi Yönteminde optimum değişken seviyelerini veren deney uygulanmamış olabilmektedir. Bu yüzden, optimum şartlara haiz performans değerleri aşağıdaki eşitlik kullanılarak tahmin edilebilir.

$$Y_t = \mu + X_i + e_i \quad (15)$$

Burada;

μ : Performans değerinin genel ortalaması,

X_i : Deneydeki parametre-seviye kombinasyonun sabit etkisidir.

e_i : i. deneydeki rastsal hata

Deneysel sonuçlar kullanılarak hesaplanan Y_t değeri bir nokta tahminidir. Bu nedenle yapılacak doğrulama deneylerinin sonuçlarının anlamlı olduklarından emin olabilmek amacıyla belirlene hata seviyesinde güven aralığı oluşturulmalıdır. Seçilen hata seviyesi için güven aralığı aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanır.

$$\mu \pm \sqrt{F_{\alpha;1,DF_{MSe}} MS_e \left[\frac{1+m}{N} + \frac{1}{n_i} \right]} \quad (16)$$

Burada;

F : Tablo değeri,

α : Hata seviyesi

DF_{MSe} : Hata kareler ortalamasının serbestlik derecesinin toplamını,

m : Ortalama tahmininde kullanılan parametrelerin serbestlik dereceleri

n_i : Yapılan doğrulama deneylerinin tekrar sayısını göstermektedir.

Sonlu eleman analizleri Taguchi metodu L_9 ortogonal dizisi kullanılarak yapılmıştır. Hesaplanan gerilmelerden performans istatistiği kullanılarak %95 güven seviyesinde tahminler yapılmıştır. Taguchi optimizasyonunda kullanılan parametre ve seviyeler Tablo 22’de verilmektedir. L_9 ortogonal dizisi ise Tablo 23’de verilmektedir.

Tablo 22. Taguchi metodunda kullanılan parametre ve seviyeler

Parametre	Seviye		
	1	2	3
Plak Kalınlığı (m)	0,10	0,15	0,20
Enine Derz Aralığı (m)	3,50	5,00	7,00
Beton Elastisite Modülü (MPa)	34000	36000	37000
BSK Elastisite Modülü (MPa)	690	1379	2068

Tablo 23. L_9 ortogonal dizisi

4 Parametre 3 Seviye				
Deney No	Plak Kalınlığı (m)	Enine Derz Aralığı (m)	Beton Elastisite Modülü (MPa)	BSK Elastisite Modülü (MPa)
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

Taguchi optimizasyonunda beton plak için en kritik yükleme durumu olan plak kenarı ve derz kenarının birlikte 4 farklı tam konfigürasyon dingil tipi ile yüklenmesi durumu uygulanmıştır. 4 Farklı tam konfigürasyon dingil tipi yüklemesi için plak kalınlığı boyunca bilineer sıcaklık dağılımları kullanılarak Taguchi optimizasyon metoduna göre analizler yapılmıştır. Taguchi metodu ve Ansys programı kullanılarak elde edilen sonuçlar araştırma bulguları bölümünde verilmiştir.

Çok Değişkenli Regresyon Analizi

Çeşitli bulgulardan elde edilen veriler kendi başlarına bir önem teşkil edecekleri gibi diğer verilerle söz konusu olan ilişkileri ile de farklı bir önem teşkil edebilmektedirler. Verilerin birbiriyle olan ilişkilerini ortaya koyarak inceleyen farklı istatistiksel ve matematiksel yöntemler bulunmaktadır. Bir veya daha fazla veri üzerindeki değişimin bir veya birden fazla veri üzerindeki değişimini inceleyen modellere Regresyon Modelleri denilmektedir. Regresyon modelleri kullanılarak yapılan analizler şüphesiz ki modern dünyada artmakta olan teknolojinin de yardımıyla evrenin işleyişinin anlamlandırılabilmesi ve etkili bilimsel çalışmalar üretilmesi için oluşturulan ve her geçen gün daha da geliştirilen en kullanışlı istatistiksel analizlerden biridir. Bu nedenle regresyon analizi gelişmekte olan dünyamızda mühendislikten hayvancılık ve tarıma, biyo istatistikten sosyal bilimlere kadar yayılan birçok alanda kullanılmaktadır. Basit bir regresyon modeli incelenerek regresyon teriminin anlaşılması daha iyi bir şekilde sağlanabilir. Basit regresyon aşağıda verilen eşitlik ile modellenmiştir.

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon \quad (17)$$

Burada;

y = Bağımlı değişken (yanıt değişkeni)

β_0 = Başlangıç noktası (kesen)

β_1 = Eğim (bağımlı değişkendeki bir birimlik değişiminin bağımsız değişkende kaç birimlik bir değişime neden olduğunu açıklayan katsayı)

x = Bağımsız değişken

ε = Hata terimi (bağımlı değişken ve başlangıç noktasının açıklayamadığı kısmı)

Basit doğrusal regresyonun olasılık dağılımı ve varyansı ise sırasıyla aşağıda verilen eşitlikler yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$E\left(\frac{y}{x}\right) = \beta_0 + \beta_1 \quad (18)$$

$$Var\left(\frac{y}{x}\right) = Var(\beta_0 + \beta_1 + \varepsilon) = \sigma^2 \quad (19)$$

Basit doğrusal regresyonun uygulanabilmesi için ε 'nin yani hata teriminin normal dağıldığı varsayımının sağlanıyor olması beklenmektedir. Bununla birlikte bütün istatistiksel modellerde olduğu gibi regresyon analizinde de hatanın minimum olması beklenilmektedir.

Hatanın minimum olma durumu bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkeni ne kadar açıklayabildiğine bağlıdır. Karşılaşılan bazı olaylarda bağımlı değişken, bağımsız değişkeni yeterince açıklayamamakta ve dolayısıyla hata beklenenin üzerinde çıkmaktadır. Bu durum birçok nedenden dolayı meydana gelebileceği gibi, Y değişkenine yani bağımlı değişkene etki eden daha fazla X değişkenin yani bağımsız değişkenin olması gerektiğinden de meydana gelebilir. Bu gibi durumlarda bağımlı değişkeni etkileyebilecek diğer bağımsız değişkenlerin de modele dahil edilmesi gerekmektedir. Bağımlı bir değişkeni ifade eden birden fazla bağımsız değişkenin söz konusu olduğu regresyon modelleri, çok değişkenli regresyon modelleri olarak tanımlanmaktadır.

Çok değişkenli regresyon aşağıda verilen eşitlik yardımıyla modellenmektedir.

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n \quad (20)$$

Burada;

y = Bağımlı değişken (yanıt değişkeni)

β_0 = Başlangıç noktası (kesen)

β_i = Regresyon katsayıları

x_i = Her bir x değişkeni için bağımsız değişkenleri

ε = Hata terimi (bağımlı değişken ve başlangıç noktasının açıklayamadığı kısmı)

Çok değişkenli regresyonda da basit doğrusal regresyonda olduğu gibi hata terimi olan ε 'un normal dağıldığı varsayımı mevcuttur. Bu da beraberinde ortalamasının 0 ve varyansının ise σ^2 olması gerekliliğini getirmektedir.

Bağımlı değişkene etki etmekte olan bağımsız değişkenlerin bulunarak modele dahil edilmesi işleminden sonra modeldeki parametrelerin (β_i)'lerin tahmini işlemine geçilir. Parametrelerin tahmininde kullanılacak yöntemler değerlendirilerek hatayı en aza indirecek şekilde regresyon modelinin parametreleri tahmin edilmektedir. Parametre tahmininde kullanılan bu yöntemler (kestirim yöntemleri) verilerin ve hatanın türüne, göstermiş oldukları dağılımlara göre değişiklik göstermektedir. Parametrelerin tahmini için kullanılan birçok yöntem bulunmaktadır. Fakat uygulamada daha yaygın olan iki yöntem tercih edilmektedir. Hata teriminin normal dağılım gösterdiği durumlarda en büyük olabilirlik yöntemi, hata

teriminin dağılımı ile ilgili bir bilgi bulunmamakta ise en küçük kareler yöntemi tercih edilmektedir. Ayrıca bir modelin oluşturulması esnasında veri tipi, sayısı ve gösterdikleri dağılımlara göre seçilmesi gereken başka unsurlar da vardır. Bunlardan bir diğeri kovaryans matris yapısının belirlenmesi ve bilgi kriteri dediğimiz kriterlerin seçim işlemidir. Bu bilgi kriterleri başlıca şunlardan oluşmaktadır; Akaike Bilgi kriteri (AIC), Bayesci Bilgi kriteri (BIC), Hannan ve Quinn Bilgi Kriteri (HQIC), Tutarlı Akaike Bilgi Kriteri (CAIC), AICC Bilgi kriteri ve Sapma Bilgi Kriteri (DIC). Tüm bu bahsi geçen unsurlar dikkate alındığında hatayı en aza indiren doğru regresyon modeli seçilebilir.

Hata teriminin normal dağılım sergilediği durumlarda y değişkeni de normal dağılım sergilemektedir, yani ortalamasının 0 varyansının ise σ^2 olması beklenmektedir. Ancak karşılaşılan tüm veri dağılımları normal dağılım sergileyemeyebilmektedir. Bazı durumlarda bağımlı değişkenlerde dağılım üssel dağılım gösterebilirler. Üssel dağılımların sergilenebilmesi amacıyla genelleştirilmiş birçok doğrusal regresyon modeli ortaya konulmuştur. Bunlar başlıca; Lojistik regresyon, Poisson regresyon ve Negatif Binom regresyon 'dur. Bu çalışmada ise veri değerlerine uygun olan çok değişkenli regresyon kullanılmıştır.

Yapay Sinir Ağları

Bulundukları ortamda uyumlu, uyarlanabilen, eksik veri bulunması halinde bile çalışabilen, belirsizliklerin bulunması halinde bile karar verebilen, hatalara karşı daha doğru veriler ortaya koyabilen yapay sinir ağlarının hayatın her kısmında başarılı uygulamaları görülmektedir.

Oluşturulacak olan ağ yapısının belirlenmesi ve ağ parametrelerinin seçimi için belirli bir standardın olmaması, problemlerin sadece sayısal olarak gösterilebilmesi ve ağın davranışlarını açıklayamamasına rağmen bu ağlara olan ilgi fazladır. Özellikle, örüntünün tanınması, sinyal filtrelenmesi, verinin sınıflandırılması ve sıkıştırılması ve optimizasyon çalışmalarında en etkili yöntemlerden biri de yapay sinir ağlarıdır. İş planlaması ve kalite kontrol, veri madenciliği, malzeme analizi, optimum rotanın belirlenmesi, parmak izi tanıma ve tıbbi analizler gibi günlük yaşantıda karşılaşılabilecek birçok alanda örneklerine rastlanılmaktadır.

Biyolojik sinir hücreleri synapsler aracılığı birbirleri ile iletişim kurmaktadır. Bir sinir hücresinin işlediği bilgiler axon'lar aracılığıyla diğer sinir hücrelerine gönderilir. Biyolojik sinir sisteminden etkilenecek geliştirilen yapay sinir ağlarında yapay sinir hücreleri dışarıdan gelen bilgileri bir toplama fonksiyonu ile topladıktan sonra aktivasyon fonksiyonundan geçirerek çıktıyı üretirler ve ağ bağlantıları üzerinden diğer hücrelere (işlem elemanlarına)

gönderirler. Çeşitli toplama ve aktivasyon fonksiyonları mevcuttur. Yapay sinir ağlarını birbirine bağlayan bağlantıların değerleri ağırlık değerleri olarak tanımlanmaktadır. Birbirine paralel olarak üç katman olacak şekilde bir araya gelen işlem elemanları bir ağ oluştururlar. Bu katmanlar; girdi, ara ve çıktı katmanlarıdır.

Ağa bilgi iletimi girdi katmanından yapılarak ara katmanlarda işlenir ve daha sonra çıktı katmanına gönderilir. Bilgi işleme, ağa iletilen bilgilerin ağırlık değerleri kullanılarak çıktıya dönüştürülmesi işlemidir. Ağırlıkların doğru değerlerinin olması ağ girdilerine doğru çıktıların üretilmesi için gerekmektedir. Doğru ağırlıkların bulunması ağırlık eğitimi olarak tanımlanmaktadır. Başlangıçta bu değerler rastgele atanırlar. Ağırlık eğitimi esnasında ve tüm örnekler ağa gösterildiğinde ağırlık öğrenme kuralına göre ağırlıklar değiştirilir. Sonra tekrar bir başka örnek ağa sunularak ağırlıklar yine değiştirilir ve bu şekilde en doğru ağırlıklar bulunmaya çalışılır. Bu işlemler ağ eğitim grubundaki örneklerin tümü için doğru çıktılar üretinceye kadar tekrarlanır. Bu işlemin akabinde yapay sinir ağları test grubunda bulunan örnekler ağa gösterilir. Ağırlık test grubundaki örneklere doğru cevaplar vermesi durumunda ağ eğitilmiş olarak kabul edilir. Ağırlık ağırlıklarının belirlenmesi işleminden sonra tüm ağırlıkların ne anlama geldiği bilinmemektedir. Bu durum ise yapay sinir ağlarının “kara kutu” olarak benzetilmesine neden olmaktadır. Ağırlıkların her birinin ne anlama geldiği bilinmemektedir. Ancak bu ağırlıklar kullanılarak ağırlık girdiler hakkındaki kararını vermesi ağırlık sahip olduğu zekanın bu ağırlıklarda gizlendiği söylenebilir.

Sinir ağının bir olayı öğrenebilmesi için en doğru yapay sinir ağ modelinin seçilmesi gerekmektedir. Birçok yapay sinir ağ modeli geliştirilmiştir. Bir yapay sinir ağının modeli, aşağıda verilen bilgiler kullanılarak belirlenmektedir.

- Ağırlık topolojisi
- Kullanılan toplama fonksiyonu
- Kullanılan aktivasyon fonksiyonu
- Öğrenme stratejisi
- Öğrenme kuralı

En yaygın olarak kullanılmakta olan modeller, tek ve çok katmanlı algılayıcılar, LVQ, ART ağları, SOM, Elman ağ gibi ağlardır. Yapay sinir ağları ile ilgili yapılan çalışmalara tek katmanlı algılayıcılar kullanılarak başlanılmıştır. Problem uzayının bir doğru veya bir düzlem ile sınıflara ayrılması bu algılayıcıların en önemli özelliğidir. Girdinin sınıfı, problem girdileri ağırlıkları ile çarpılıp toplanması ile elde edilen sonucun bir eşik değerinden büyük veya küçük olmasına göre belirlenmektedir. Sınıflar 1 veya -1 rakamları (bazen 1 ve 0 rakamları) ile gösterilmektedir. Öğrenme aşamasında ağırlık ağırlıkları ile eşik değerin ağırlık değeri

değiştirilir. Eşik değeri ünitesinin çıktısı 1 ve sabittir. Basit tek katmanlı algılayıcılar ADALINE/MADALINE üniteleridir. Bu modelleri birbirilerinden ayıran tek fark ise öğrenme kuralıdır. Basit tek katmanlı algılayıcılar kullanılırken ağırlıklar değiştirilir ve girdilerin öğrenme katsayısı λ sabiti ile çarpılarak ağırlıklara eklenir veya çıkartılır. Ağa sunulan girdiler kullanılarak oluşturulan çıktı değerine göre ağırlıklar azaltılır veya artırılır.

ADALINE ünitesinde beklenen ile gerçekleşen çıktı arasındaki farka göre ağırlıkların değiştirilmesi gerçekleştirilir. Bulunan bu fark hata olarak kabul edildiğinde yeni ağırlık değerleri, bu hatanın bir öğrenme katsayısı α ile girdilerin çarpılması ile bulunan değerin eski ağırlıklara eklenmesi ile belirlenir.

ADALINE ünitelerinin bir araya gelmesi ile MADALINE ağı oluşturulur. ADALINE ünitesi ile MADALINE ağının öğrenme kuralları aynıdır. ADALINE üniteleri MADALINE ağında birbirine AND veya OR operatörleri kullanılarak bağlanırlar. Bu operatörler genel programlama dillerinde kullanıldıkları şekilde kullanılmaktadırlar. Her bir ADALINE çıktısı bu operatörler kullanılarak MADALINE ağının çıktısına dönüştürülürler. Tek katmanlı algılayıcılar için mevcut olan en büyük problem, doğrusal olmayan olayları öğrenememeleridir. Bundan dolayı tek katmanlı algılayıcılar geliştirilerek ve yeni modeller oluşturulmuştur.

Yapay sinir ağları için günümüzde en çok kullanılan model, çok katmanlı algılayıcı (ÇKA) ağlarıdır. Bu ağlar özellikle mühendislik problemlerinin %95'ine çözüm üretebilecek kapasitededirler. Çok katmanlı algılayıcı ağları XOR problemini çözmek amacıyla yapılan çalışmalar sonucunda ortaya konulmuştur. 3 katmandan oluşan bu ağlarda;

- Girdi katmanı: Dış dünyadan sadece bilgileri almaktadır. Bilgi işleme bu katmanda yapılmamaktadır.
- Ara katmanlar: Girdi katmanından ulaşan bilgileri işlemektedirler. Bir tane ara katman ile birçok problem çözülebilmektedir. Öğrenilmesi istenilen problemin girdisi ile çıktısı arasında bulunan ilişkisinin doğrusal olmama veya daha karmaşık durumlarda birden fazla ara katman kullanılabilir.
- Çıktı katmanı: Ağa girdi katmanından verilen girdi için, ara katmandan gelen bilgileri işler ve ağın ürettiği çıktı bulunur.

Girdi ve çıktı katmanlarındaki işlem elemanlarının sayısı probleme göre belirlenir. Ara katman sayısı ile her ara katmanda bulunan işlem elemanı sayısının belirlenmesi için bir yöntem mevcut değildir. Bu nedenle bu sayılar deneme yanılma yolu ile belirlenmektedir. Girdi katmanında bulunan her bir işlem elemanı ara katmanda bulunan tüm işlem elemanlarına

bağlıdır. Aynı şekilde onlar ise çıktı katmanında bulunan tüm işlem elemanlarına bağlıdır. Bilgi akışı sırasıyla girdi katmanı, ara katman ve çıktı katmanına doğrudur.

Çok katmanlı algılayıcı ağların eğitilmesi genelleştirilmiş delta kuralına göre yapılmaktadır. ÇKA ağlarında eğitim aşamasında girdiler ile o girdiler sonucu ağın üretmesi gerektiği çıktılar ağa gösterilirler. Kullanılan bu öğrenme kuralının esas noktası eğitim sırasında ağın ürettiği çıktılar ile üretmesi gereken çıktılar arasındaki farkın yani hatanın ağ ağırlıklarına dağıtarak hatanın en aza indirilmesidir. Öğrenme esnasında önce girdiler ağa sunulur ve girdilere karşılık gelen çıktılar üretilir. Bu işlem, ileri doğru hesaplama olarak adlandırılmaktadır. Üretilen ile beklenen çıktılar karşılaştırılarak hata geriye doğru dağıtılır ve ağırlıklar değiştirilir. Bu işlem, geriye doru hesaplama olarak adlandırılmaktadır. ÇKA ağlarının problemleri öğrenmesini etkilemekte olan faktörler aşağıda verilmektedir.

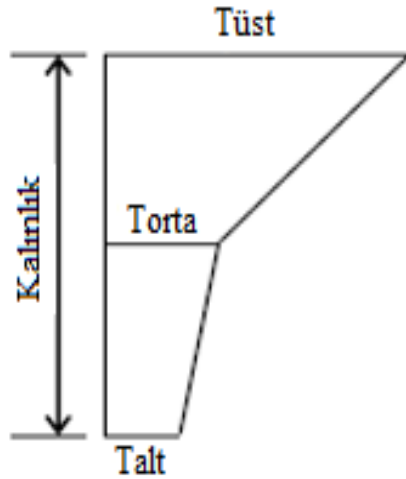
- Örneklerin seçilmesi
- Girdi ve çıktıların ağa sunularak sayısal gösterimi
- Ağırlıkların başlangıç değerlerinin atanması
- Öğrenme ve momentum katsayılarının belirlenmesi
- Örneklerin ağa sunulması
- Ağırlıkların değiştirilme zamanları
- Girdi ve çıktıların ölçeklendirilmesi
- Durdurma kriterinin belirlenmesi
- Ağların büyütülmesi ve budanması

ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Westergaard'ın lineer sıcaklık dağılımı varsayımının aksine, beton plakların derinliğince ölçülen sıcaklık profilleri doğrusal değildir (Teller and Sutherland 1935; Thomlinson 1940). Choubane and Tia (1992), beton plak derinliği boyunca doğrusal olmayan sıcaklık dağılımının dikkate alınmasını önermiştir.

Mohamed and Hansen (1997), doğrusal olmayan sıcaklık dağılımının etkisini dikkate alan bir model geliştirmiştir. Zhang et al. (2003), doğrusal sıcaklık dağılımı varsayımının günün bazı dönemlerinde çekme gerilmelerinin fazla, günün diğer zamanlarında ise olduğundan düşük tahmin edilmesiyle sonuçlandığını bildirmiştir. Maksimum çekme gerilmelerinin doğrusal ile doğrusal olmayan analizi arasındaki farkı % 75'e kadar çıkabilmektedir.

Beton plaklarda derinlik boyunca sıcaklık dağılımı ile ilgili literatürde yapılmış olan çalışmalar doğrultusunda, doğrusal olmayan sıcaklık değişimi Şekil 78'de gösterildiği gibi bilineer değişim ile hesaplanmıştır. Pozitif ve negatif sıcaklık farkları altında beton plak ortasında meydana gelen sıcaklık değerlerinin hesaplanabilmesi amacıyla sırasıyla Formül.21 ve 22'nin kullanılması önerilmiştir. Şekilde; $T_{üst}$, T_{alt} ve T_{orta} sırasıyla üst yüzey, alt yüzey ve beton plağın ortasındaki sıcaklıklardır.



Şekil 78. Beton plaktaki bilineer sıcaklık değişimi

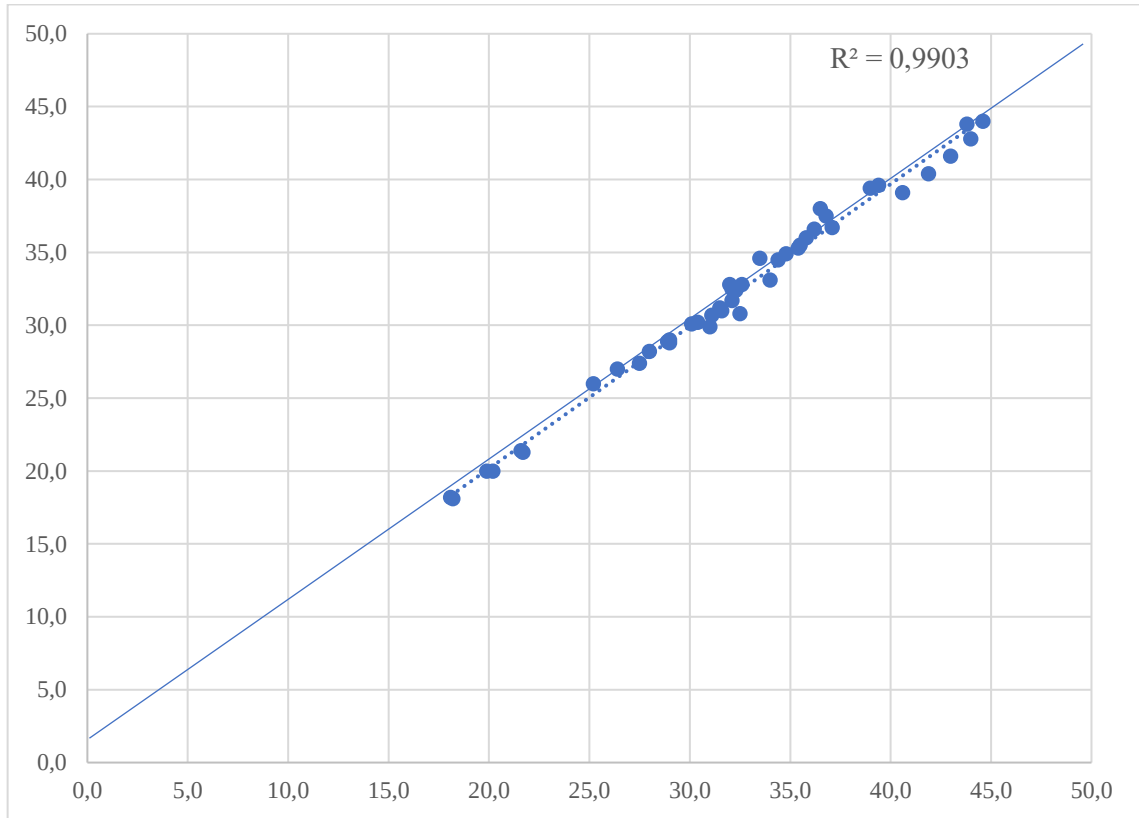
Pozitif sıcaklık farkları için beton plağın ortasındaki sıcaklık aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$T_{orta} = T_{alt} + \frac{1}{2,93} (T_{üst} - T_{alt}) \quad (21)$$

Negatif sıcaklık farkları için beton plağın ortasındaki sıcaklık aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$T_{orta} = T_{üst} + \frac{1}{1,76} (T_{alt} - T_{üst}) \quad (22)$$

Tablo 24’de literatürde yapılmış olan çalışmalara ait kaplama derinliği boyunca ölçülen sıcaklıklar ile bilineer olarak hesaplanan sıcaklıklar verilmiştir. Beton plakların alt ve üst yüzeylerindeki sıcaklıklar zaten hesaplamada kullanıldığı için regresyon analizinin doğru yapılabilmesi amacıyla karşılaştırma tablosundan çıkartılmıştır. Şekil 79’da ise regresyon analizi sonuçları verilmiştir. R^2 , 0.9903 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 79. Regresyon analizi sonuçları

Tablo 24. Kaplama derinliği boyunca ölçülen sıcaklıklar ile bilineer olarak hesaplanan sıcaklıkların karşılaştırılması

Yazar	Sıcaklık Farkları	Kalınlık (mm)	Ölçülen Sıcaklık (°C)	Hesaplanan Sıcaklık (°C)
Armaghani et al. (1987)	Negatif	25		
		64	18,1	18,2
		114	19,9	20,0
		165	21,7	21,3
		203		
	Pozitif	25		
		64	32,6	32,8
		114	29,0	29,0
		165	26,4	27,0
		203		
Karunarathne et al. (2010)	Negatif	0		
		25	34,4	34,5
		50	34,8	34,9
		75	35,4	35,3
		100	35,8	36,0
		125	36,2	36,6
		150		
	Pozitif	0		
		25	44,6	44,0
		50	44,0	42,8
		75	43,0	41,6
		100	41,9	40,4
		125	40,6	39,1
		150		
Yu et al. (1998)	Negatif	59		
		118	18,2	18,1
		177	20,2	20,0
		236	21,6	21,4
		295		
	Pozitif	59		
		118	32,3	32,4
		177	28,0	28,2
		236	25,2	26,0
		295		
Siddique et al. (2005)	Negatif	0		
		76	27,5	27,4
		152	29,0	28,8
		229	31,0	29,9
		305		
	Pozitif	0		
		76	36,5	38,0
		152	33,5	34,6
		229	32,0	32,8
		305		

Tablo 24. (devamı)

Kim and Nam (2010)	Negatif	44		
		70	30,1	30,1
		119	31,1	30,7
		172	31,6	31,0
		224	32,1	31,7
		274	32,1	32,5
		326		
	Pozitif	44		
		70	39,0	39,4
		119	37,1	36,7
		172	35,5	35,5
		224	34,0	33,1
		274	32,5	30,8
		326		
Choubane and Tia (1992)	Negatif	25		
		64	28,9	28,9
		114	30,4	30,2
		165	31,5	31,2
	Pozitif	25		
		64	43,8	43,8
		114	39,4	39,6
		165	36,8	37,5
		203		
		203		

Pozitif bir sıcaklık gradyanı (beton plağın üst kısmı altından daha sıcak), plağın aşağı doğru bükülmesine neden olarak, plağın orta bölmesinde destek kaybına neden olur; daha sonra kendi ağırlığı gibi faktörlerin bir sonucu olarak plağın altında çekme gerilmeleri gelişir. Araç yükleri bükülmüş olan plağa uygulandığında çekme gerilmeleri artar, böylece kaplamanın alt kısmında daha hızlı yorulma hasarı birikmesine neden olur. Bunun tersine, sıcaklık gradyanı negatif olduğunda (beton plağın üstü altından daha soğuk), plak kenarlarda ve köşelerde desteğini kaybeder. Kaplamanın kenarlarına ve köşelerine uygulanan dingil yükleri, daha yüksek çekme gerilmelerine ve dolayısıyla plağın üstünde daha hızlı bir yorulma hasarı birikimine neden olur.

Beton kaplamalar veya BSK kaplamaların üzerine yapılacak bağ kurulmuş veya bağ kurulmamış beton kaplamaların tasarımları için sıcaklık gradyanının belirlenmesi çevresel yüklerin etkilerini karakterize etmek için önemli bir girdidir. Böyle bir girdinin oluşturulabilmesi için beton kaplama yapılacak projenin bulunduğu bölgenin iklim şartlarının ve coğrafi konumunun belirlenmesi gerekmektedir. Coğrafi konuma göre bölgenin enlem, boylam ve rakım bilgileri doğrultusunda solar azimut açısı ile güneşin zenith açısının belirlenerek tasarım için kritik olan günlerdeki (en sıcak ve en soğuk günler için) yatay düzleme gelen güneş ışıınının ve günlük güneşlenme süresinin hesaplanarak hava sıcaklığı, beton

elastisite modülü, beton kopma modülü, plak kalınlık ve boyutları ve mevcut tabaka kalınlıkları gibi faktörlerde dahil edilerek etkili bir sıcaklık gradyanının hesaplanması yapılabilir. Bu nedenle literatürde bulunan çalışmaların ışığında hesaplamalar yapılmıştır.

Negatif gradyanın pozitif gradyandan daha az olması nedeniyle negatif sıcaklık gradyanları özellikle Almanya'da beton yol tasarımında dikkate alınmamaktadır (VENCON 2004). Beton plak pozitif bir sıcaklık farkına sahip olduğunda boyuna çatlaklar için kritik yük konumu, enine derz kenarı ve plağın köşesindedir (Kim 2017). Bu nedenle yapılan çalışmada pozitif sıcaklık farkları kullanılmıştır. Beton kaplamalarda sıcaklık değişimlerinin izlenmesi amacıyla yapılmış olan çalışmalarda ölçülmüş olan kaplama üstü ve altı arasındaki maksimum pozitif sıcaklık farkları ile lineer gradyan değerleri Tablo 25’de verilmektedir. Lineer gradyan değeri olarak arazide yapılmış çalışmaların ortalama lineer gradyan değeri olan $0.52 \text{ }^{\circ}\text{C} / \text{cm}$ ve ısı genleşme katsayısı $9 \times 10^{-6} / ^{\circ}\text{C}$ alınmıştır. Alınan bu değere göre beton kaplama üstü ile altı arasındaki sıcaklık farkı önerilen formüller kullanılarak hesaplanmıştır. Kaplama kalınlığı boyunca sıcaklık değişimleri daha önce açıklandığı şekilde bilineer olarak hesaplanmıştır.

Tablo 25. Literatür çalışmalarındaki maksimum pozitif ve negatif sıcaklık farkları

Yapılan Çalışmalar	Kalınlık (cm)	Mak. Pozitif Sıcaklık Farkı $^{\circ}\text{C}$	Mak. Pozitif Sıcaklık Lineer Gradyanı ⁰ C/cm	Mak. Negatif Sıcaklık Farkı $^{\circ}\text{C}$	Çalışma Alanı	Pozitif Sıc. Farkı İçin Ölçüm Zamanı	Negatif Sıc. Farkı İçin Ölçüm Zamanı
Armaghani et al. (1987)	23	11,0	0,48	-6,1	Saha	Yaz Mevsimi	Yaz Mevsimi
Richardson and Armaghani (1987) Shoukry and Fahmy (2002)	22,5	10,0	0,44		Saha	Yaz Mevsimi	
Choubane and Tia (1992)	20,3	12,7	0,63	-4,6	Saha	Yaz Mevsimi	Yaz Mevsimi
Byrum and Hansen (1994)	17,8	15,5-19,4	0,87-1,09	-7,8 ila -11,6	Saha	Yaz Mevsimi	
Yu et al. (1998)	29,5	12,8	0,43	-6,7	Saha	Yaz Mevsimi	Yaz Mevsimi
Siddique et al. (2005)	30,5	10,5	0,34	-5,0	Saha	Yaz Mevsimi	Yaz Mevsimi
Karunarathne et al. (2010)	15	7,9	0,53	-2,6	Saha	Yaz Mevsimi	Yaz Mevsimi
Kim and Nam (2010)	32,6	10,0	0,31	-2,5	Saha	Yaz Mevsimi	Yaz Mevsimi
Maitra et al. (2013)	30	26,8	0,89			Laboratuvar Şartları	
Salman and Patil (2014)	20,32	13,4	0,66	-6,7		Sonlu Elemanlar Analizi	
Dhananjay and Abhilash (2014)	25	13,2	0,53	-3,5	Saha	Yaz Mevsimi	Yaz Mevsimi
Kim and Chun (2015)	23	5,0	0,22	-4,4	Saha	Kış Mevsimi	Kış Mevsimi
Pancar and Akpınar (2016)	25	14,0	0,56	-9,8	Saha	Yaz Mevsimi	Kış Mevsimi
Kamalakara et al. (2018)	30	15,0	0,5	-6,0	Saha	Yaz Mevsimi	Yaz Mevsimi

100 mm, 150 mm ve 200 mm kalınlıklarındaki beton kaplamalar için kaplama kalınlığı boyunca hesaplanan ve Ansys sonlu eleman modellerine atanan sıcaklık dağılımları Tablo 26’da verilmektedir.

Tablo 26. Kaplama kalınlığı boyunca hesaplanan sıcaklık dağılımları

Sıcaklık (°C)	Tabaka Yeri	Tabaka Aralığı (mm)	Beton Kalınlığı (mm)
10,4	Üst	50	200
7,0		50	
3,5	Orta	50	
1,8		50	
0,0	Alt		
7,8	Üst	37,5	150
5,2		37,5	
2,7	Orta	37,5	
1,3		37,5	
0,0	Alt		
5,2	Üst	25	100
3,5		25	
1,8	Orta	25	
0,9		25	
0,0	Alt		

Bu bölümde Ansys sonlu elemanlar programı kullanılarak elde edilen sonuçlar Taguchi Metoduna göre değerlendirilerek verilmiştir. Bu sonuçlar, tablo ve grafiklerle desteklenmiş, daha anlaşılabilir bir hale getirilerek literatür ve ilgili standartlarla da karşılaştırılmıştır.

2 Dingilli Ağır Vasıta Yükleme Analiz Sonuçları

Materyal ve Yöntem bölümünde anlatıldığı şekilde modellenen 2 dingilli (1.2) ağır vasıtaların yapılan sonlu eleman analizlerinde sıcaklık farkları ve yüklemekten dolayı beton plak altında ve derz bölgesinde oluşan maksimum asal gerilmeler Tablo 27’de verilmiştir.

Tablo 27. 2 dingilli (1.2) ağır vasıtalarda yapılan deney sonuçları

Deney No	Plak Kalınlığı (m)	Enine Derz Aralığı (m)	Beton Elastisite Modülü (MPa)	BSK Elastisite Modülü (MPa)	Maksimum Asal Gerilme (MPa)	Performans İstatistiği S/N
1	A ₁	B ₁	C ₁	D ₁	8,19	-18,266
2		B ₂	C ₂	D ₂	8,07	-18,137
3		B ₃	C ₄	D ₃	8,47	-18,558
4	A ₂	B ₁	C ₂	D ₃	5,64	-15,026
5		B ₂	C ₃	D ₁	5,74	-15,178
6		B ₃	C ₁	D ₂	5,60	-14,964
7	A ₃	B ₁	C ₃	D ₂	4,61	-13,274
8		B ₂	C ₁	D ₃	4,71	-13,460
9		B ₃	C ₂	D ₁	4,40	-12,869

Yalnız sıcaklık farklarından dolayı beton plak altı ile enine ve boyuna derz kenarlarında oluşan maksimum asal gerilme ve yer değiştirmeler sonlu eleman analizlerinde bulunmuştur. Bradburry formülleri ile boyuna derz altında oluşan maksimum gerilmeler hesaplanmıştır. Sıcaklık farkı ile tam konfigürasyon dingil tipi yüklemesinden dolayı beton plak altında oluşan maksimum asal gerilmeler ve yer değiştirmeler sonlu eleman analizlerinde bulunmuştur. Sonuçlar, Tablo 28’de verilmiştir.

Tablo 28. 1.Model 2 dingilli ağır vasıta yüklemesi deney sonuçları

1.Model 2 Dingilli Ağır Vasıta Yükleme						
Deney No	Sıcaklık Farklarından Doğan Maksimum Asal Gerilmeler ve Yer Değiştirmeler			Sıcaklık Farkları ile Yüklemeden Doğan Mak. Asal Gerilmeler ve Yer Değiştirmeler		
	Ansys		Bradburry		Ansys	
	Mak. Yer Değiştirme	Enine Derz	Boyuna Derz Altı	Boyuna Derz Altı	Mak. Yer Değiştirme	Enine Derz
	DMX (mm)	S1 _{MAX} (MPa)	S1 (MPa)	S1 (MPa)	DMX (mm)	S1 _{MAX} (MPa)
1	0,15	1,13	1,10	0,96	0,85	8,19
2	0,15	1,23	1,20	1,01	0,71	8,07
3	0,15	1,26	1,24	1,04	0,71	8,47
4	0,24	3,45	1,68	1,45	0,61	5,64
5	0,24	3,39	1,83	1,44	0,59	5,74
6	0,23	3,41	1,74	1,33	0,59	5,60
7	0,34	4,43	2,35	2,08	0,57	4,61
8	0,33	3,76	2,19	1,78	0,57	4,71
9	0,34	4,12	2,34	1,87	0,60	4,40

Tablo 27'deki performans istatistikleri kullanılarak elde edilen ortalama S/N etkileri Tablo 29'da verilmiştir.

Tablo 29. S/N etkileri tablosu

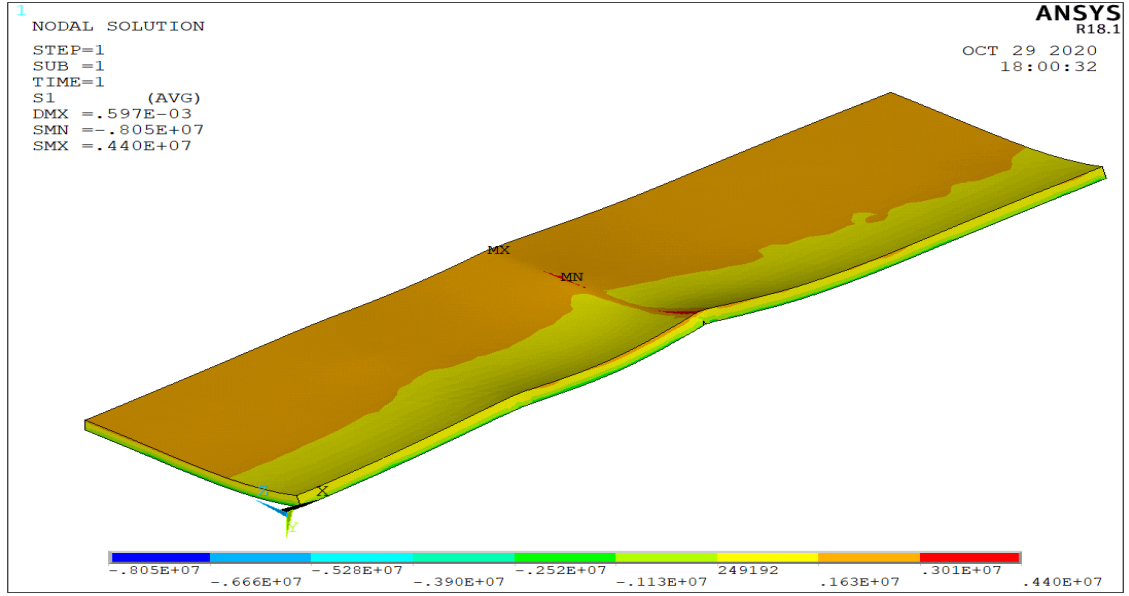
Ortalama S/N Etkileri				
	Plak Kalınlığı	Derz Aralığı	Beton Elastisite Modülü	BSK Elastisite Modülü
1. Seviye	-18,320	-15,522	-15,563	-15,438
2. Seviye	-15,056	-15,592	-15,344	-15,458
3. Seviye	-13,201	-15,463	-15,670	-15,681

Ortalama S/N etkileri kullanılarak beton plak altında oluşan maksimum asal gerilmeyi minimum yapan koşullar ve performans tahminleri ise Tablo 30'da verilmiştir.

Tablo 30. Performans tahminleri tablosu

Faktörler	Seviye	S/N'e olan katkısı
Plak Kalınlığı	A ₃	2,325
Derz Aralığı	B ₃	0,063
Beton Elastisite Modülü	C ₂	0,182
BSK Elastisite Modülü	D ₁	0,088
Tüm Faktörlerin Katkısı (S/N)		2,658
Ortalama Performans İstatistiği (S/N)		-15,526
Optimum Şartlarda Beklenen Değer (S/N)		-12,868
Doğrulama Deneyi Sonucu (S/N) / (MPa)		-12,87 / 4,40
Güven Aralığı ($\alpha=95\%$) (S/N)		-13,345 - -12,573

Yapılan sonlu eleman analizlerinde, üst yapı modelinde seçilen faktörlere göre optimum seviyelerin (maksimum asal gerilmeyi minimum yapan seviyelerin) A₃, B₃, C₂, D₁ olduğu görülmüştür. Tablo 30'da S/N'e olan katkısı en fazla olan parametre, maksimum asal gerilme üzerinde de en fazla katkıyı vermektedir. Bu nedenle maksimum asal gerilme üzerine en büyük etkiyi plak kalınlığının yaptığı belirlenmiştir. Bunu sırasıyla beton tabakasının elastisite modülü, BSK tabakasının elastisite modülü ve derz aralığı izlemiştir. Seçilen faktörlere göre optimum seviyelerin olduğu deney sonucunda maksimum asal gerilme Şekil 80'de verildiği üzere 4.40 MPa olarak elde edilmiştir. Bu sonuca karşılık gelen S/N değeri ise -12,868'dür. % 95 güven aralığında bu değer -13,345 ile -12,573 arasında olması gerekmektedir.



Şekil 80. 2 dingilli yükleme durumu optimum seviyelerle sıcaklık farkı ile tam konfigürasyon dingil tipi yüklemesinden doğan maksimum asal gerilmeler

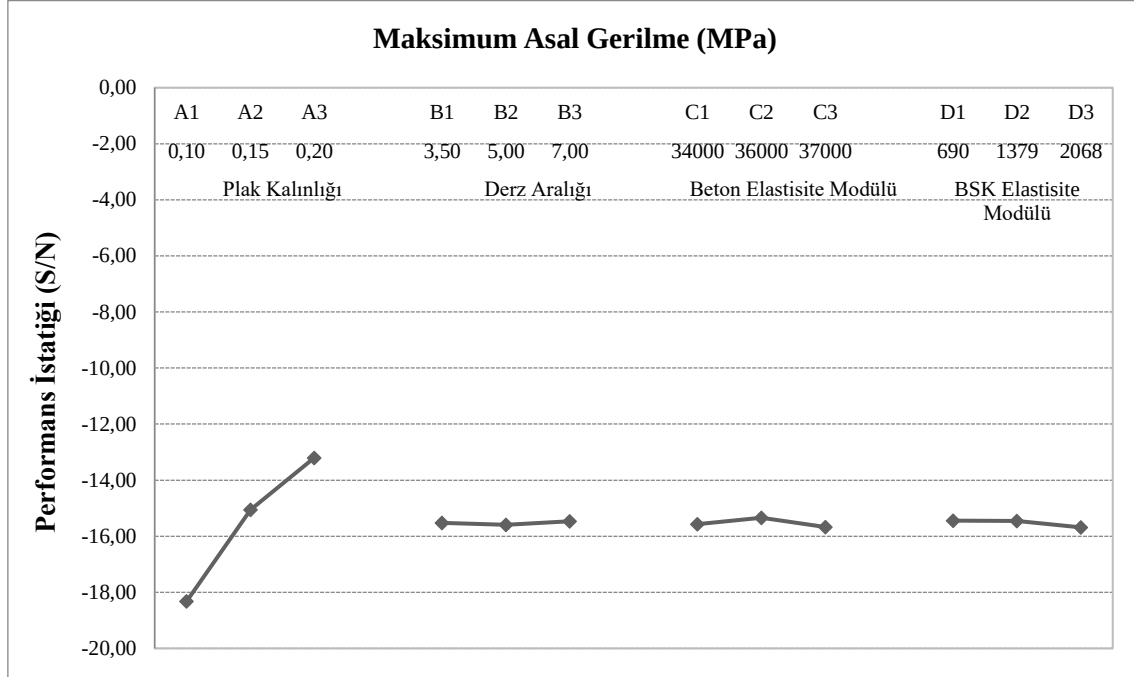
2 Dingilli Ağır Vasıta Yükleme Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Sonuçlar incelendiğinde, sıcaklık farkı ile tam konfigürasyon dingil tipi yüklemesinden dolayı beton plak altında oluşan maksimum asal gerilme değerlerinde plak kalınlığının 3. seviyesinde, derz aralığının 3. seviyesinde, beton elastisite modülünün 2. seviyesinde ve BSK elastisite modülünün 1. seviyesinde en az maksimum asal gerilmenin elde edildiği görülmektedir. Beton plak altında oluşan maksimum asal gerilmeler literatür ile uygun bir biçimde kaplama kalınlığının artması ile önemli ölçüde azalmaktadır (Sultana 2010). Yapılan sonlu eleman analizlerinden elde edilen sonuçlara göre beton plak altında oluşan en düşük maksimum asal gerilme Şekil 81’de verildiği şekilde bu parametrenin üçüncü seviyesi olan 0.20 m beton kaplama kalınlığında görülmüştür.

Derz aralığının SN’ e olan etkisinin 0,063 değeri ile az olduğu ve 3. seviyesinde beton plak altında en düşük maksimum asal gerilmenin elde edildiği görülmüştür. Ancak yapılan literatür çalışmalarında derz aralığının artmasıyla meydana gelen çatlamların da arttığı görülmüştür (Shoukry et al. 2007).

Beton elastisite modülünün artmasıyla plak altında meydana gelen maksimum gerilme değerlerinde de artış olmaktadır (Kim 2017). Bununla birlikte, betonun elastisite modülündeki artış betonun eğilme dayanımındaki artışla ilişkilidir. Beton elastisite modülünün SN’ e olan etkisinin 0,182 değeri ile az olduğu ve 2. seviyesinde beton plak altında en düşük maksimum asal gerilmenin elde edildiği görülmüştür. Beton elastisite modülünün artmasıyla plak altında meydana gelen maksimum asal gerilme değerlerinde birbirine yakın olmak üzere önce azalış sonra artma meyili gözükmemektedir.

BSK kaplama üzerine yapılan bağ kurulmuş beton kaplamalarda BSK elastisite modülündeki bir artışla beton plak altında oluşan gerilmelerde azalış meydana gelmektedir. Ancak bağ kurulmamış beton kaplamalarda, BSK tabakasının elastisite modülünün daha az bir etkisi söz konusudur (Sultana 2010). BSK elastisite modülünün SN' e olan etkisinin 0,088 değeri ile az olduğu ve 1. seviyesinde beton plak altında en düşük maksimum asal gerilmenin elde edildiği görülmüştür.



Şekil 81. Bütün seviyeler için performans istatistikleri

3 Dingilli Ağır Vasıta Yükleme Analiz Sonuçları

3 dingilli (1.22) ağır vasıta yüklemeleri için yalnız sıcaklık farklarından dolayı beton plak altı ile enine ve boyuna derz kenarlarında oluşan maksimum asal gerilme ve yer değiştirmeler sonlu eleman analizlerinde bulunmuştur. Bradburry formülleri ile boyuna derz altında oluşan maksimum gerilmeler hesaplanmıştır. Sıcaklık farkı ile tam konfigürasyon dingil tipi yüklemesinden dolayı beton plak altında oluşan maksimum asal gerilmeler ve yer değiştirmeler sonlu eleman analizlerinde bulunmuştur. Sonuçlar, Tablo 31’de verilmiştir.

Tablo 31. 2. model 3 dingilli ağır vasıta yüklemesi deney sonuçları

2.Model 3 Dingilli Ağır Vasıta Yüklemesi						
Deney No	Sıcaklık Farklarından Doğan Maksimum Asal Gerilmeler ve Yer Değiştirmeler				Sıcaklık Farkları ile Yüklemeden Doğan Maksimum Asal Gerilmeler ve Yer Değiştirmeler	
	Ansys		Bradburry		Ansys	
	Mak. Yer Değiştirme	Enine Derz	Boyuna Derz Altı	Boyuna Derz Altı	Mak. Yer Değiştirme	Enine Derz
	DMX (mm)	S1 _{MAX} (MPa)	S1 (MPa)	S1 (MPa)	DMX (mm)	S1 _{MAX} (MPa)
1	0,15	1,13	1,10	0,96	0,80	7,13
2	0,15	1,23	1,20	1,01	0,77	6,65
3	0,15	1,26	1,24	1,04	0,77	7,16
4	0,24	3,45	1,68	1,45	0,65	4,16
5	0,24	3,39	1,83	1,44	0,67	4,70
6	0,23	3,41	1,74	1,33	0,67	4,36
7	0,34	4,43	2,35	2,08	0,65	4,45
8	0,33	3,76	2,19	1,78	0,65	3,92
9	0,34	4,12	2,34	1,87	0,69	4,06

Performans istatistikleri kullanılarak elde edilen ortalama S/N etkileri Tablo 32’de verilmiştir.

Tablo 32. S/N etkileri tablosu

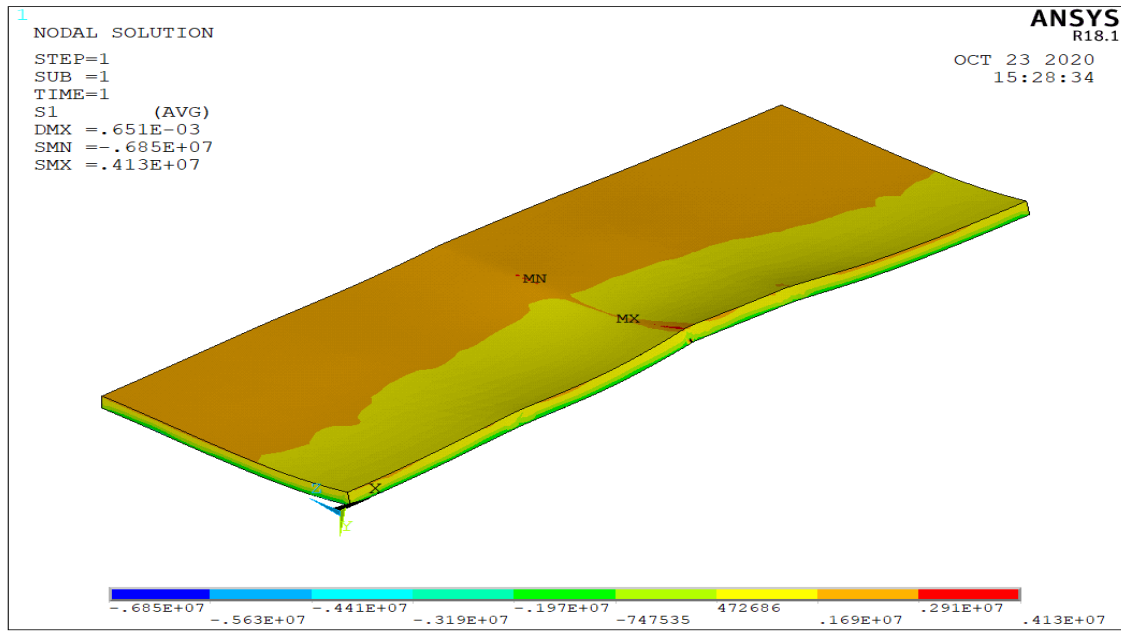
Ortalama S/N Etkileri				
	Plak Kalınlığı	Derz Aralığı	Beton Elastisite Modülü	BSK Elastisite Modülü
1. Seviye	-16,872	-14,137	-13,906	-14,225
2.Seviye	-12,871	-13,921	-13,670	-14,071
3.Seviye	-12,334	-14,020	-14,502	-13,782

Ortalama S/N etkileri kullanılarak beton plak altında oluşan maksimum asal gerilmeyi minimum yapan koşullar ve performans tahminleri ise Tablo 33’te verilmiştir.

Tablo 33. Performans tahminleri tablosu

Faktörler	Seviye	S/N'e olan katkısı
Plak Kalınlığı	A ₃	1,692
Derz Aralığı	B ₂	0,105
Beton Elastisite Modülü	C ₂	0,356
BSK Elastisite Modülü	D ₃	0,244
Tüm Faktörlerin Katkısı (S/N)		2,397
Ortalama Performans İstatistiği (S/N)		-14,026
Optimum Şartlarda Beklenen Değer (S/N)		-11,629
Doğrulama Deneyi Sonucu (S/N) / (MPa)		-12,32 / 4,13
Güven Aralığı ($\alpha=95\%$) (S/N)		-12,517 - -11,233

Yapılan sonlu eleman analizlerinde, üst yapı modelinde seçilen faktörlere göre optimum seviyelerin (maksimum asal gerilmeyi minimum yapan seviyelerin) A₃, B₂, C₂, D₃ olduğu görülmüştür. Tablo 33'te S/N'e olan katkısı en fazla olan parametre, maksimum asal gerilme üzerinde de en fazla katkıyı vermektedir. Bu nedenle maksimum asal gerilme üzerine en büyük etkiyi plak kalınlığının yaptığı belirlenmiştir. Bunu sırasıyla beton tabakasının elastisite modülü, BSK tabakasının elastisite modülü ve derz aralığı izlemiştir. Tablo 23'de verilmiş olan deney planına bakıldığında, optimum sonucu veren tasarımın bulunmadığı görülmektedir. Bulunan sonucun doğruluğunun belirlenebilmesi amacıyla ilgili parametre seviyelerine göre (A₃, B₂, C₂, D₃) model hazırlanarak sonlu eleman analizleri yapılmıştır. Yapılan doğrulama deneyi sonucunda maksimum asal gerilme Şekil 82'de verildiği üzere 4.13 MPa olarak elde edilmiştir. Bu sonuca karşılık gelen S/N değeri ise -12,319'dür. % 95 güven aralığında bu değer -12,517 ile -11,233 arasında olması gerekmektedir. Dolayısıyla, % 95 güven aralığı için hesaplanan değer doğru olduğu söylenebilir.

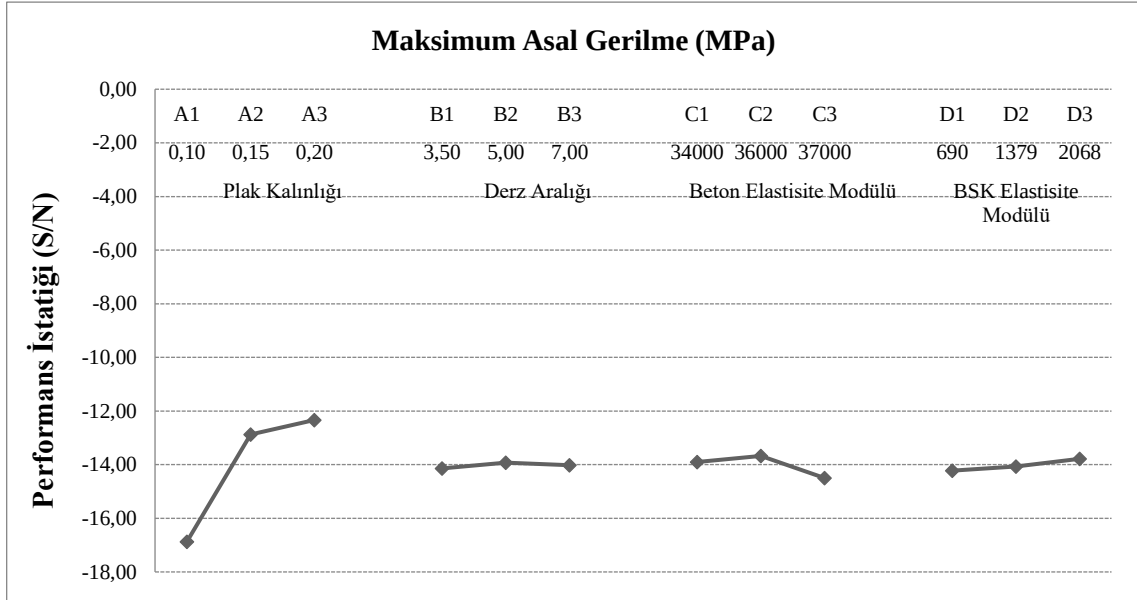


Şekil 82. 3 dingilli yükleme durumu optimum seviyelerle sıcaklık farkı ile tam konfigürasyon dingil tipi yüklemesinden doğan maksimum asal gerilmeler

3 Dingilli Ağır Vasıta Yükleme Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Sonuçlar incelendiğinde, sıcaklık farkı ile tam konfigürasyon dingil tipi yüklemesinden dolayı beton plak altında oluşan maksimum asal gerilme değerlerinde plak kalınlığının 3. seviyesinde, derz aralığının 2. seviyesinde, beton elastisite modülünün 2. seviyesinde ve BSK elastisite modülünün 3. seviyesinde en az maksimum asal gerilmenin elde edildiği görülmektedir. Şekil 83'de verildiği şekilde bu parametrenin üçüncü seviyesi olan 0.20 m beton kaplama kalınlığında görülmüştür. Derz aralığının SN' e olan etkisinin 0,105 değeri ile az olduğu ve 2. seviyesinde beton plak altında en düşük maksimum asal gerilmenin elde edildiği

görülmüştür. Beton elastisite modülünün SN' e olan etkisinin 0,356 değeri ile az olduğu ve 2. seviyesinde beton plak altında en düşük maksimum asal gerilmenin elde edildiği görülmüştür. BSK elastisite modülünün SN' e olan etkisinin 0,244 değeri ile az olduğu ve 3. seviyesinde beton plak altında en düşük maksimum asal gerilmenin elde edildiği görülmüştür.



Şekil 83. Bütün seviyeler için performans istatistikleri

4 Dingilli Ağır Vasıta Yükleme Analiz Sonuçları

4 dingilli (1.122) ağır vasıta yüklemeleri için yalnız sıcaklık farklarından dolayı beton plak altı ile enine ve boyuna derz kenarlarında oluşan maksimum asal gerilme ve yer değiştirmeler sonlu eleman analizlerinde bulunmuştur. Bradburry formülleri ile boyuna derz altında oluşan maksimum gerilmeler hesaplanmıştır. Sıcaklık farkı ile tam konfigürasyon dingil tipi yüklemeinden dolayı beton plak altında oluşan maksimum asal gerilmeler ve yer değiştirmeler sonlu eleman analizlerinde bulunmuştur. Sonuçlar, Tablo 34'de verilmiştir.

Tablo 34. 3. model 4 dingilli ağır vasıta yüklemesi deney sonuçları

3.Model 4 Dingilli Ağır Vasıta Yüklemesi						
Deney No	Sıcaklık Farklarından Doğan Maksimum Asal Gerilmeler ve Yer Değiştirmeler				Sıcaklık Farkları ile Yüklemeden Doğan Maksimum Asal Gerilmeler ve Yer Değiştirmeler	
	Ansys		Bradburry		Ansys	
	Mak. Yer Değiştirme	Enine Derz	Boyuna Derz Altı	Boyuna Derz Altı	Mak. Yer Değiştirme	Enine Derz
	DMX (mm)	S1 _{MAX} (MPa)	S1 (MPa)	S1 (MPa)	DMX (mm)	S1 _{MAX} (MPa)
1	0,15	1,13	1,10	0,96	0,83	7,29
2	0,15	1,23	1,20	1,01	0,78	6,28
3	0,15	1,26	1,24	1,04	0,79	6,82
4	0,24	3,45	1,68	1,45	0,70	4,04
5	0,24	3,39	1,83	1,44	0,71	3,77
6	0,23	3,41	1,74	1,33	0,71	3,41
7	0,34	4,43	2,35	2,08	0,69	4,75
8	0,33	3,76	2,19	1,78	0,67	3,92
9	0,34	4,12	2,34	1,87	0,71	4,54

Performans istatistikleri kullanılarak elde edilen ortalama S/N etkileri Tablo 35’de verilmiştir.

Tablo 35. S/N etkileri tablosu

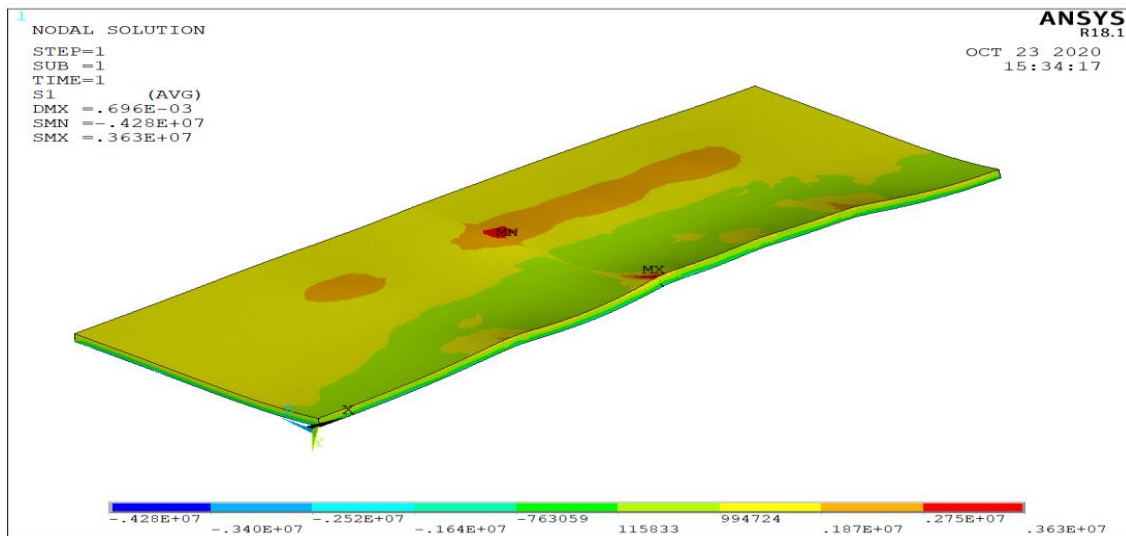
Ortalama S/N Etkileri				
	Plak Kalınlığı	Derz Aralığı	Beton Elastisite Modülü	BSK Elastisite Modülü
1. Seviye	-16,630	-14,305	-13,258	-13,974
2.Seviye	-11,437	-13,117	-13,743	-13,383
3.Seviye	-12,847	-13,491	-13,912	-13,556

Ortalama S/N etkileri kullanılarak beton plak altında oluşan maksimum asal gerilmeyi minimum yapan koşullar ve performans tahminleri Tablo 36’da verilmiştir.

Tablo 36. Performans tahminleri tablosu

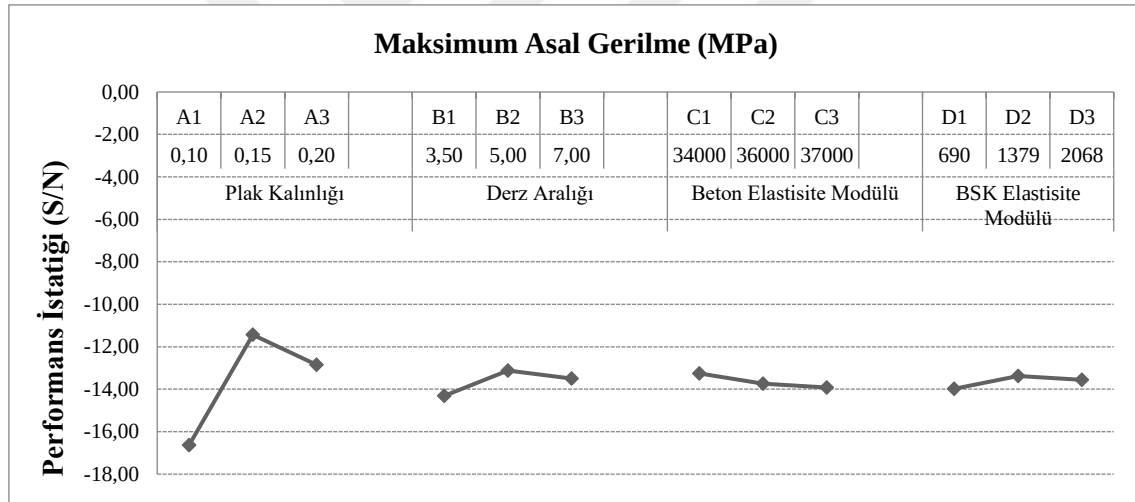
Faktörler	Seviye	S/N'e olan katkısı
Plak Kalınlığı	A ₂	2,201
Derz Aralığı	B ₂	0,521
Beton Elastisite Modülü	C ₁	0,380
BSK Elastisite Modülü	D ₂	0,255
Tüm Faktörlerin Katkısı (S/N)		3,357
Ortalama Performans İstatistiği (S/N)		-13,638
Optimum Şartlarda Beklenen Değer (S/N)		-10,281
Doğrulama Deneyi Sonucu (S/N) / (MPa)		-11,2 / 3,63
Güven Aralığı ($\alpha=95\%$) (S/N)		-11,407 - -9,669

Yapılan sonlu eleman analizlerinde, üst yapı modelinde seçilen faktörlere göre optimum seviyelerin (maksimum asal gerilmeyi minimum yapan seviyelerin) A₂, B₂, C₁, D₂ olduğu görülmüştür. Tablo 36'da S/N'e olan katkısı en fazla olan parametre, maksimum asal gerilme üzerinde de en fazla katkıyı vermektedir. Bu nedenle maksimum asal gerilme üzerine en büyük etkiyi plak kalınlığının yaptığı belirlenmiştir. Bunu sırasıyla derz aralığı, beton tabakasının elastisite modülü ve BSK tabakasının elastisite modülü izlemiştir. Tablo 23'de verilmiş olan deney planına bakıldığında, optimum sonucu veren tasarımın bulunmadığı görülmektedir. Bulunan sonucun doğruluğunun belirlenebilmesi amacıyla ilgili parametre seviyelerine göre (A₂, B₂, C₁, D₂) model hazırlanarak sonlu eleman analizleri yapılmıştır. Yapılan doğrulama deneyi sonucunda maksimum asal gerilme Şekil 84'de verildiği üzere 3.63 MPa olarak elde edilmiştir. Bu sonuca karşılık gelen S/N değeri ise -11,198'dir. % 95 güven aralığında bu değer -11,407 ile -9,669 arasında olması gerekmektedir. Dolayısıyla, % 95 güven aralığı için hesaplanan değer doğru olduğu söylenebilir.

**Şekil 84.** 4 dingilli yükleme durumu optimum seviyelerle sıcaklık farkı ile tam konfigürasyon dingil tipi yüklemesinden doğan maksimum asal gerilmeler

4 Dingilli Ağır Vasıta Yükleme Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Sonuçlar incelendiğinde, sıcaklık farkı ile tam konfigürasyon dingil tipi yüklemeinden dolayı beton plak altında oluşan maksimum asal gerilme değerlerinde plak kalınlığının 2. seviyesinde, derz aralığının 2. seviyesinde, beton elastisite modülünün 1. seviyesinde ve BSK elastisite modülünün 2. seviyesinde en az maksimum asal gerilmenin elde edildiği görülmektedir. Yapılan sonlu eleman analizlerinden elde edilen sonuçlara göre beton plak altında oluşan en düşük maksimum asal gerilme Şekil 85’de verildiği şekilde bu parametrenin ikinci seviyesi olan 0.15 m beton kaplama kalınlığında görülmüştür. Derz aralığının SN’ e olan etkisinin 0,521 değeri ile az olduğu ve 2. seviyesinde beton plak altında en düşük maksimum asal gerilmenin elde edildiği görülmüştür. Beton elastisite modülünün SN’ e olan etkisinin 0,380 değeri ile az olduğu ve 1. seviyesinde beton plak altında en düşük maksimum asal gerilmenin elde edildiği görülmüştür. BSK elastisite modülünün SN’ e olan etkisinin 0,255 değeri ile az olduğu ve 2. seviyesinde beton plak altında en düşük maksimum asal gerilmenin elde edildiği görülmüştür.



Şekil 85. Bütün seviyeler için performans istatistikleri

5 Dingilli Ağır Vasıta Yükleme Analiz Sonuçları

5 dingilli (12+111) ağır vasıta yüklemeleri için yalnız sıcaklık farklarından dolayı beton plak altı ile enine ve boyuna derz kenarlarında oluşan maksimum asal gerilme ve yer değiştirmeler sonlu eleman analizlerinde bulunmuştur. Bradburry formülleri ile boyuna derz altında oluşan maksimum gerilmeler hesaplanmıştır. Sıcaklık farkı ile tam konfigürasyon dingil tipi yüklemeinden dolayı beton plak altında oluşan maksimum asal gerilmeler ve yer değiştirmeler sonlu eleman analizlerinde bulunmuştur. Sonuçlar, Tablo 37’de verilmiştir.

Tablo 37. 4. model 5 dingilli ağır vasıta yüklemesi deney sonuçları

4.Model 5 Dingilli Ağır Vasıta Yüklemesi						
Deney No	Sıcaklık Farklarından Doğan Maksimum Asal Gerilmeler ve Yer Değiştirmeler				Sıcaklık Farkları ile Yüklemeden Doğan Maksimum Asal Gerilmeler ve Yer Değiştirmeler	
	Ansys		Bradburry		Ansys	
	Mak. Yer Değiştirme	Enine Derz	Boyuna Derz Altı	Boyuna Derz Altı	Mak. Yer Değiştirme	Enine Derz
	DMX (mm)	S1 _{MAX} (MPa)	S1 (MPa)	S1 (MPa)	DMX (mm)	S1 _{MAX} (MPa)
1	0,15	2,18	1,11	0,96	0,84	6,90
2	0,15	2,26	1,18	1,01	0,80	6,82
3	0,15	2,25	1,27	1,04	0,77	6,66
4	0,24	3,21	1,88	1,41	0,68	4,39
5	0,25	3,18	1,81	1,44	0,70	4,38
6	0,24	3,14	1,59	1,33	0,68	3,99
7	0,35	4,70	1,98	1,92	0,67	4,70
8	0,34	4,10	1,91	1,77	0,65	4,28
9	0,35	3,89	2,18	1,87	0,67	4,15

Performans istatistikleri kullanılarak elde edilen ortalama S/N etkileri Tablo 38’de verilmiştir.

Tablo 38. S/N etkileri tablosu

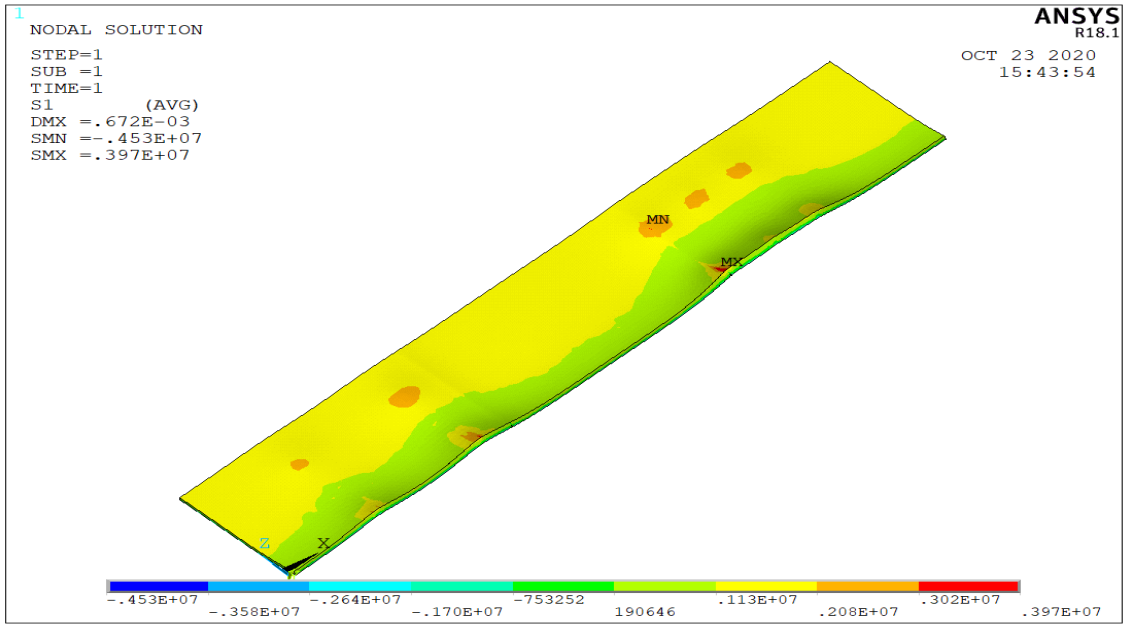
	Ortalama S/N Etkileri			
	Plak Kalınlığı	Derz Aralığı	Beton Elastisite Modülü	BSK Elastisite Modülü
1. Seviye	-16,641	-14,356	-13,808	-13,989
2.Seviye	-12,566	-14,045	-13,962	-14,046
3.Seviye	-12,811	-13,617	-14,247	-13,983

Ortalama S/N etkileri kullanılarak beton plak altında oluşan maksimum asal gerilmeyi minimum yapan koşullar ve performans tahminleri ise Tablo 39’da verilmiştir.

Tablo 39. Performans tahminleri tablosu

Faktörler	Seviye	S/N'e olan katkısı
Plak Kalınlığı	A ₂	1,440
Derz Aralığı	B ₃	0,389
Beton Elastisite Modülü	C ₁	0,198
BSK Elastisite Modülü	D ₃	0,023
Tüm Faktörlerin Katkısı (S/N)		2,050
Ortalama Performans İstatistiği (S/N)		-14,006
Optimum Şartlarda Beklenen Değer (S/N)		-11,956
Doğrulama Deneyi Sonucu (S/N) / (MPa)		-11,98 / 3,97
Güven Aralığı ($\alpha=95\%$) (S/N)		-12,081 - -11,881

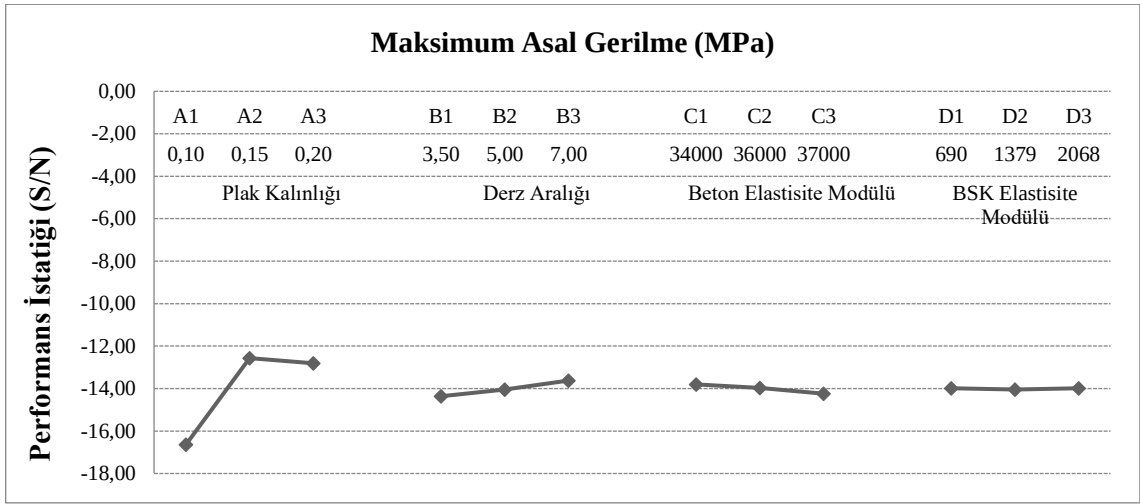
Yapılan sonlu eleman analizlerinde, üst yapı modelinde seçilen faktörlere göre optimum seviyelerin (maksimum asal gerilmeyi minimum yapan seviyelerin) A₂, B₃, C₁, D₃ olduğu görülmüştür. Tablo 39'da S/N'e olan katkısı en fazla olan parametre, maksimum asal gerilme üzerinde de en fazla katkıyı vermektedir. Bu nedenle maksimum asal gerilme üzerine en büyük etkiyi plak kalınlığının yaptığı belirlenmiştir. Bunu sırasıyla derz aralığı, beton tabakasının elastisite modülü ve BSK tabakasının elastisite modülü izlemiştir. Tablo 23'de verilmiş olan deney planına bakıldığında, optimum sonucu veren tasarımın bulunmadığı görülmektedir. Bulunan sonucun doğruluğunun belirlenebilmesi amacıyla ilgili parametre seviyelerine göre (A₂, B₃, C₁, D₃) model hazırlanarak sonlu eleman analizleri yapılmıştır. Yapılan doğrulama deneyi sonucunda maksimum asal gerilme Şekil 86'da verildiği üzere 3.97 MPa olarak elde edilmiştir. Bu sonuca karşılık gelen S/N değeri ise -11,976'dır. % 95 güven aralığında bu değerin -12,081 ile -11,881 arasında olması gerekmektedir. Dolayısıyla, % 95 güven aralığı için hesaplanan değerin doğru olduğu söylenebilir.



Şekil 86. 5 dingilli yükleme durumu optimum seviyelerle sıcaklık farkı ile tam konfigürasyon dingil tipi yüklemesinden doğan maksimum asal gerilmeler

5 Dingilli Ağır Vasıta Yükleme Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Sonuçlar incelendiğinde, sıcaklık farkı ile tam konfigürasyon dingil tipi yüklemesinden dolayı beton plak altında oluşan maksimum asal gerilme değerlerinde plak kalınlığının 2. seviyesinde, derz aralığının 3. seviyesinde, beton elastisite modülünün 1. seviyesinde ve BSK tabakasının elastisite modülünün 3. seviyesinde en az maksimum asal gerilmenin elde edildiği görülmektedir. Yapılan sonlu eleman analizlerinden elde edilen sonuçlara göre beton plak altında oluşan en düşük maksimum asal gerilme Şekil 87’de verildiği şekilde bu parametrenin ikinci seviyesi olan 0.15 m beton kaplama kalınlığında görülmüştür. Derz aralığının SN’ e olan etkisinin 0,389 değeri ile az olduğu ve 2. seviyesinde beton plak altında en düşük maksimum asal gerilmenin elde edildiği görülmüştür. Beton elastisite modülünün SN’ e olan etkisinin 0,198 değeri ile az olduğu ve 1. seviyesinde beton plak altında en düşük maksimum asal gerilmenin elde edildiği görülmüştür. BSK tabakası elastisite modülünün SN’ e olan etkisinin 0,023 değeri ile az olduğu ve 3. seviyesinde beton plak altında en düşük maksimum asal gerilmenin elde edildiği görülmüştür.



Şekil 87. Plak kalınlığı performans istatistikleri

1.2, 1.22, 1.122 ve 1.2+111 Yüklemeleri İçin Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Yapılan optimizasyonlarda beton plak altında oluşan maksimum asal gerilmeler üzerinde en etkili olan parametrenin plak kalınlığı olduğu görülmüştür.

Plak boyunun maksimum asal gerilme üzerinde etkisinin az olduğu görülmüştür. 1.2, 1.22, 1.122 ve 1.2+111 dingil tipleri için en uygun derz aralıkları sırasıyla 7 m , 5 m, 5 m ve 7 m olarak bulunmuştur. Ancak derz aralığının artmasıyla meydana gelen çatlamların da artacağı göz önünde bulundurulmalıdır.

BSK kaplaması elastisite modülü olarak kötü kaplama durumunun yansıtılması amacıyla 690 MPa, 1379 MPa ve 2068 MPa değerleri kullanılmıştır. Yapılan optimizasyonlarda mevcut BSK kaplama durumunun 1.2, 1.22, 1.122 ve 1.2+111 dingil tipleri için SN'e etkisinin (sırasıyla 0,088, 0,244, 0,255 ve 0,023) az olduğu görülmüştür. Kötü (önemli yüzey bozulmaları, agrega sıyrılmaları, termal genleşme ve yapısal sıkıntılar) ve orta durum (bazı yapısal sıkıntılar) arasındaki BSK kaplamaların iyileştirilerek hizmet ömrünün uzatılması amacıyla üzerine en az C45/55 sınıfında ve 0,20 m kalınlığında beton kaplama yapılması önerilmiştir.

Beton elastisite modülünün artmasıyla plak altında meydana gelen maksimum asal gerilme değerlerinde; 2 ve 3 dingilli araç yüklemeleri için birbirine yakın değerler olmak üzere önce azalış sonra artma meyili, 4 ve 5 dingilli araç yüklemeleri için birbirine yakın değerler olmak üzere artış meyili görülmüştür.

Beton plak kalınlığının artması ile sıcaklık farkından dolayı beton kaplama altında oluşan maksimum yer değiştirme miktarının arttığı görülmüştür. Bu durumun sebebinin ise beton kalınlığının artması ile beton plak altı ve üstü arasındaki sıcaklık farkının artması olarak düşünülmüştür. Beton plak kalınlığının sabit tutulup beton, asfalt ve temel tabakalarının

malzeme özellikleri ile enine derz aralıklarının değiştirilmesi durumunda maksimum yer değiştirme miktarının yaklaşık olarak aynı kaldığı görülmüştür. Bu durum nedeniyle sıcaklık farklarından dolayı oluşacak maksimum yer değiştirme miktarının daha çok beton plak kalınlığı ile ilişkili olduğu düşünülmüştür.

Kalınlığı 0,10 m olan plaklar için sıcaklık farkı ve yüklemekten dolayı plak altında meydana gelen maksimum asal gerilmelerinin yalnız sıcaklık farklarından dolayı meydana gelen gerilmelerden ortalama 6,6 kat daha fazla olduğu belirlenmiş dolayısıyla bu kalınlık için yüklemekten dolayı plak altında oluşan maksimum asal gerilmelerin seçilen yükleme değerleri altında daha önemli olduğu görülmüştür.

Kalınlığı 0,15 m olan plaklar için sıcaklık farkı ve yüklemekten dolayı plak altında meydana gelen maksimum asal gerilmelerinin yalnız sıcaklık farklarından dolayı meydana gelen gerilmelerden ortalama 1,5 kat daha fazla olduğu görülmüştür.

Kalınlığı 0,20 m olan plaklar için sıcaklık farkı ve yüklemekten dolayı plak altında meydana gelen maksimum asal gerilmelerin yalnız sıcaklık farklarından dolayı meydana gelen gerilmelere yaklaşık olarak eşit olduğu görülmüştür. Bu durum 0,20 m kalınlığındaki beton plaklar için yalnız sıcaklıktan dolayı plak altında oluşan maksimum asal gerilmelerin seçilen yükleme parametreleri altında çok önemli olduğunu göstermiştir.

Kalınlığı 0,15 m'den fazla olan beton plaklar için, plak üstü ve altındaki sıcaklık farkının azaltılması amacıyla beton karışımında çeşitli alternatif maddeler kullanılabilir. Akpınar (2016), beton karışımında cam boncuk ve zeolit kullanımının beton üzerindeki yüksek sıcaklık etkisini azaltmak için iyi birer alternatif olduğunu ortaya koymuştur.

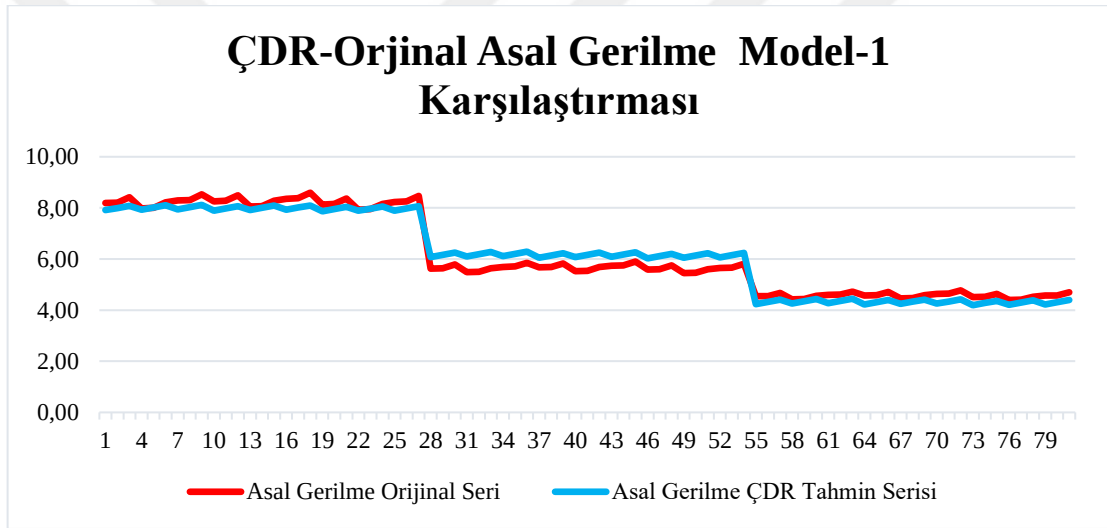
Yapılan optimizasyonlarda kritik dingil tipinin 1.2 olduğu görülmüştür. 1.22, 1.122 ve 1.2+111 dingil tipleri için kullanılan derz aralığı ve BSK elastisite modülü seviyelerinde 0,15 m beton kalınlığının yeterli olduğu ancak 1.2 dingil tipi için 0,15 m beton kalınlığının yeterli olmadığı görülmüştür. 1.2 dingil tipi için gerekli beton sınıflarının C45/55 ile C50/60 ve gerekli minimum beton kalınlığının ise 0,20 m olduğu görülmüştür.

Kritik dingil tipi (1.2) için yapılan optimizasyonlarda ise C40/50 beton sınıfı ve 0,20 m kalınlık için plak altında oluşan maksimum asal gerilmenin (4,54 MPa, 4,55 MPa, 4,67 MPa, 4,58 MPa, 4,59 MPa, 4,71 MPa, 4,51 MPa, 4,52 MPa, 4,64 MPa) 4.71MPa ile beton kopma modülü olan 4,40 MPa üstünde olduğu görülmüştür. C45/55 beton sınıfı ve 0,20 m kalınlık için plak altında oluşan maksimum asal gerilmenin (4,43 MPa, 4,44 MPa, 4,56 MPa, 4,47 MPa, 4,48 MPa, 4,59 MPa, 4,40 MPa, 4,41 MPa, 4,52 MPa) 4.59 MPa ile beton kopma modülü olan 4,60 MPa' a hemen hemen eşit olduğu görülmüştür. C50/60 beton sınıfı ve 0,20 m kalınlık için

plak altında oluşan maksimum asal gerilmenin (4,60 MPa, 4,61 MPa, 4,73 MPa, 4,64 MPa, 4,65 MPa, 4,77 MPa, 4,57 MPa, 4,58 MPa, 4,70 MPa) 4.77 MPa ile beton kopma modülü olan 5 MPa' ın altında olduğu görülmüştür.

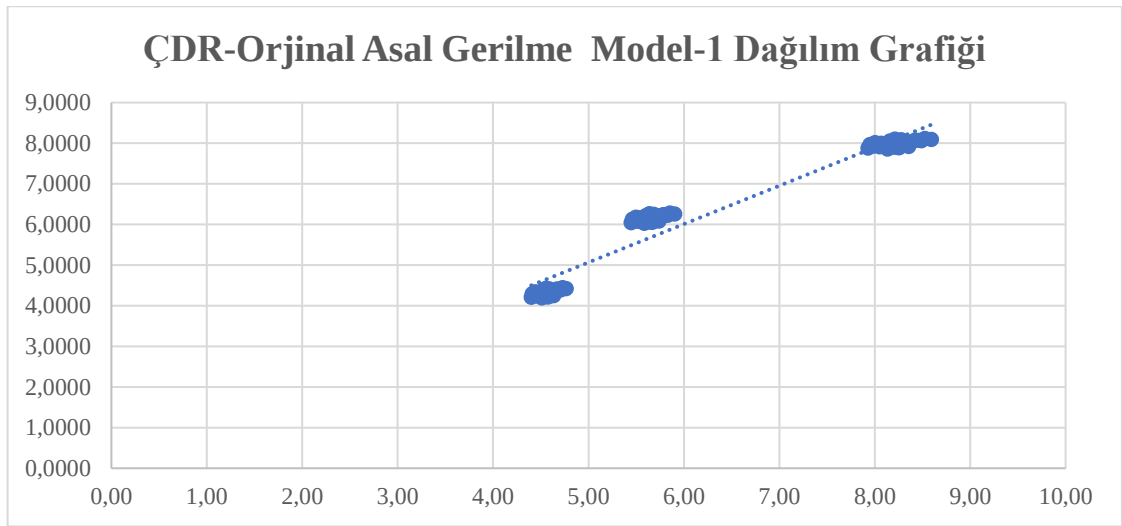
AASHTO yöntemi kullanılarak C40/50, C45/55 ve C50/60 beton sınıfları için gerekli beton kaplama kalınlıkları sırasıyla 0,222 m, 0,217 m ve 0,206 m olarak hesaplanmıştır. Kritik 1.2 dingil tipi yüklemesi için yapılan optimizasyonlarda, C40/50 beton sınıfı için plak altında oluşan maksimum asal gerilmenin beton kopma modülünün üstünde olduğu görülmüştür. Dolayısıyla gerekli C45/55 ve C50/60 beton sınıfları için minimum beton kalınlığının 0,20 m olduğu görülmüştür. AASHTO yöntemi ve sonlu elemanlar yöntemi ile birbirlerine yakın plak kalınlıkları bulunmuştur.

Çok Değişkenli Regresyon Model Sonuçlarının Değerlendirilmesi

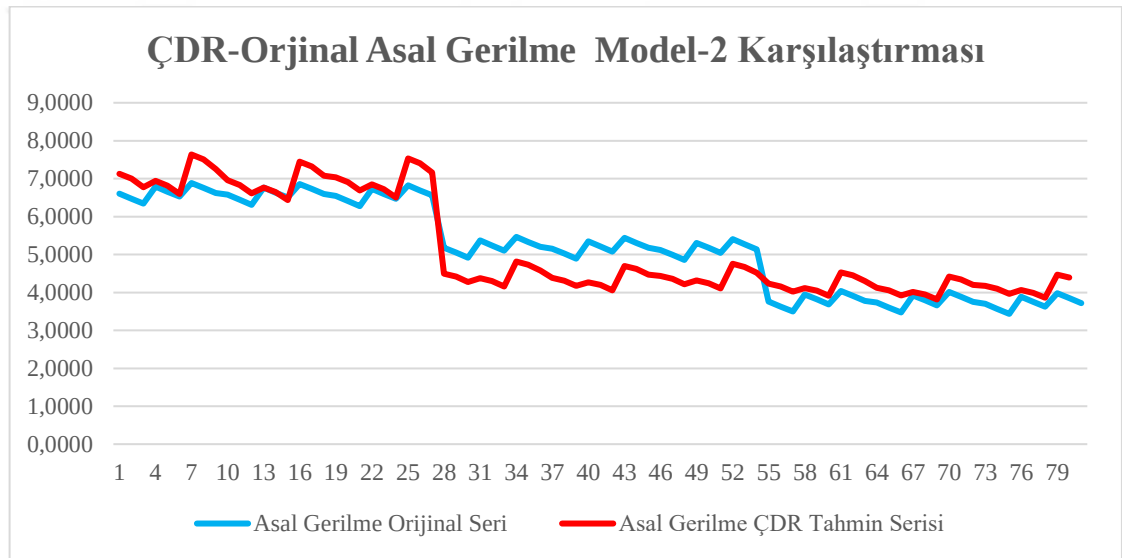


Şekil 88. Maksimum asal gerilme model 1 tahmin serisi orijinal seri regresyon model sonucu uyum grafiği

Şekil 88’de Asal gerilme model 1 sonuçlarının çok değişkenli regresyon tahmin modeli oluşturulmuş olup tahmin serisi ile orijinal serinin uyum grafiği çizilmiştir. Parametreleri farklı olan 28-55.’ci sonuçlarda uyumun biraz daha orijinal seriden uzaklaştığı görülmüştür. Bununla birlikte diğer gerilmelerde genel bir uyum görülmüştür. Şekil 89 da ise orijinal seri ile tahmin serisi dağılım grafiği çizilmiş ve belirlilik katsayısı $R^2=0,94$ olarak bulunmuştur. Ortalama karesel hata ($OKH=0,145$) bulunmuştur.

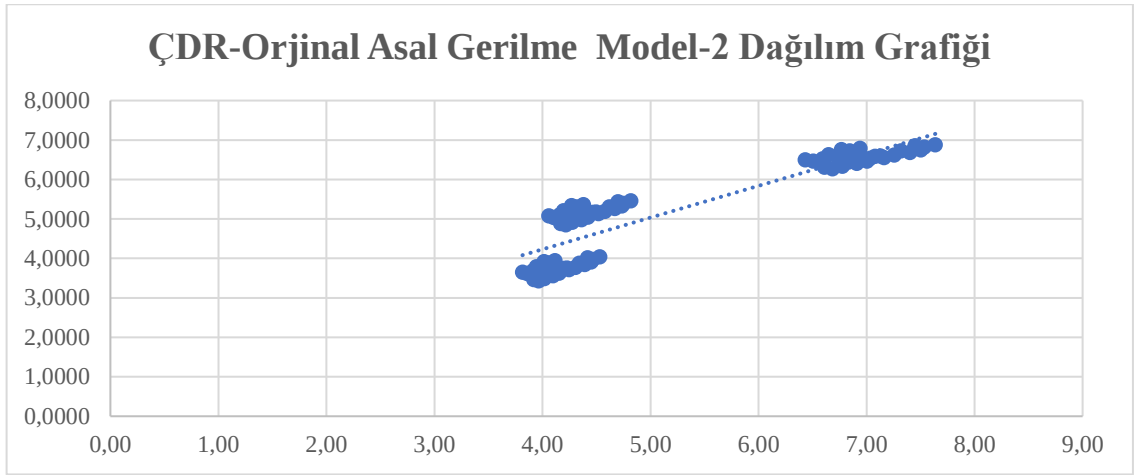


Şekil 89. Maksimum asal gerilme model 1 tahmin serisi orijinal seri regresyon model sonucu dağılım grafiği

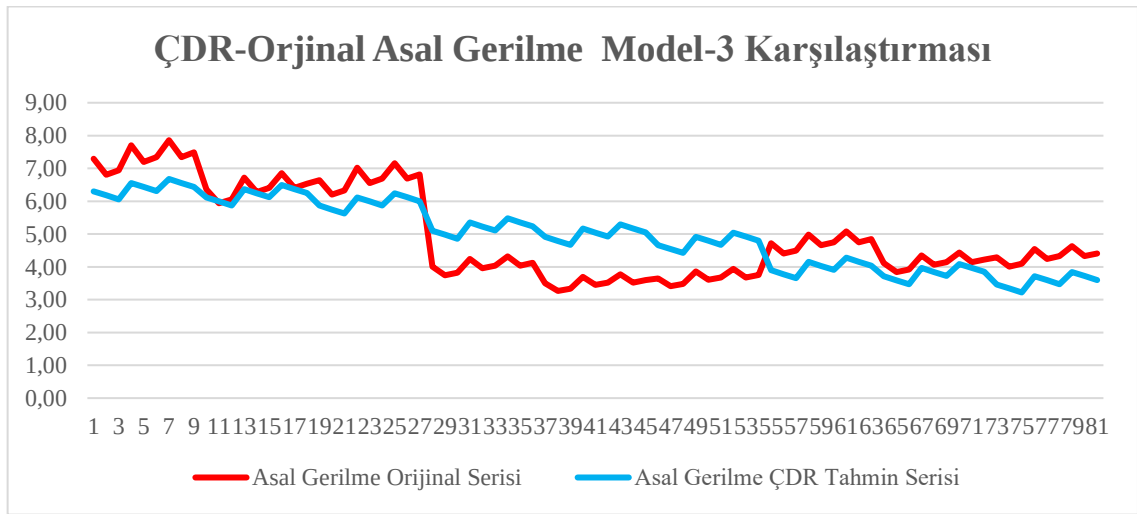


Şekil 90. Maksimum asal gerilme model 2 tahmin serisi orijinal seri regresyon model sonucu uyum grafiği

Şekil 90’da Asal gerilme model 2 sonuçlarının çok değişkenli regresyon tahmin model oluşturulmuş olup tahmin serisi ile orijinal serinin uyum grafiği çizilmiştir. Parametreleri farklı olan 27-55.’ci sonuçlarda uyumun biraz daha orijinal seriden uzaklaştığı görülmüştür. Bununla birlikte diğer gerilmelerde genel bir uyum görülmüştür. Şekil 91’de ise orijinal seri ile tahmin serisi dağılım grafiği çizilmiş ve belirlilik katsayısı $R^2=0,80$ olarak bulunmuştur. Ortalama karesel hata (OKH=0,356) bulunmuştur.

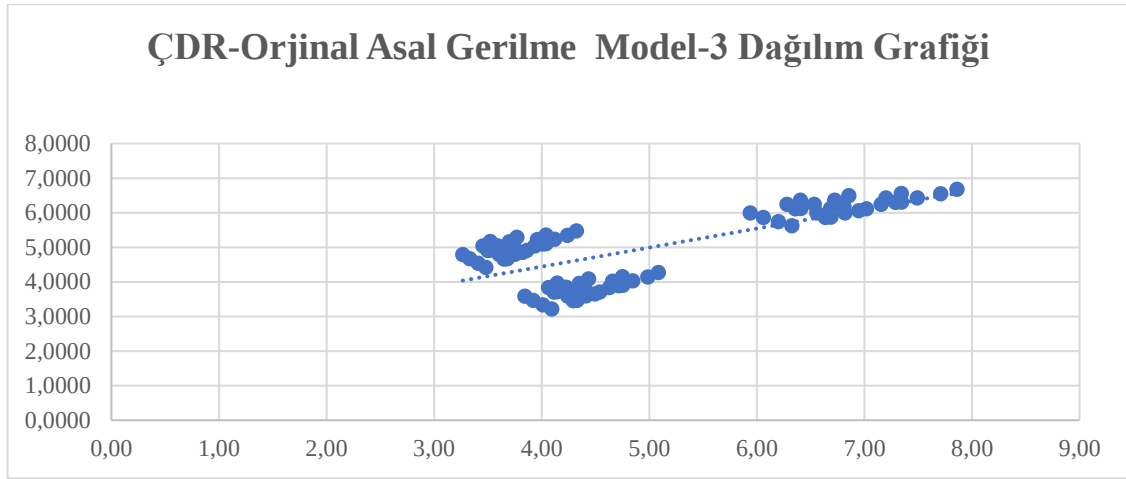


Şekil 91. Maksimum asal gerilme model 2 tahmin serisi orijinal seri regresyon model sonucu dağılım grafiği

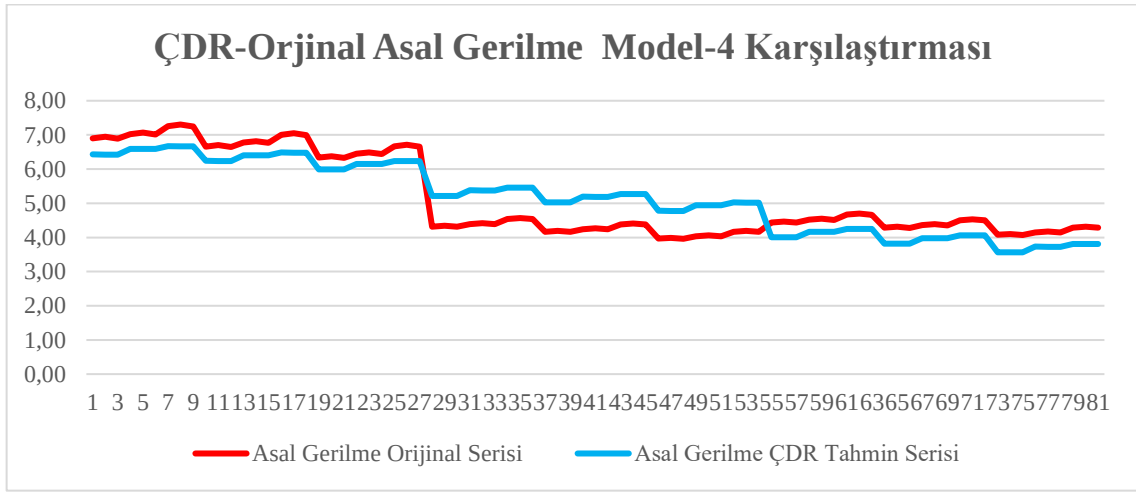


Şekil 92. Maksimum asal gerilme model 3 tahmin serisi orijinal seri regresyon model sonucu uyum grafiği

Şekil 92’de Asal gerilme model 3 sonuçlarının çok değişkenli regresyon tahmin model oluşturulmuş olup tahmin serisi ile orijinal serinin uyum grafiği çizilmiştir. Parametreleri farklı olan 27-55.’ci sonuçlarda uyumun biraz daha orijinal seriden uzaklaştığı görülmüştür. Bununla birlikte diğer gerilmelerde genel bir uyumsuzluk görülmüştür. Şekil 93’de ise orijinal seri ile tahmin serisi dağılım grafiği çizilmiş ve belirlilik katsayısı $R^2=0,55$ olarak bulunmuştur. Ortalama karesel hata (OKH=0,895) bulunmuştur. Belirlilik katsayısı orta değer altında bulunmuştur. Model-3 ün istatistiksel anlamı diğer modellere göre en anlamsız model olarak bulunmuştur.

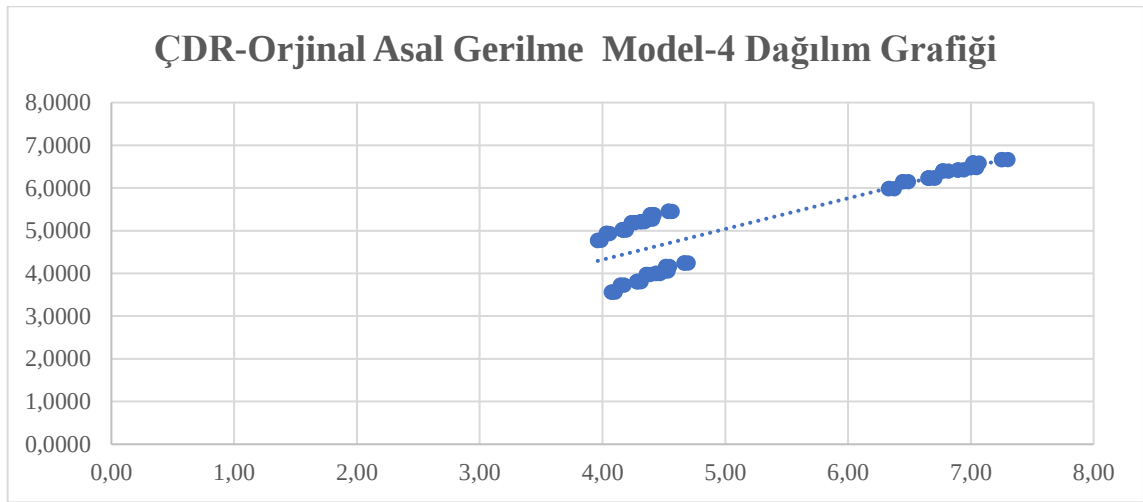


Şekil 93. Maksimum asal gerilme model 3 tahmin serisi orijinal seri regresyon model sonucu dağılım grafiği



Şekil 94. Maksimum asal gerilme model 4 tahmin serisi orijinal seri regresyon model sonucu uyum grafiği

Şekil 94’de Asal gerilme model 4 sonuçlarının çok değişkenli regresyon tahmin model oluşturulmuş olup tahmin serisi ile orijinal serinin uyum grafiği çizilmiştir. Parametreleri farklı olan 28-55.’ci sonuçlarda uyumun biraz daha orijinal seriden uzaklaştığı görülmüştür. Bununla birlikte diğer gerilmelerde genel bir uyum görülmüştür. Şekil 95’de ise orijinal seri ile tahmin serisi dağılım grafiği çizilmiş ve belirlilik katsayısı $R^2=0,72$ olarak bulunmuştur. Ortalama karesel hata ($OKH=0,425$) bulunmuştur.



Şekil 95. Maksimum asal gerilme model 4 tahmin serisi orijinal seri regresyon model sonucu dağılım grafiği

Tablo 40. ÇDR tahmin modellerinin karşılaştırılması

Model No:	Yöntem	Belirlilik Katsayısı (R ²)	Ortalama Karesel Hata (OKH)	Akaike Bilgi Kriteri (AIC)	Açıklama
Model-1	ÇDR	0,94	0,145	-125,48	İstatistiksel Olarak En Anlamlı Yöntem
Model-2	ÇDR	0,79	0,356	-118,64	
Model-3	ÇDR	0,53	0,895	-117,74	
Model-4	ÇDR	0,70	0,425	-119,82	

Tablo 40 incelendiğinde, çok değişkenli regresyon (ÇDR) yönteminde belirlilik katsayısı en yüksek olan (R²=0,94), ortalama karesel hatası en küçük olan (OKH=0,145) ve Akaike bilgi kriteri en düşük olan (AIC=-125,48) model-1'in istatistiksel olarak en anlamlı model olduğu tahmin edilen serisinin asal gerilmenin gerçek serisine en yakın seri olduğu görülmüştür. Maksimum asal gerilme denklemi Formül 24'de verilmiştir.

$$y_i = \beta_1 + \alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \epsilon_i \quad (23)$$

$$y_i = 11,156 - 36,707X_1 - 0,013X_2 + 1,135E - 5X_3 + 0,000X_4 \quad (24)$$

Burada;

Yi= Maksimum asal gerilme (MPa)

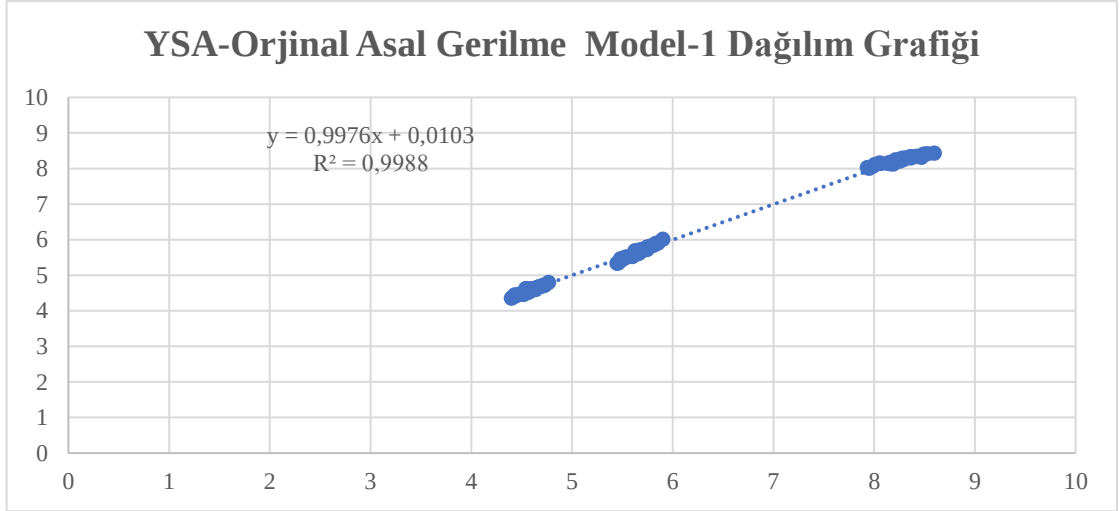
X₁= Plak kalınlığı (m)

X₂ = Enine derz aralığı (m)

X₃= Beton elastisite modülü (MPa)

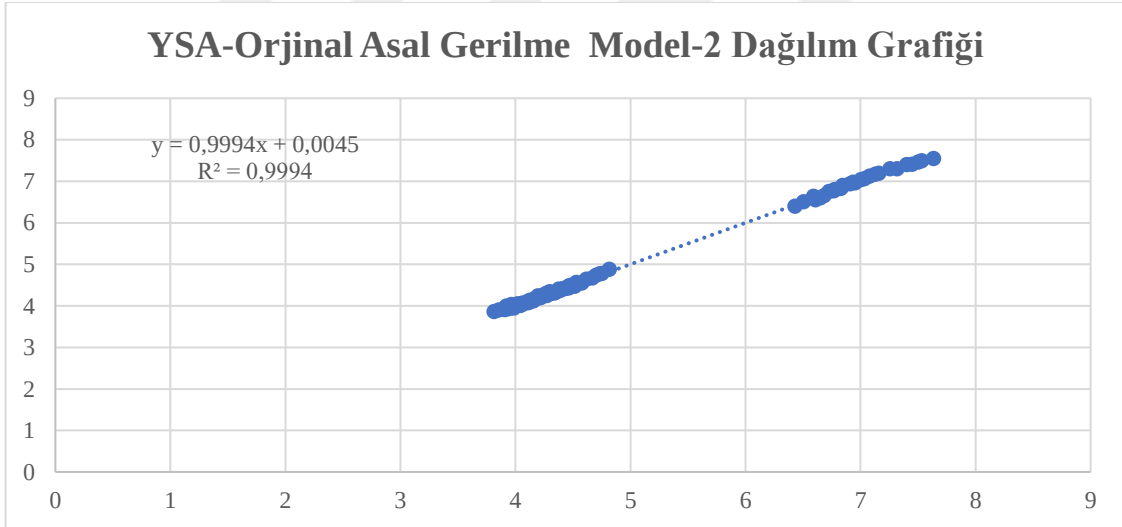
X₄ = BSK elastisite modülü (MPa)

Yapay Sinir Ağları (YSA) Model Sonuçlarının Değerlendirilmesi



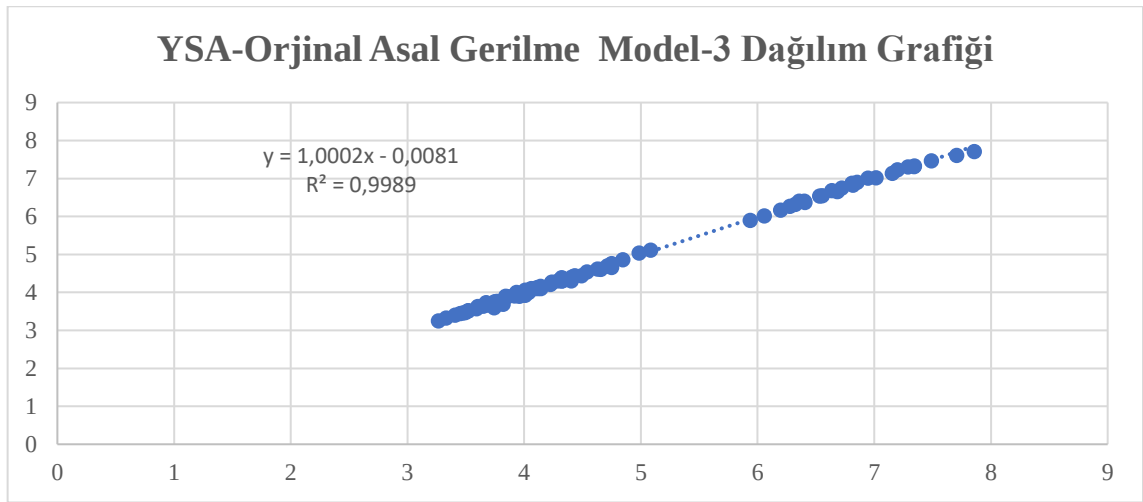
Şekil 96. Maksimum asal gerilme model 1 tahmin serisi orijinal seri YSA model sonucu dağılım grafiği

Şekil 96’da Asal gerilme model 1 sonuçlarının yapay sinir ağları (YSA) tahmin modeli oluşturulmuş olup tahmin serisi ile orijinal serinin dağılım grafiği çizilmiştir. $R^2=0,9988$ olarak bulunmuştur. Ortalama karesel hata (OKH=0,027) bulunmuştur.



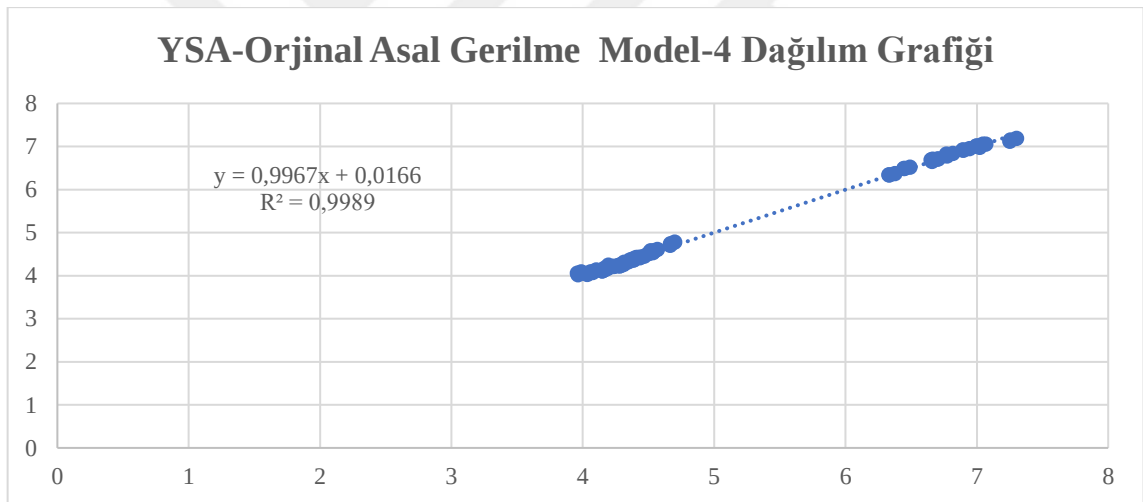
Şekil 97. Maksimum asal gerilme model 2 tahmin serisi orijinal seri YSA model sonucu dağılım grafiği

Şekil 97’de Asal gerilme model 2 sonuçlarının yapay sinir ağları (YSA) tahmin modeli oluşturulmuş olup tahmin serisi ile orijinal serinin dağılım grafiği çizilmiştir. $R^2=0,9994$ olarak bulunmuştur. Ortalama karesel hata (OKH=0,019) bulunmuştur. İstatistiksel olarak en anlamlı model olarak model -2 YSA’ da bulunmuştur.



Şekil 98. Maksimum asal gerilme model 3 tahmin serisi orijinal seri YSA model sonucu dağılım grafiği

Şekil 98’de Asal gerilme model 3 sonuçlarının yapay sinir ağları (YSA) tahmin model oluşturulmuş olup tahmin serisi ile orijinal serinin dağılım grafiği çizilmiştir. $R^2=0,9989$ olarak bulunmuştur. Ortalama karesel hata (OKH=0,027) bulunmuştur.



Şekil 99. Maksimum asal gerilme model 4 tahmin serisi orijinal seri YSA model sonucu dağılım grafiği

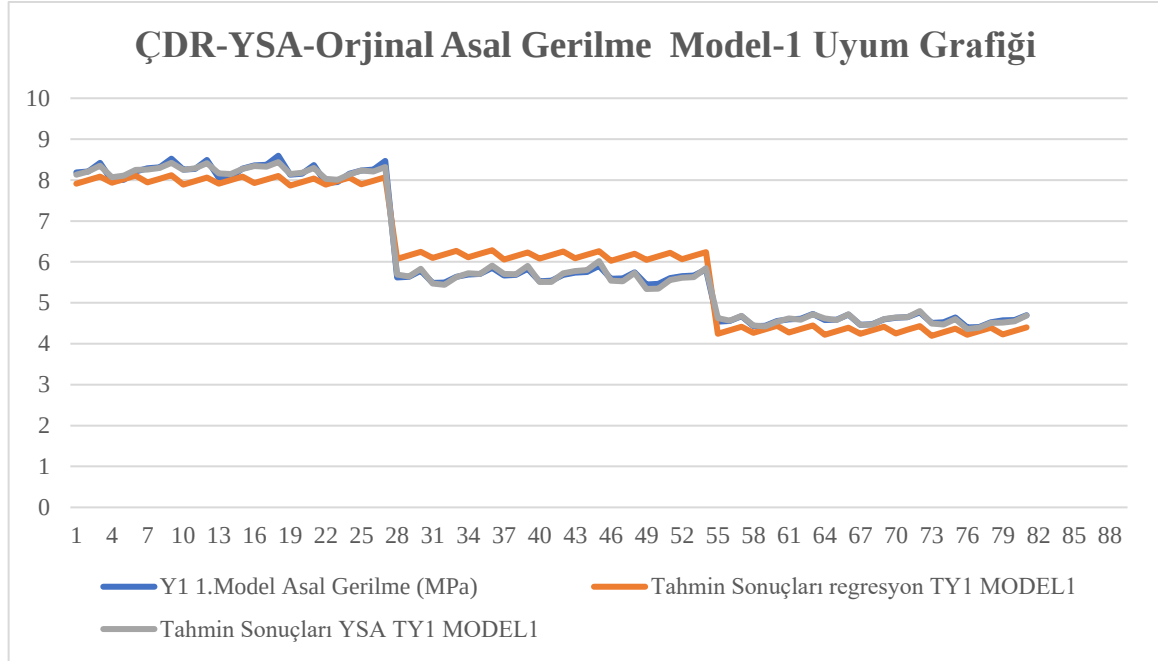
Şekil 99’da Asal gerilme model 4 sonuçlarının yapay sinir ağları (YSA) tahmin model oluşturulmuş olup tahmin serisi ile orijinal serinin dağılım grafiği çizilmiştir. $R^2=0,9989$ olarak bulunmuştur. Ortalama karesel hata (OKH=0,029) bulunmuştur.

Tablo 41. YSA tahmin modellerinin karşılaştırılması

Model No:	Yöntem	Belirlilik Katsayısı (R^2)	Ortalama Karesel Hata (OKH)	Akaike Bilgi Kriteri (AIC)	Açıklama
Model-1	YSA	0,9988	0,027	-357,73	İstatistiksel Olarak En Anlamlı Yöntem
Model-2	YSA	0,9994	0,019	-357,97	
Model-3	YSA	0,9989	0,027	-357,72	
Model-4	YSA	0,9989	0,029	-357,12	

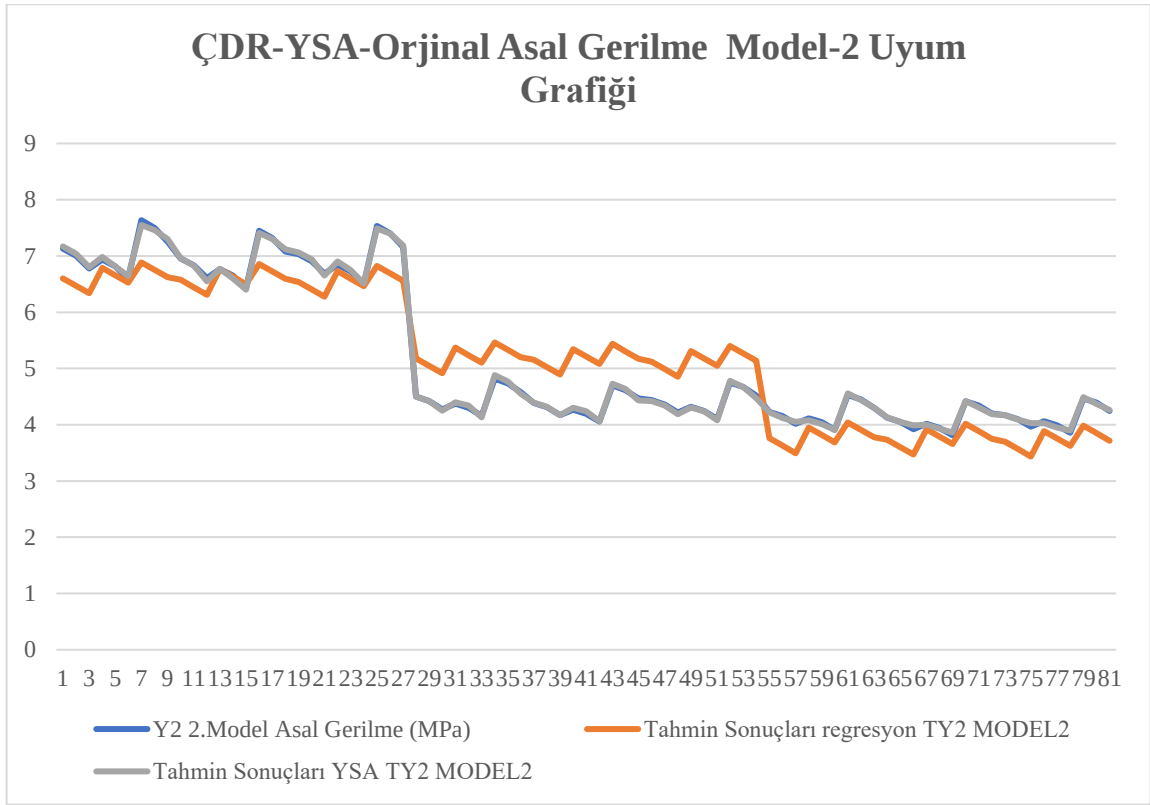
Tablo 41 incelendiğinde, yapay sinir ağları (YSA) yönteminde belirlilik katsayısı en yüksek olan ($R^2=0,9994$), ortalama karesel hatası en küçük olan ($OKH=0,019$) ve Akaike bilgi kriteri en düşük olan ($AIC=-357,97$) model-2'nin istatistiksel olarak en anlamlı model olduğu tahmin edilen serisinin asal gerilmenin gerçek serisine en yakın seri olduğu görülmüştür.

ÇDR ve YSA Model Sonuçlarının Karşılaştırılması



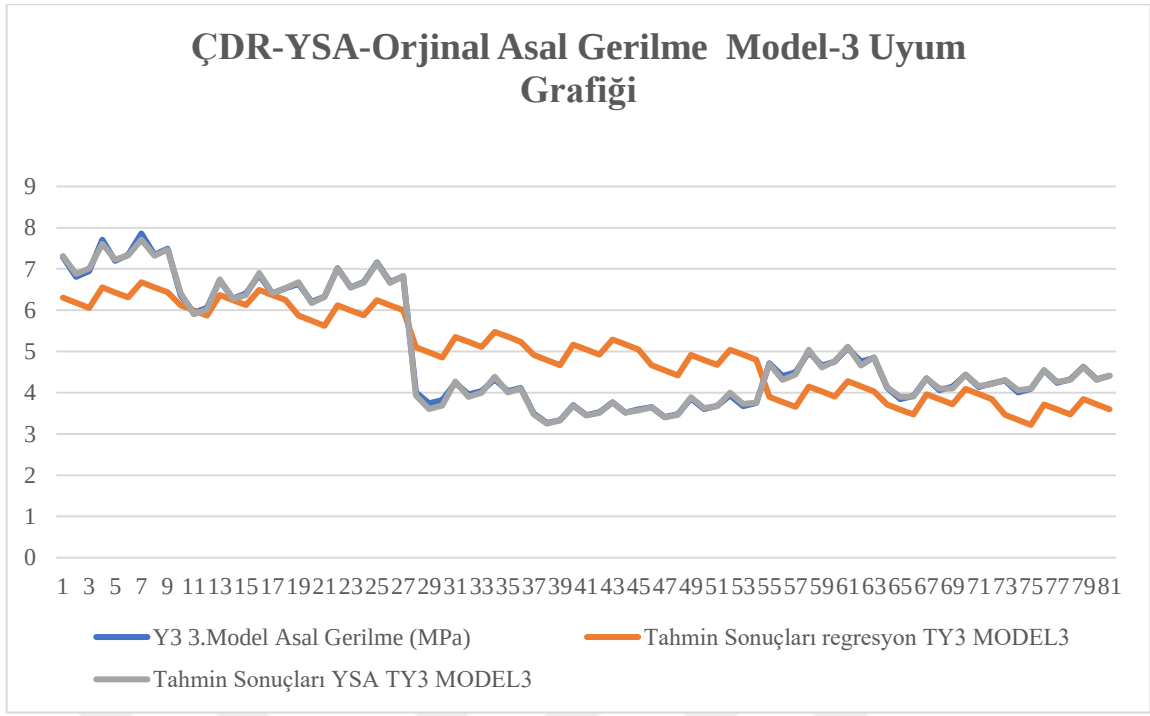
Şekil 100. Maksimum asal gerilme model 1 orijinal seri, regresyon tahmin serisi, YSA tahmin serisi uyum grafiği

Şekil 100'de Asal gerilme model 1 sonuçlarının çok değişkenli regresyon tahmin modeli ile YSA tahmin model sonuçlarının, orijinal seri ile uyum grafiği çizilmiştir. Parametreleri farklı olan 28-52.'ci sonuçlarda uyumun biraz daha orijinal seriden uzaklaştığı görülmüştür. Bununla birlikte diğer gerilmelerde genel bir uyum gözlemlenmiştir.



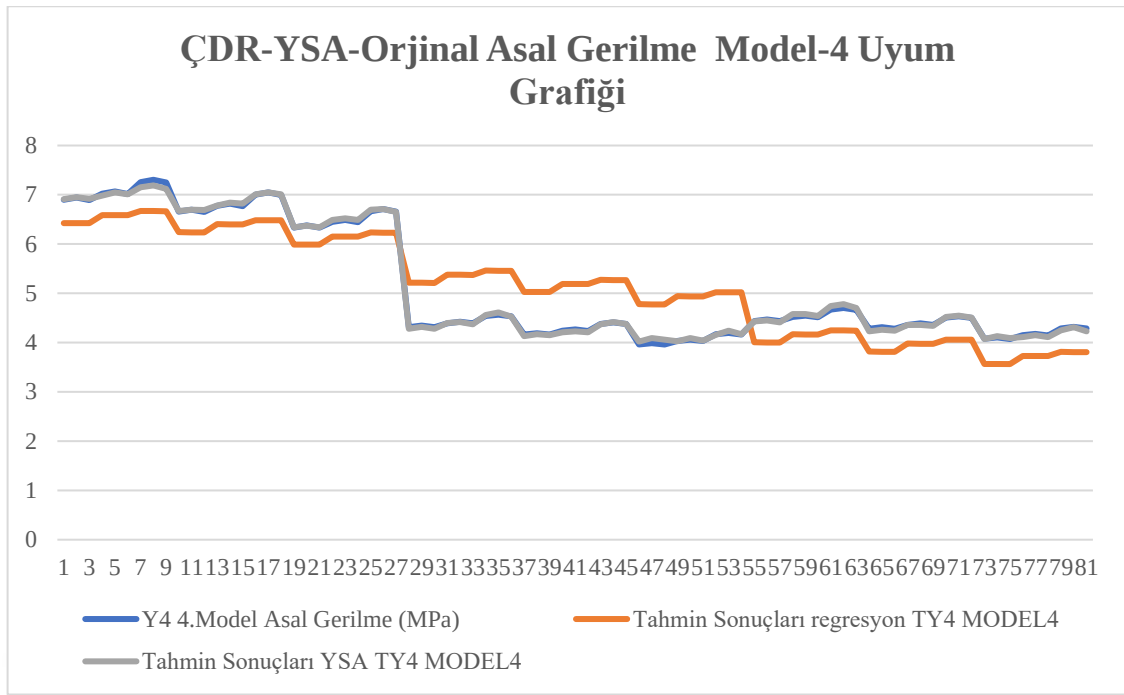
Şekil 101. Maksimum asal gerilme model 2 orijinal seri, regresyon tahmin serisi, YSA tahmin serisi uyum grafiği

Şekil 101’de Asal gerilme model 2 sonuçlarının çok değişkenli regresyon tahmin modeli ile YSA tahmin model sonuçlarının, orijinal seri ile uyum grafiği çizilmiştir. Parametreleri farklı olan 28-52.’ci sonuçlarda uyumun biraz daha orijinal seriden uzaklaştığı görülmüştür. Bununla birlikte diğer gerilmelerde genel bir uyum gözlemlenmiştir.



Şekil 102. Maksimum asal gerilme model 3 orijinal seri, regresyon tahmin serisi, YSA tahmin serisi uyum grafiği

Şekil 102’de Asal gerilme model 3 sonuçlarının çok değişkenli regresyon tahmin modeli ile YSA tahmin model sonuçlarının, orijinal seri ile uyum grafiği çizilmiştir. Parametreleri farklı olan 28-52.’ci sonuçlarda uyumun biraz daha orijinal seriden uzaklaştığı görülmüştür. Bununla birlikte diğer gerilmelerde genel bir uyum gözlemlenmiştir.



Şekil 103. Maksimum asal gerilme model 4 orijinal seri, regresyon tahmin serisi, YSA tahmin serisi uyum grafiği

Şekil 103’de Asal gerilme model 4 sonuçlarının çok değişkenli regresyon tahmin modeli ile YSA tahmin model sonuçlarının, orijinal seri ile uyum grafiği çizilmiştir. Parametreleri farklı olan 28-52.’ci sonuçlarda uyumun biraz daha orijinal seriden uzaklaştığı görülmüştür. Bununla birlikte diğer gerilmelerde genel bir uyum gözlemlenmiştir.

SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmada, yapısal ve işlevsel bozulmalara maruz kalarak servis kabiliyetini kaybetmiş bir BSK kaplamanın hizmet ömrünün uzatılması amacıyla üzerine yapılacak bağ kurulmamış beton kaplama tasarımı için plak üzerinde en kritik yükleme durumu olan kenar ve derz yüklemesi, tam konfigürasyon dingil tipi yüklemesi ve beton plak kalınlığı boyunca değişen bilineer sıcaklık dağılımı kullanılarak, beton kaplama altında meydana gelen maksimum asal gerilmenin betonun kopma modülü altında kalmasını sağlayan; beton sınıfı, plak kalınlık ve boyutları 3 boyutlu non lineer sonlu elemanlar analizi (ANSYS) ile belirlenmiş ve AASHTO yöntemi ile karşılaştırılmıştır. Üstyapı tabakalarının kalınlık ve malzeme özellikleri AASHTO tasarım yöntemine göre belirlenerek en kötü şartlar göz önünde bulundurulmuştur. Üstyapı tasarımında etkili faktörlerin ve bu faktörlere bağlı olarak bulunacak çözümlerin son derece fazla olması nedeniyle sonlu eleman analizleri özel bir deney tasarım tekniği olan Taguchi Metoduna göre yapılmıştır. Ülkemiz karayollarında en fazla görülen 1.2, 1.22, 1.122 ve 1.2+111 dingil tiplerine sahip ağır vasıtalar kullanılmıştır. Analiz sonuçları arasındaki sayısal ilişki, çok değişkenli regresyon ile yapay sinir ağları yöntemleri kullanılarak incelenmiştir. Çok değişkenli regresyon yönteminde en anlamlı bulunan model 1 (1.2 kritik dingil tipi) için çalışılan parametreler kullanılarak maksimum asal gerilmeyi tahmin eden model kurulmuştur.

Sıcaklık farkları ile ilgili daha önce yapılmış olan literatür çalışmalarından hareket edilerek beton plak kalınlığı boyunca oluşan sıcaklık dağılımlarının önerilen bilineer formüller ile hesaplanabileceği gösterilmiştir.

Yapılan optimizasyonlarda beton plak altında oluşan maksimum asal gerilmeler üzerinde en etkili olan parametrenin plak kalınlığı olduğu görülmüştür.

Yapılan optimizasyonlarda kritik dingil tipinin 1.2 olduğu görülmüştür. 1.22, 1.122 ve 1.2+111 dingil tipleri için 0,15 m beton plak kalınlığının yeterli olduğu ancak 1.2 dingil tipi için yeterli olmadığı görülmüştür. 1.2 dingil tipi için ise minimum beton plak kalınlığı 0,20 m ve kullanılması gereken beton sınıflarının C45/55 ile C50/60 olduğu görülmüştür. Bu durum ise üstyapı tasarımında tek, tandem veya tridem dingil yüklemesi ile tasarım yapılması yerine tam konfigürasyon dingil yüklemesi ile tasarım yapılması gerektiğini ortaya koymuştur.

AASHTO yöntemi kullanılarak C40/50, C45/55 ve C50/60 beton sınıfları için gerekli beton kaplama kalınlıkları sırasıyla 0,222 m, 0,217 m ve 0,206 m olarak hesaplanmıştır. Kritik 1.2 dingil tipi yüklemesi için yapılan optimizasyonlarda, C40/50 beton sınıfı için plak altında

oluşan maksimum asal gerilmenin beton kopma modülünün üstünde olduğu görülmüştür. Dolayısıyla C45/55 ve C50/60 beton sınıfları için gerekli minimum beton kalınlığının 0,20 m olduğu görülmüştür. AASHTO yöntemi ve sonlu elemanlar yöntemi ile birbirlerine yakın plak kalınlıkları bulunmuştur.

Seçilen yükleme parametreleri altında, kötü ve orta durum arasındaki BSK kaplamaların iyileştirilerek hizmet ömrünün uzatılması amacıyla üzerine minimum C45/55 sınıfında ve 0,20 m kalınlığında bağ kurulmamış donatısız beton kaplama yapılması önerilmiştir.

Aynı yükleme parametreleri kullanılarak C20/25, C25/30, C30/37 beton sınıfları için de Taguchi optimizasyonu ile sonlu eleman analizleri yapılmıştır. Beton plak altındaki çekme gerilmelerinin karşılanabilmesi amacıyla 8 mm çapında çeliklerden oluşan hasır donatının plak çekme bölgesine yerleştirilmesiyle 0,20 m plak kalınlığının ve daha düşük basınç dayanım sınıflarının (C20/25, C25/30, C30/37, C35/45, C40/50) kullanılabilmesi önerilmiştir.

Kalınlığı 0,10 m olan beton plaklar için yüklemeden dolayı plak altında oluşan maksimum asal gerilmelerin seçilen yükleme değerleri altında daha önemli olduğu görülmüştür. Kalınlığı 0,20 m olan beton plaklar için yalnız sıcaklıktan dolayı plak altında oluşan maksimum asal gerilmelerin seçilen yükleme parametreleri altında daha önemli olduğu görülmüştür.

Beton plak kalınlığının artması ile sıcaklık farkından doğan gerilmeler de artmaktadır. Kalınlığı 0,15 m'den fazla olan beton plaklar için, plak üstü ve altındaki sıcaklık farkının azaltılması amacıyla beton karışımında çeşitli alternatif malzemeler kullanılabilir.

Beton plak kalınlığının artması ile sıcaklık farkından dolayı beton kaplama altında oluşan maksimum yer değiştirme miktarının arttığı görülmüştür. Bu durumun sebebinin ise beton kalınlığının artması ile beton plak altı ve üstü arasındaki sıcaklık farkının artması olarak düşünülmüştür. Beton plak kalınlığının sabit tutulup beton, asfalt ve temel tabakalarının malzeme özellikleri ile enine derz aralıklarının değiştirilmesi durumunda maksimum yer değiştirme miktarının yaklaşık olarak aynı kaldığı görülmüştür. Bu durum nedeniyle sıcaklık farklarından dolayı oluşacak maksimum yer değiştirme miktarının daha çok beton plak kalınlığı ile ilişkili olduğu düşünülmüştür.

Plak boyunun maksimum asal gerilme üzerinde etkisinin az olduğu görülmüştür. Ancak derz aralığının artmasıyla meydana gelen çatlamların da artacağı göz önünde bulundurulmalıdır.

Beton elastisite modülünün artmasıyla plak altında meydana gelen maksimum asal gerilme değerlerinde; 2 ve 3 dingilli araç yüklemeleri için birbirine yakın değerler olmak üzere

önce azalış sonra artma meyili, 4 ve 5 dingilli araç yüklemeleri için birbirine yakın değerler olmak üzere artış meyili görülmüştür.

BSK kaplama elastisite modülünün maksimum asal gerilme üzerindeki etkisinin bağ kurulmamış tasarım şeklinin seçilmiş olması nedeniyle az olduğu görülmüştür.

BSK, alt temel ve temel özelliklerindeki varyasyonların beton kaplama altında indüklenen maksimum asal gerilmeler üzerinde minimum etkiye sahip olduğu bulunmuştur. Bu nedenle bağ kurulmamış beton kaplama tasarımının çok çeşitli BSK, alt temel ve temel durumları için uygun olduğu düşünülmüştür.

Maksimum asal gerilme tahmin edilirken dört adet bağımsız değişken kullanılmış olup, iki farklı istatistiksel yöntem ile karşılaştırılmıştır. Yapay sinir ağları ve çok değişkenli regresyon yöntemleri dört farklı model üzerinde çalışılmıştır.

Çok değişkenli regresyon (ÇDR) yönteminde belirlilik katsayısı en yüksek olan ($R^2=0,94$), ortalama karesel hatası en küçük olan ($OKH=0,145$) ve Akaike bilgi kriteri en düşük olan ($AIC=-125,48$) model-1'in (1.2 dingil tipinin) istatistiksel olarak en anlamlı model olduğu, tahmin edilen serisinin asal gerilmenin gerçek serisine en yakın seri olduğu görülmüştür.

Yapay sinir ağları (YSA) yönteminde ise belirlilik katsayısı en yüksek olan ($R^2=0,9994$), ortalama karesel hatası en küçük olan ($OKH=0,019$) ve Akaike bilgi kriteri en düşük olan ($AIC=-357,97$) model-2'nin (1.22 dingil tipinin) istatistiksel olarak en anlamlı model olduğu, tahmin edilen serisinin asal gerilmenin gerçek serisine en yakın seri olduğu görülmüştür.

Bu çalışmada kırsal yollar esas alınarak enine derzlerde kayma donatıları ve boyuna derzlerde ise bağlantı donatıları kullanılmamıştır. Bundan sonra yapılacak çalışmalarda kayma ve bağlantı donatıları kullanılarak kentsel yollar için, tam konfigürasyon dingil tipi kullanılarak ve beton plak kalınlığı boyunca oluşan farklı sıcaklık dağılımları önerilen formüllerle hesaplanarak üstyapı tasarımları yapılabilir.

KAYNAKLAR

- AASHTO. (1993). AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, Highway, AAoS Officials, T. In: Aashto.
- AASHTO. (2008a). Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide, Manual of Practice: American Association of State Highway and Transportation Officials
- ACI. (2006). Concrete Overlays for Pavement Rehabilitation. ACI Committee 325,
- ACPA. (1990). Guidelines for Bonded Concrete Overlays.
- ACPA. (1994). Accelerated Rigid Paving Techniques : State-of-the-Art Report (Special Project 201). Retrieved from
- ACPA. (1995). Whitetopping restores air traffic at spirit of St. Louis. ACPA Publication, RP241P(American Concrete Pavement Association), 5.
- ACPA. (1998). Whitetopping-State of the Practice.
- ACPA. (2000). Whitetopping: The Road to Renewal. ACPA Publication, PL452P(American Concrete Pavement Association, Skokie, Ill).
- ACPA. (2020). American Concrete Pavement Association Bonded Concrete Overlay on Asphalt (BCOA) Thickness Designer (<http://apps.acpa.org/apps/bcoa.aspx>).
- Ağar, E., Süttaş, İ. and Öztaş, G. (1998). Beton yollar: rijit yol üstyapıları; malzeme-tasarım-üretim-yapım-bakım teknikleri: İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Akpınar, M. V. (2008). Effects of truck load position on longitudinal joint deterioration.
- Akpınar, M. V. (2016). Effect of glass bead and zeolite in concrete under high temperature. International Journal of Research-GRANTHAALAYAH, 4(12), 65-71.
- Akpınar, M. V. (2017). Hızlandırılmış Yol Testleri ve Ulaştırma Sektörüne Katkıları. Türkiye Mühendislik Haberleri, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, 4(496), 33-38.
- Akyol, O. A. (2004). Yürüyen Merdiven Taşıyıcı Sisteminin Sonlu Elemanlar Metodu İle Mukavemet Analizinin Yapılması Ve Tahrik Sisteminin Hesabı.
- Armaghani, J. M., Larsen, T. J. and Smith, L. L. (1987). Temperature response of concrete pavements.
- Association, C. R. M. C. (1993). Whitetopping in Colorado: Do it Right the Second Time. Retrieved from Denver:
- Austroroads. (2017). Guide to pavement technology: part 2: pavement structural design Austroroads: Austroroads.
- Bayrak, O. (2007). Rijit üstyapı tasarımına yeni bir yaklaşım. Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 1s.
- Bissonnette, B., Courard, L., Fowler, D. W. and Granju, J.-L. (2011). Bonded Cement-based Material Overlays for the Repair, the Lining or the Strengthening of Slabs or Pavements: State-of-the-art Report of the RILEM Technical Committee 193-RLS (Vol. 3): Springer Science & Business Media.
- Boussinesq, J. (1969). Application des Potentials a l'Etude de l'Equilibre et du Mouvement des Solides Elastiques (Gauthier-Villars, Paris, 1885). Applications of the Potential to the Research of the Equilibrium and Movement of Elastic Solids).
- Bradbury, R. D. (1938). Reinforced concrete pavements.
- Branch, D. (1998). Guidelines for the thickness design of bonded whitetopping pavement in the State of Colorado.
- Buress, J. T. F., R. (2000). The First Ultra-Thin Whitetopping of a General Aviation Airport Runway (Savannah, Tennessee). Retrieved from
- Burnham, T. (2006). MnROAD Lessons Learned: Thin and Ultra-Thin Concrete Overlays. Supplementary Unpublished Report for Lessons Learned Project, Contract(81655).
- Byrum, C. and Hansen, W. (1994). Influence function approach to analysis of jointed portland cement concrete pavement. Transportation research record, 148-148.

- Cable, J. K., Fanous, F. S., Ceylan, H., Wood, D., Frentress, D., Tabbert, T. R., . . . Gopalakrishnan, K. (2005). Design and Construction Procedures for Concrete Overlay and Widening of Existing Pavements.
- Chabot, A., Hun, M. and Hammoum, F. (2013). Mechanical analysis of a mixed mode debonding test for “composite” pavements. *Construction and Building Materials*, 40, 1076-1087.
- Chen, D. H., Won, M., Chen, X. and Zhou, W. (2016). Design improvements to enhance the performance of thin and ultra-thin concrete overlays in Texas. *Construction and Building Materials*, 116, 1-14.
- Cheung, Y. and Zinkiewicz, O. (1965). Plates and tanks on elastic foundations—an application of finite element method. *International Journal of Solids and Structures*, 1(4), 451-461.
- Choubane, B. and Tia, M. (1992). Nonlinear temperature gradient effect on maximum warping stresses in rigid pavements. *Transportation research record*, 1370(1), 11.
- Cole, L. W. (1997). Pavement condition surveys of ultrathin whitetopping projects. Paper presented at the International Purdue Conference on Concrete Pavement Design and Materials for High Performance, 6th, 1997, Indianapolis, Indiana, USA.
- Cole, L. W. and Mohsen, J. (1993). Ultrathin Concrete Overlays on Asphalt. Paper presented at the TRANSPORTATION AND NATIONAL PROSPERITY-PROCEEDINGS OF THE 1993 ANNUAL CONFERENCE OF THE TRANSPORTATION ASSOCIATION OF CANADA, OTTAWA, ONTARIO, SEPTEMBER 19 TO 22, 1993, VOLUME 1.
- Çam, Y. and Özdemir, H. (2005). Yanal Delaminasyon Bölgesi İçeren Termoplastik Tabakalı Kompozitlerde Burkulma Analizi. Bitirme Projesi, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, İzmir.
- Çelik, M. (2014). Karadeniz Bölgesi köy yolları için rijit ve esnek kaplamanın mekanistik ve maliyet açısından karşılaştırılması. Karadeniz Teknik Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü,
- Çelik, M., Seferoğlu, M. T., Akpınar, M. V. and Seferoğlu, A. G. (2020). Beton Yol Uygulamalarında Derz Türlerine Göre Düşey Deplasman Oluşumlarının İncelenmesi ve Maliyet Analizi: Trabzon-Rize Örneği. *El-Cezerî Journal of Science and Engineering* Vol: 7, No: 2, 2020 (474-486) DOI:10.31202/ecjse.656138.
- Darestani, M. Y. (2007). Response of concrete pavements under moving vehicular loads and environmental effects. Queensland University of Technology,
- Darter, M. I., Hall, K. T. and Kuo, C.-M. (1995). Support under Portland cement concrete pavements.
- Davids, W. G. and Mahoney, J. P. (1999). Experimental verification of rigid pavement joint load transfer modeling with EverFE. *Transportation research record*, 1684(1), 81-89.
- Delatte, N. and Sehdev, A. (2003). Mechanical properties and durability of bonded-concrete overlays and ultrathin whitetopping concrete. *Transportation research record*, 1834(1), 16-23.
- Dhananjay, M. and Abhilash, K. (2014). Study of thermal gradient in concrete slabs through experimental approach. *Global Journal of Researches in Engineering: Civil Structural Engineering*, 14(5).
- Diakhaté, M., Millien, A., Petit, C., Phelipot-Mardelé, A. and Pouteau, B. (2011). Experimental investigation of tack coat fatigue performance: Towards an improved lifetime assessment of pavement structure interfaces. *Construction and Building Materials*, 25(2), 1123-1133.
- Diallo, A. O. (2019). Beton yol üstü asfalt kaplamaların sonlu elemanlar yöntemi ile mekanistik analizi. Karadeniz Teknik Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü,
- Douglas, R. A., Woodward, W. D. and Woodside, A. (2000). Road contact stresses and forces under tires with low inflation pressure. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 27(6), 1248-1258.

- Eacker, M. J. (2004). Three Year Evaluation of Whitetopping Project on M-46. Retrieved from
- Ersoy, U. and Özcebe, G. (2001). Betonarme: temel ilkeler. TS-500 ve Türk Deprem Yönetmeliğine Göre Hesap, Ankara, Bizim Büro Basımevi.
- Fwa, T., Shi, X. and Tan, S. (1996). Analysis of concrete pavements by rectangular thick-plate model. *Journal of Transportation Engineering*, 122(2), 146-154.
- Gillespie, T. D. (1993). Effects of heavy-vehicle characteristics on pavement response and performance (Vol. 353): Transportation Research Board.
- Granju, J.-L., Sabathier, V., Turatsinze, A. and Toumi, A. (2004). Interface between an old concrete and a bonded overlay: debonding mechanism. *Interface science*, 12(4), 381-388.
- Griffiths, G. and Thom, N. (2000). Concrete pavement design guidance notes: CRC Press.
- Haichang, H. (1981). Variational Principles of Elastic Mechanics and Applications. In: Beijing: science press.
- Hall, K. T., Correa, C. E., Carpenter, S. H. and Elliot, R. P. (2001). Rehabilitation strategies for highway pavements. National Cooperative Highway Research Program, Web Document, 35.
- Hallin, J. P. (2004). Development of the 2002 guide for the design of new and rehabilitated pavement structures: Phase II. Report for National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, National Research Council.
- Han, C. (2005). Synthesis of current Minnesota practices of thin and ultra-thin whitetopping. Retrieved from
- Hansen, W., Staton, J. F. and Bennett, A. (2017). US-23 aggregate test road long-term performance evaluation. Retrieved from
- Harrington, D., DeGraff, D., Rasmussen, R. O., Gross, J., Grove, J., Mack, J., Wathne, L. (2008). Guide to Concrete Overlays Sustainable Solutions for Resurfacing and Rehabilitating Existing Pavements Second Edition.
- Harrington, D., Fick, G., Bordeleon, A., Cable, J., DeGraff, D., Parkes, N., . . . Vandenbossche, J. (2014). Guide to Concrete Overlays Sustainable Solutions for Resurfacing and Rehabilitating Existing Pavements Third Edition.
- Hoerner, T. E. (2001). PCC pavement evaluation and rehabilitation : reference manual. [Arlington, VA]; Springfield, Va.: U.S. Dept. of Transportation, Federal Highway Administration, National Highway Institute ; Available to the public through the National Technical Information Service.
- Hogg, A. (1938). XLVIII. Equilibrium of a thin plate, symmetrically loaded, resting on an elastic foundation of infinite depth. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 25(168), 576-582.
- Hrennikoff, A. (1941). Solution of problems of elasticity by the framework method. *J. appl. Mech.*
- 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), 28-36.
- Huang, Y. H. (2004). Pavement analysis and design (Second Edition).
- Hudson, S. W. and Seeds, S. B. (1988). Evaluation of increased pavement loading and tire pressures. *Transportation research record*(1207).
- Hutchinson, R. (1982). Resurfacing with Portland Cement Concrete, NCHRP Synthesis of Highway Practice 99. Transportation Research Board (TRB), Washington, DC.
- İlcalı, M., Tayfur, S., Özen, H., Sönmez, İ. and Eren, K. (2001). Asfalt ve uygulamaları (Vol. 1).
- Institute, A. (1994). Alternatives in Pavement Maintenance, Rehabilitation, and Reconstruction,. Asphalt Institute Lexington, Ky., Publication IS-178,.
- Institute, A. (1996). Pavement Rehabilitation—Preparation for Asphalt Overlays. Asphalt Institute Lexington, Ky., Publication CL-5,.

- Ioannides, A., Thompson, M. R. and Barenberg, E. J. (1985). Westergaard solutions reconsidered. *Transportation research record*, 1043, 13-23.
- Ioannides, A. M. (1991). Theoretical Implications of the AASHTO 1986 nondestructive testing method 2 for pavement evaluation. *Transportation research record*(1307).
- Ioannides, A. M. and Khazanovich, L. (1998). Nonlinear temperature effects on multilayered concrete pavements. *Journal of Transportation Engineering*, 124(2), 128-136.
- Isla, F., Luccioni, B., Ruano, G., Torrijos, M., Morea, F., Giaccio, G. and Zerbino, R. (2015). Mechanical response of fiber reinforced concrete overlays over asphalt concrete substrate: experimental results and numerical simulation. *Construction and Building Materials*, 93, 1022-1033.
- Jayakesh, K. and Suresha, S. (2018). Experimental investigation of interface treatment technique on interface shear bond fatigue behavior of Ultra-Thin Whitetopping. *Construction and Building Materials*, 161, 489-500.
- Kamalakara, G. K., Srikanth, M. N., Sachin, B. K., Vijaykumar, S. K., Siddharam, B. W. and Sushmitha, M. (2018). Study of temperature differential in different types of concrete slabs. *IJRAR- International Journal of Research and Analytical Reviews*, 5(2).
- Karaca, Z., Pancar, E. and Akpınar, M. (2015). EFFECT OF GROOVE WIDTH AND SHAPE ON CONCRETE PAVEMENT SKID RESISTANCE. ", *International Journal of Innovation Sciences and Research*, 4, 081-086.
- Karpuz, O., Akpınar, M. V. and Aydin, M. M. (2017). Effects of fine aggregate abrasion resistance and its fineness module on wear resistance of Portland cement concrete pavements. *Revista de la construcción*, 16(1), 126-132.
- Karunarathne, A., Mampearachchi, W. and Nanayakkara, A. (2010). Modelling of thermal effects due to solar radiation on concrete pavements. Sri Lanka: University of Moratuwa.
- Kayıpmaz, M. T. (2019). Beton Yollarda Isıl Genleşmeye Bağlı Gerilmelerin Araştırılması. Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı.
- KGM. (2016). Karayollarında Ağır Taşıt Trafikinin ve Yük Taşımacılığının Özellikleri ve Eğilimleri, 2010 - 2011 - 2012 - 2013 - 2014 Yılı Etüt Sonuçları, Trafik Güvenliği Dairesi Başkanlığı Ulaşım Etütleri Şubesi Müdürlüğü.
- KGM. (2020). Karayolları Trafik ve Ulaşım Bilgileri, Otoyollar ve Devlet Yollarının Trafik Dilimlerine Göre Yıllık Ortalama Günlük Trafik Değerleri ve Ulaşım Bilgileri, Trafik Güvenliği Dairesi Başkanlığı Ulaşım Etütleri Şubesi Müdürlüğü.
- Kim, K. (2017). Enhanced Finite Element Analysis Tools And Instrumentation Method To Evaluate The Structural Behavior Of Non-Conventional Concrete Pavements A Dissertation Presented To The Graduate School Of The University Of Florida In Partial Fulfillment Of The Requirements For The Degree Of Doctor Of Philosophy University Of Florida.
- Kim, K. and Chun, S. (2015). Evaluation of internally cured concrete pavement using environmental responses and critical stress analysis. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 9(4), 463-473.
- Kim, S.-M. and Nam, J.-H. (2010). Measurements and experimental analysis of temperature variations in Portland cement concrete pavement systems. *Road materials and pavement design*, 11(3), 745-771.
- Kim, S.-M., Won, M. C. and Frank McCullough, B. (2002). Dynamic stress response of concrete pavements to moving tandem-axle loads. *Transportation research record*, 1809(1), 32-41.
- Kim, Y. K. and Lee, S. W. (2013). Performance evaluation of bonded concrete overlay. *Construction and Building Materials*, 49, 464-470.
- Korkiala-Tanttu, L. (2009). Calculation method for permanent deformation of unbound pavement materials: VTT.

- Kumara, W., Tia, M., Wu, C.-L. and Choubane, B. (2003). Evaluation of applicability of ultra-thin whitetopping (UTW) in Florida. Paper presented at the Proc., 2003 Annual Transportation Research Board Meeting.
- Kuo, C.-M. (1998). Effective temperature differential in concrete pavements. *Journal of Transportation Engineering*, 124(2), 112-116.
- Kuo, C.-M., Hall, K. T. and Darter, M. I. (1995). Three-dimensional finite element model for analysis of concrete pavement support. *Transportation research record*(1505).
- LaHue, S. P. and Risser Jr, R. J. (1992). Ultra-thin concrete overlay supports truck loads. *Concrete Construction*, 664-667.
- Lee, Y.-H. (1999). TKUPAV: stress analysis and thickness design program for rigid pavements. *Journal of Transportation Engineering*, 125(4), 338-346.
- Li, L., Peiwen, H. and Jinzhi, X. (2012). Influence of tack coat condition on shear fatigue performance of asphalt pavement structure interfaces. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 29(10), 11-15.
- Lin, D.-F. and Wang, H.-Y. (2005). Forensic investigation of ultra-thin whitetopping failures in Taiwan. *Journal of performance of constructed facilities*, 19(2), 165-171.
- López-Carreño, R.-D., Pujadas, P., Cavalaro, S. H. and Aguado, A. (2017). Bond strength of whitetoppings and bonded overlays constructed with self-compacting high-performance concrete. *Construction and Building Materials*, 153, 835-845.
- Mack, J. W., Hawbaker, L. D. and Cole, L. W. (1998). Ultrathin whitetopping: state-of-the-practice for thin concrete overlays of asphalt. *Transportation research record*, 1610(1), 39-43.
- Mackiewicz, P. (2014). Thermal stress analysis of jointed plane in concrete pavements. *Applied Thermal Engineering*, 73(1), 1169-1176.
- Maitra, S. R., Reddy, K. and Ramachandra, L. (2013). Estimation of critical stress in jointed concrete pavement. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 104, 208-217.
- McCullough, B. F. and Rasmussen, R. O. (1999). Fast-track paving: concrete temperature control and traffic opening criteria for bonded concrete overlays. United States. Federal Highway Administration Citeseer.
- McGhee, K. (1994). Portland Cement Concrete Resurfacing, NCHRP Synthesis of Highway Practice 204. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC.
- MnDOT. (2013). The Effect of Joint Sealing on the Performance of Thin Whitetopping Sections at MnROAD. MnROAD [Safer, Smarter, Sustainable Pavements through Innovative Research]. Minnesota Department of Transportation
- MnDOT. (2019). MnDOT Pavement Design Manual MnDOT Retrieved from http://www.dot.state.mn.us/materials/pvmt/design/docs/manual/MnDOT_PaveDesign_Chapter5.pdf
- Moaveni, S. (2011). Finite element analysis theory and application with ANSYS, 3/e: Pearson Education India.
- Mohamed, A. R. and Hansen, W. (1997). Effect of nonlinear temperature gradient on curling stress in concrete pavements. *Transportation research record*, 1568(1), 65-71.
- Mustaque, H. and Sharmin, S. (2010). Extending Asphalt Pavement Life Using Thin Whitetopping. Kansas State University of Nebraska-Lincoln, grudzień.
- Müdürlüğü, K. G. (2016). Beton Yol Kaplamaları Teknik Şartnamesi. In. Ankara: Karayolları Genel Müdürlüğü.
- Nahi, M., Ismail, A. and Ariffin, A. (2011). Analysis of asphalt pavement under nonuniform tire-pavement contact stress using finite element method. *Journal of Applied Sciences*, 11(14), 2562-2569.
- Nishizawa, T., Murata, Y. and Kokubun, K. (2003). Mechanical behavior of ultrathin whitetopping structure under stationary and moving loads. *Transportation research record*, 1823(1), 102-110.

- Okamoto, P. A. and Packard, R. G. (1989). Effect of High Tire Pressures on Concrete Pavement Performance. Retrieved from
- Ovalı, İ. and Esen, C. (2017). Ansys Workbench: Oku, İzle, Dinle, Öğren! : Kodlab Yayın Dağıtım Yazılım ve Eğitim Hizmetleri San. ve Tic. Ltd. Şti.
- Ozer, H., Al-Qadi, I. L., Wang, H. and Leng, Z. (2012). Characterisation 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.
- Özcanan, S. and Akpınar, M. V. (2014). Esnek Üstyapılarda Kritik Tekerlek ve Aks Konfigürasyonların Mekanistik Analizlere Göre Tespit Edilmesi. *İMO Teknik Dergi*, 6625(6654), 413.,
- Packard, R. G. and Tayabji, S. D. (1983). Mechanistic design of concrete pavements to control joint faulting and subbase erosion: Portland Cement Association.
- Pancar, E. B. and Akpınar, M. V. (2016). Temperature reduction of concrete pavement using glass bead materials. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 10(1), 39-46.
- Pasternak, P. (1954). Fundamentals of a new method of analyzing structures on an elastic foundation by means of two foundation moduli. *Proceedings of the Gosudarstvennoe Izdatelstvo Liberaturi po Stroitelstvu i Arkhitekture*, 4-7.
- PI. (2020). Pavement Interactive. Modulus of Subgrade Reaction <https://pavementinteractive.org/reference-desk/design/design-parameters/modulus-of-subgrade-reaction/#:~:text=The%20modulus%20of%20subgrade%20reaction,by%20correlation%20with%20other%20tests.> 15 Eylül 2020.
- Pickett, G. and Ray, G. K. (1951). Influence charts for rigid pavements. *American Society of Civil Engineers Transactions*.
- Požarycki, A., Górnaś, P. and Sztukiewicz, R. (2017). Application of mechanical and electromagnetic waves in an integrated determination of pavement bearing capacity. *Roads and Bridges-Drogi i Mosty*, 16(2), 101-114.
- Rasmussen, R. (2003). Performance and Design of Whitetopping Overlays on Heavily Loaded Pavements. Final Report for Concrete Pavement Technology Program Task 3 (99), 521-530.
- Rasmussen, R. and Rozycki, D. K. (2004). Thin and ultra-thin whitetopping: A synthesis of highway practice (0309070198). Retrieved from
- Rasmussen, R. O., McCullough, B. F., Ruiz, J. M., Mack, J. and Sherwood, J. A. (2002). Identification of pavement failure mechanisms at FHWA accelerated loading facility ultrathin whitetopping project. *Transportation research record*, 1816(1), 148-155.
- Rea, R. C. and Jensen, W. G. (2005). A concrete overlay on an asphalt road. *International Journal of Pavement Engineering*, 6(2), 111-114.
- Reissner, E. (1958). A note on deflections of plates on a viscoelastic foundation. *J. Appl. Mech.*, ASME, 25, 144-145.
- Richardson, J. M. and Armaghani, J. M. (1987). Stress caused by temperature gradient in portland cement concrete pavements.
- Roesler, J. R., Bordelon, A. C., Ioannides, A., Beyer, M. and Wang, D. (2008). Design and concrete material requirements for ultra-thin whitetopping (0197-9191). Retrieved from
- Roy, R. K. (1990). A Primer on the Taguchi Method, *Competitive Manufacturing Series: Society of Manufacturing Engineers*.
- Salman, M. M. and Patil, A. S. (2014). Analytical Study of Steel Fibre Reinforced Rigid Pavements Under Moving Load. *IJSRD–International Journal for Scientific Research & Development*, 2, 07.
- Seferoğlu, A. G., Seferoğlu, M. T. and Akpınar, M. V. (2018). Investigating the Mechanical Behavior of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) Bases in Large Scale Test Box. *Teknik Dergi*, 30(6).

- Seferoğlu, A. G., Seferoğlu, M. T., Akpınar, M. V. and Çelik, M. (2019). Kazınmış Asfalt Kaplama (RAP) Malzemelerinin Filler Oranının CBR Performansına Etkisi ve Maliyet Analizi Effect of Filler Percentage of Recycled Asphalt Pavement (RAP) Materials on CBR Performance and Cost Analysis.
- Shackel, B. (1993). Load and Environmental Factors Affecting Industrial Pavements. School of Civil Engineering, The University of New South Wales, Australia.
- Sheehan, M. J., Tarr, S. M. and Tayabji, S. D. (2004). Instrumentation and field testing of thin whitetopping pavement in Colorado and revision of the existing Colorado thin whitetopping procedure. Retrieved from
- Shi, X., Fwa, T. and Tan, S. (1993). Warping stresses in concrete pavements on Pasternak foundation. *Journal of Transportation Engineering*, 119(6), 905-913.
- Shoukry, S. N., Fahmy, M., Prucz, J. and William, G. (2007). Validation of 3DFE analysis of rigid pavement dynamic response to moving traffic and nonlinear temperature gradient effects. *International Journal of Geomechanics*, 7(1), 16-24.
- Shoukry, S. N. and Fahmy, M. R. (2002). Optimization of concrete slab geometry for enhanced rigid pavement performance and service life. Retrieved from
- Siddique, Z. Q., Hossain, M. and Meggers, D. (2005). Temperature and curling measurements on concrete pavement. Paper presented at the Proceedings of the 2005 Mid-Continent Transportation Research Symposium.
- Silfwerbrand, J. (1997). Whitetoppings: Swedish field tests and recommendations. Paper presented at the International Purdue Conference on Concrete Pavement Design and Materials for High Performance, 6th, 1997, Indianapolis, Indiana, USA.
- Söderqvist, J. (2006). Design of concrete pavements: design criteria for plain and lean concrete. KTH,
- STRUCT (2020). Static Friction Coefficients. https://structx.com/Material_Properties_007.html 15 Eylül 2020.
- Suh, C., Kim, D. and Won, M. C. (2008). Development of the Thickness Design for Concrete Pavement Overlays over Existing Asphalt Pavement Structures. Retrieved from
- Sultana, S. (2010). Extending asphalt pavement life with thin whitetopping. Kansas State University,
- TCPavements. (2010). Optipave V2.0. (<http://www.tcpavements.cl/eng/software>).
- Teller, L. and Sutherland, E. (1935). Observed effects of variations in temperature and moisture on the size, shape and stress resistance of concrete pavement slabs. *Public roads*, 16(9), 169-197.
- Thomlinson, J. (1940). Temperature variations and consequent stresses produced by daily and seasonal temperature cycles in concrete slabs. *Concrete Constructional Engineering*, 36(6), 298-307.
- Torres, H., Roesler, J., Rasmussen, R. O. and Harrington, D. (2012). Guide to the Design of Concrete Overlays Using Existing Methodologies. Iowa State University, National Concrete Pavement Technology Center.
- Tunç, A. (2001). Yol malzemeleri (agrega, asfalt, bitümlü karışımlar, beton, zemin) ve uygulamaları (kaplamalar ve zemin ıslahı-dizayn ve yapım metotları): Atlas-Nobel yayın dağıtım.
- Uzarowski, L. and Bashir, I. (2007). Rational Approach for Selecting the Optimum Asphalt Pavement Preventive and Rehabilitation Treatments-Two Practical Examples from Ontario. Paper presented at the 2007 Annual Conference and Exhibition of the Transportation Association of Canada: Transportation-An Economic Enabler (Les Transports: Un Levier Economique) Transportation Association of Canada.
- Vandenbossche, J. (2013). BCOA ME. Swanson School of Engineering, University of Pittsburgh. (https://www.engineering.pitt.edu/Sub-Sites/Faculty-Subsites/J_Vandenbossche/BCOA-ME/BCOA-ME/, accessed March 10, 2020).

- Vandenbossche, J. M. (2003). Performance analysis of ultrathin whitetopping intersections on US-169: Elk River, Minnesota. Transportation research record, 1823(1), 18-27.
- Vandenbossche, J. M. and Barman, M. (2010). Bonded whitetopping overlay design considerations for prevention of reflection cracking, joint sealing, and the use of dowel bars. Transportation research record, 2155(1), 3-11.
- VENCON. (2004). Software package for structural design of concrete pavements (in Dutch) CROW, Ede.
- Wen, H., Titi, H. and Berry, D. (2006). Study of best practices for pre-overlay repair and asphalt overlay. Paper presented at the Airfield and Highway Pavements. The 2006 Airfield and Highway Pavement Specialty Conference American Society of Civil Engineers.
- Westergaard, H. (1926). Stresses in concrete pavements computed by theoretical analysis. Public roads.
- Williamson, M. J. (2015). Finite element analysis of hot-mix asphalt layer interface bonding. Kansas State University,
- Winkler, E. (1867). Die Lehre von Elastizitat und Festigkeit (on elasticity and fixity). Dominicus, Prague.
- Yoder, E. and Witczak, M. (1975). Principles of Pavement Design. John Wiley and Sons Inc., New York, 150-155.
- Yu, H. T., Khazanovich, L., Darter, M. I. and Ardani, A. (1998). Analysis of concrete pavement responses to temperature and wheel loads measured from instrumented slabs. Transportation research record, 1639(1), 94-101.
- Zbiciak, A., Graczyk, M., Józefiak, K., Brzeziński, K. and Michalczyk, R. (2019). Assessment of the effect of concrete slab geometrical parameters on the distribution of stresses in the road pavement structure. Roads and Bridges-Drogi i Mosty, 18(3), 171-180.
- Zhang, J., Fwa, T., Tan, K. and Shi, X. (2003). Model for nonlinear thermal effect on pavement warping stresses. Journal of Transportation Engineering, 129(6), 695-702.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Fatih İrfan BAŞ
Doğum tarihi:	11 Ağustos 1978
Doğum Yeri:	Erzincan
Uyruğu:	T.C.
Adres:	Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü
E-mail:	fibas@erzincan.edu.tr
Eğitim	
Lise:	Erzincan Anadolu Lisesi
Lisans:	Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü
Yüksek lisans:	Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ulaştırma Bilim Dalı
Doktora:	Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ulaştırma Bilim Dalı
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce:	İyi
Üye Olunan Mesleki Kuruluşlar	
İnşaat Mühendisleri Odası	