

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**TEKERLEK VE AKS KONFIGÜRASYONUNA BAĞLI OLARAK YOLDA
OLUŞAN DEFORMASYONLARIN SONLU ELEMANLARLA ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Sedat ÖZCANAN

**HAZİRAN 2011
TRABZON**

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**TEKERLEK VE AKS KONFIGÜRASYONUNA BAĞLI OLARAK YOLDA
OLUŞAN DEFORMASYONLARIN SONLU ELEMANLARLA ANALİZİ**

Sedat ÖZCANAN

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"YÜKSEK LİSANS (İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ)"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 20.05.2011
Tezin Savunma Tarihi : 09.06.2011**

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Muhammet V. AKPINAR

Trabzon 2011

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında

Sedat ÖZCANAN tarafından hazırlanan

**TEKERLEK VE AKS KONFIGÜRASYONUNA BAĞLI OLARAK YOLDA
OLUŞAN DEFORMASYONLARIN SONLU ELEMANLARLA ANALİZİ**

**başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 24 / 05 / 2011 gün ve 1461 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından 09 / 06 / 2011 tarihinde yapılan sınavda**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Fazıl ÇELİK

Üye : Yrd. Doç. Dr. M. Vefa AKPINAR

Üye : Yrd. Doç. Dr. Hasan GEDİKLİ

Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ

Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Mekanistik yöntemler ile yol tasarımının yapılabilmesi için, mekanistik tasarım açısından son derece önemli bir faktör olan; trafikte seyreden araçların ve dingil yüklerinin sınıflandırılarak, yol tabakalarında neden oldukları tahribat derecelerinin bilinmesi gerekmektedir. Yol tabakalarında büyük tahribatlara neden olan ağır taşıtlarda, çok sayıda tekerlek ve aks tipi kullanılmaktadır. Bunlar tip, ebat ve yükleme bakımından birbirinden farklıdır. Deneysel ve gözlemsel çalışmalar, yol üstyapı tasarımında tek başına kesin sonuçlar vermediğinden, günümüzde mekanistik çalışmalar yönünde araştırmalar ağırlık kazanmıştır. İlerde üstyapı projelendirilmesinin tamamıyla mekanistik yöntemlere dayanması beklenmektedir.

Bu çalışmada, Van Karayolları 11.Bölge Müdürlüğü tarafından araziden ölçülen dingil ağırlığı ve başlangıç-son etüdü verileri ile standart tek dingil yükü temel alınarak, trafikte seyreden ağır taşıtlarda en çok kullanılan tekerlek ve aks tipleri sonlu elemanlarla (Ls-Dyna) modellenip, yol tabakaları açısından en kritik aks ve tekerlek tipinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu çalışmadan çıkan sonuçların; Karayolları, ağır taşıt üreticileri ile lastik üreticileri için faydalı olacağına inanılmaktadır.

Bu çalışmanın başlangıcından sonuna kadar her safhada, bilgi, tecrübe ve desteğini esirgemeyen danışman hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Muhammet Vefa AKPINAR'a şükranlarımı borç bilirim. Verdikleri ders ve önerileri ile bu tezin temellerini atmamda bana rehber olan Sayın Prof. Dr. Ayşe DALOĞLU, Sayın Prof. Dr. Fazıl ÇELİK, Sayın Yrd. Doç. Dr. Şeref ORUÇ ve Sayın Yrd. Doç. Dr. Hasan GEDİKLİ'ye teşekkürlerimi sunarım. Arş. Gör. Tuba SERT'e yardımlarından dolayı teşekkür ederim. Van Karayolları 11.Bölge Müdürlüğünden Taşıt Arazi Kontrol Teknik Elemanı Ali KAÇMAZ'a dingil ağırlıkları verilerini sağladığı için, MICHELIN LASTİKLERİ TİC. A.Ş. ürün teknik bölümünden Erkan CELİLOĞLU'na yaygın olarak kullanılan ağır taşıt lastik tipleri bilgilerini sağladığı için teşekkürlerimi sunarım. Son olarak bu çalışmayı merhum babam Şefik ÖZCANAN'a atfediyor ve onun yokluğunu hiçbir zaman hissettirmeyen ve bu güne kadar beni her durumda destekleyen kıymetli annem Nafiye ÖZCANAN'a ve aileme teşekkür ediyorum.

Sedat ÖZCANAN
Trabzon 2011

TEZ BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “*Tekerlek ve Aks Konfigürasyonuna Bağlı Olarak Yolda Oluşan Deformasyonların Sonlu Elemanlarla Analizi*” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım *Yrd. Doç. Dr. Muhammet V. AKPINAR*’ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri kendim topladığımı, analizleri ilgili laboratuarlarda yaptığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

20/05/2011

Sedat ÖZCANAN

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET.....	VIII
SUMMARY.....	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	X
TABLolar DİZİNİ.....	XII
SEMBOLLER DİZİNİ.....	XIV
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Mekanistik-Ampirik Tasarım.....	3
1.2.1. Ülkemizde Esnek Üstyapı Tasarımı.....	4
1.2.2. Esnek ve Rijit Üstyapı Kaplamaları.....	6
1.2.3. Gerilme-Deformasyon İlişkisi.....	8
1.2.4. Dingil Yüğü Altında Yolda Oluşan Gerilme-Deformasyonlar.....	9
1.2.4.1. Radyal Gerilme.....	10
1.2.4.2. Teğetsel Gerilme.....	10
1.2.4.3. Düşey Gerilme.....	10
1.2.4.4. Deviator Gerilme.....	11
1.2.4.5. Kayma Gerilmesi.....	12
1.2.4.6. Defleksiyon.....	13
1.2.5. Gerilme-Deformasyonlara Bağlı Yolda Oluşan Tipik Bozulmalar.....	14
1.2.5.1. Tekerlek İzi Hasarı.....	14
1.2.5.1.1. Tekerlek İzi Hasarının Nedenleri.....	15
1.2.5.1.2. Tekerlek İzi Oluşumuna Etkiyen Faktörler.....	16
1.2.5.2. Yorulma Çatlakları.....	21
1.2.5.2.1. Yorulma Çatlaklarının Nedenleri.....	22
1.2.5.2.2. Yorulma Çatlaklarına Etki Eden Faktörler.....	23
1.2.6. Gerilme-Deformasyonlara Bağlı Asfalt Ömrü Tayini.....	26

1.3.	Aks ve Tekerlek Konfigürasyonları	30
1.3.1.	Aks Konfigürasyonları ve Yükleme Haddi	31
1.3.1.1.	Aks Konfigürasyonları	31
1.3.1.2.	Aks Yükleme Kapasitesi	35
1.3.2.	Tekerlek Konfigürasyonları ve Yükleme Kapasitesi	38
1.4.	Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Modelleme	42
1.5.	Çalışmanın Amacı	44
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	46
2.1.	Sonlu Elemanlarla Analiz	46
2.1.1.	LS-DYNA ile Çözüm	47
2.2.	Araziden Alınan Verilerin Sonlu Elemanlar Modeli ile Karşılaştırılması	48
2.3.	Karayollarından Alınan Dingil Ağırlıkları ile Standart Tek Dingil Yüğü Ağırlığı İçin Yapılan Sonlu Elemanlar Modeli ve Akış Diyagramı	53
2.3.1.	Yol Tabakalarının Modellenmesi	55
2.3.2.	Aks ve Tekerlek Tiplerinin Modellenmesi	56
2.3.3.	Trafik Yükünün Modellenmesi	60
2.3.4.	Dual Tekerleklerde Değişken Lastik Mesafesi Modellenmesi.....	62
3.	BULGULAR VE TARTIŞMA.....	64
3.1.	Sonlu Elemanlar Analizi Sonucu Tekerlek Konfigürasyonu İçin Elde Edilen Bulgular	64
3.1.1.	Radyal Gerilme.....	65
3.1.2.	Teğetsel Gerilme.....	68
3.1.3.	Düşey Gerilme	71
3.1.4.	Kayma Gerilmesi	74
3.1.5.	Deviator Gerilme	77
3.1.6.	Kritik Çekme Deformasyonu.....	79
3.2.	Sonlu Elemanlar Analizi Sonucu Dingil Konfigürasyonu İçin Elde Edilen Bulgular	81
3.2.1.	Düşey Gerilme	81
3.2.2.	Kritik Çekme Deformasyonu.....	83
3.2.3.	İki Aks Ara Mesafesinin Değişimine Bağlı Gerilme Deformasyon Analizi ...	84
3.2.3.1.	Düşey Gerilme Değişimi	84
3.2.3.1.	Kritik Çekme Deformasyonu Değişimi	88

3.3.	Dual Tekerlek Lastikleri Ara Mesafesi Değişimine Bağlı Gerilme Deformasyon Analizi.....	92
3.3.1.	Düşey Gerilme Değişimi	93
3.3.1.	Kritik Çekme Deformasyonu Değişimi	97
4.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER	101
5.	KAYNAKLAR.....	103
6.	EKLER	109
	ÖZGEÇMİŞ	

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

TEKERLEK VE AKS KONFIGÜRASYONUNA BAĞLI OLARAK YOLDA OLUŞAN DEFORMASYONLARIN SONLU ELEMANLARLA ANALİZİ

Sedat ÖZCANAN

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Muhammet V. AKPINAR

2011, 108 Sayfa, 18 Sayfa Ek

Mekanistik-ampirik yöntem açısından; trafik yükünün yola aktarımı sağlayan tekerlek ve dingil çeşitlerinin bilinmesi, bu tekerlek ve dingil çeşitleri içinde en kritik olanlarının tespiti, trafik yükünün sınıflandırılması ve modellenmesinde kolaylık sağlayacaktır. Bundan dolayı bu çalışmada; *en kritik tekerlek ve dingil tipi, arazi ve standart tek dingil yükü verileri* ışığında, *üç boyutlu (3D)* sonlu elemanlarla modellenerek belirlenmeye ve tekerlek tipi olarak *dual tekerleğin* lastikleri arasındaki mesafenin artması veya azalması durumunda, gerilme-deformasyonlardaki değişimler gözlemlenerek, yol tabakalarındaki etkileri belirlenmeye çalışılmıştır. Bu çalışmada; trafikte seyreden ağır araçlardan alınan ölçümlere göre yapılan modellemelerde, gerilme-deformasyonlar açısından en tehlikeli tekerlekler genel olarak sırasıyla; *tek tekerlek, yeni geniş tek tekerlek, dual tekerlek ve geniş tek tekerlek* şeklindedir. Fakat eşit şartlarda, en kritik tekerlekler ise sırasıyla; *tek tekerlek, geniş tek tekerlek, yeni geniş tek tekerlek ve dual tekerlek*'tir. Ağır araçlarda kullanılan aks tipleri açısından, trafikteki yüklere göre en kritik akslar; *tek tekerlekli tek aks, dual tekerlekli tek aks, geniş tekerlekli tridem aks ve dual tekerlekli tandem aks*'tir. *Dual tekerlek* ara mesafesi değişimine bağlı yapılan analizde; mesafenin artmasıyla asfalt kaplama tabakası altında *düşey gerilme değeri % 23, kritik çekme deformasyonu değeri ise % 32* oranında düşmüştür.

Anahtar Kelimeler: Gerilme-Deformasyon, Mekanistik-Ampirik Tasarım, Tekerlek ve Dingil Konfigürasyonu, Sonlu Elemanlar, Ls-Dyna

Master Thesis

SUMMARY

FINITE ELEMENT ANALYSIS OF STRAINS CONSISTED DEPENDING ON TIRE
AND AXLE CONFIGURATIONS IN ROAD

Sedat ÖZCANAN

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor: Assoc. Prof. Muhammet V. AKPINAR
2011, 108 Pages, Appendix 18 Pages

From the aspect of *mechanistic-empirical method*, the knowing of tire and axle configurations that supply transfer of traffic loading on road, and determining the most critical tire and axle type will make easy to classification and modeling of traffic loading. Thus, in this study, according to *field measurements and equivalent single axle loads* and being modeled by *3d finite elements*, most critical tire and axle type were attempted to determine. Additionally, in case of decreasing or increasing distance between the *dual tires* as tire type, it was attempted to determine the effects in the pavement layers by observing the changes of stress-strains. It was concluded that, in the modellings developed according to measurements taken from the heavy vehicles in traffic, generally the most critical tires in terms of horizontal and vertical stresses-strains are respectively: *single tire, new wide-base tire, dual tire and super single tire*. But, according to the models were developed under the same conditions, the most critical tires in terms of horizontal and vertical stresses-strains caused on the layers of asphalt are respectively: *single tire, super single tire, new wide-base tire and dual tire*. In terms of axle types especially used by heavy vehicles in traffic, the most critical axles according to the loads in traffic are; *steering axle, single axle, tridem axle and tandem axle*, respectively. According to the analysis due to the exchange of distance between dual tire; the increasing distance between dual tire significantly reduce *vertical stress value about %23, and critical tensile strain value about %32* under the asphalt concrete layer of pavement.

Key Words: Stress-Strain, Mechanistic-Empirical Design, Tire and Axle Configurations, Finite Elements, Ls-Dyna

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Tekerlek yükü altında esnek kaplama davranışı.....	7
Şekil 2. Tekerlek yükü altında yolda oluşan gerilmeler	9
Şekil 3. Asfalt kaplama tabakası üstünde oluşan tekerlek izi hasarı	15
Şekil 4. Asfalt kaplama tabakasında meydana gelen yorulma çatlakları	22
Şekil 5. Hareket eden tekerlek yükü altında çatlak oluşumuna neden olan gerilme tipleri (Lytton, 1989)	25
Şekil 6. Dingil tipleri (KGM, 2010)	32
Şekil 7. Taşıt sınıflarına göre dingil tipleri dağılımı grafiği (KGM, 2010).....	34
Şekil 8. Trafikte kullanılan dingil tipleri	34
Şekil 9. Geniş tek tekerleğin gelişimi (Al-Qadi vd)	40
Şekil 10. Kaplama tabakası üstünde ve altında oluşan düşey basınç gerilmeleri (Trabzon-Arsin karayolu)	49
Şekil 11. a) Üç tabakalı yol sistemi b) 3D-Sonlu elemanlar modeli	50
Şekil 12. Ls- Dyna zamana bağlı yükleme grafiği	51
Şekil 13. Sonlu elemanlar analiziyle kaplama tabakası üstünde ve altında elde edilen düşey basınç gerilme grafikleri.....	52
Şekil 14. Trabzon-Arsin karayolunda basınç ölçer ile gerilme ölçümü	53
Şekil 15. Ls-Dyna ile Modellemede Kullanılan Akış Diyagramı	54
Şekil 16. 3D-Sonlu elemanlar yol modeli	56
Şekil 17. (a) Klasik dual tekerlek izi, (b) Geniş tek tekerlek izi (Salgado and Kim)	58
Şekil 18. Tekerlek tipine göre non-üniform olarak modellenen temas alanları	58
Şekil 19. Hareketli yük için zaman fonksiyonu (Huang)	60
Şekil 20. Sonlu elemanlar yöntemi ile modellenen dinamik yükleme grafiği	61
Şekil 21. 3D Dual tekerlek modeli	63
Şekil 22. Tekerlek yükü altında yol tabakalarında meydana gelen gerilme tipleri	64
Şekil 23. Tekerlek altında yol tabakalarında gerilme değeri ölçülen noktalar	66
Şekil 24. Tekerlek tipine göre yol tabakalarında oluşan radyal gerilme değişimi (DAE)...	67
Şekil 25. Tekerlek tipine göre yol tabakalarında oluşan radyal gerilme değişimi (STDY)	68
Şekil 26. Tekerlek tipine göre yol tabakalarında oluşan teğetsel gerilme değişimi (DAE)	69

Şekil 27. Tekerlek tipine göre yol tabakalarında oluşan teğetsel gerilme değişimi (STDY)	70
Şekil 28. Tekerlek tipine göre yol tabakalarında oluşan düşey gerilme değişimi (DAE) ...	72
Şekil 29. Tekerlek tipine göre yol tabakalarında oluşan düşey gerilme değişimi (STDY)	74
Şekil 30. Tekerlek tipine göre yol tabakalarında oluşan kesme gerilmesi değişimi (DAE)	75
Şekil 31. Tekerlek tipine göre yol tabakalarında oluşan kesme gerilmesi değişimi (STDY)	76
Şekil 32. Tekerlek tipine göre yol tabakalarında oluşan deviator gerilme değişimi (DAE)	77
Şekil 33. Tekerlek tipine göre yol tabakalarında oluşan deviator gerilme değişimi (STDY)	78
Şekil 34. Tekerlek tipine göre yol tabakalarında oluşan kritik çekme deformasyonu değişimi (DAE)	80
Şekil 35. Tekerlek tipine göre yol tabakalarında oluşan kritik çekme deformasyonu değişimi (STDY)	81
Şekil 36. DAE verilerine göre aks tipleri altında oluşan düşey gerilme değişimi	83
Şekil 37. DAE verilerine göre aks tipleri altında oluşan kritik çekme deformasyonu Değişimi	84
Şekil 38. Aks ara mesafesi değişimi analizinde gerilme değeri ölçülen noktalar	85
Şekil 39. Aks ara mesafesine bağlı asfalt kaplama tabakası üstünde meydana gelen düşey basınç gerilmesi değişimi	86
Şekil 40. Aks ara mesafesine bağlı asfalt kaplama tabakası altında meydana gelen düşey basınç gerilmesi değişimi	87
Şekil 41. Aks ara mesafesine bağlı temel/alttemel tabakası altında meydana gelen düşey basınç gerilmesi değişimi	88
Şekil 42. Aks ara mesafesine bağlı asfalt kaplama tabakası üstünde meydana gelen kritik çekme deformasyonu değişimi	90
Şekil 43. Aks ara mesafesine bağlı asfalt kaplama tabakası altında meydana gelen kritik çekme deformasyonu değişimi	91
Şekil 44. Aks ara mesafesine bağlı temel/alttemel tabakası altında meydana gelen kritik çekme deformasyonu değişimi	92
Şekil 45. Dual tekerlek analizinde yatay ve düşey mesafede değerleri ölçülen noktalar ...	93
Şekil 46. Dual tekerlek altında asfalt kaplama tabakası üstünde meydana gelen düşey gerilme değerleri değişimi	94
Şekil 47. Dual tekerlek yükünden dolayı asfalt kaplama tabakası altında meydana gelen düşey gerilme değerleri değişimi	95

Şekil 48. Dual tekerlek yükünden dolayı temel/alttemel tabakası altında meydana gelen düşey gerilme değerleri değişimi.....	96
Şekil 49. Düşey gerilmeler sonucu asfalt tabakalarda oluşan yanıl deplasmanların yönü .	97
Şekil 50. Dual tekerlek altında asfalt kaplama tabakası üstünde meydana gelen kritik çekme deformatyonu değişimi	98
Şekil 51. Dual tekerlek yükünden dolayı asfalt kaplama tabakası altında meydana gele kritik çekme deformatyonu değişimi	99
Şekil 52. Dual tekerlek yükünden dolayı temel/alttemel tabakası altında oluşan kritik çekme deformatyonu değişimi.....	100

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Taşıt sınıflarına göre dingil tipleri dağılımı (KGM, 2010)	33
Tablo 2. Karayolları trafik yönetmeliğine göre dingil yükleme kapasiteleri	37
Tablo 3. Aks konfigürasyonuna göre tekerlek hasar faktörleri (Al-Qadi vd.)	40
Tablo 4. Tandem ve tridem akslar (towed) için tekerlek konfigürasyonu hasar faktörleri (Al-Qadi vd.)	41
Tablo 5. Sonlu elemanlar modelinde kullanılan parametreleri.....	50
Tablo 6. Arazi verileri ile sonlu elemanlar analizi değerlerinin karşılaştırılması	53
Tablo 7. Yol tabakaları için tasarım parametreleri	55
Tablo 8. Türkiye’de kullanılan dingil tipleri (Van 11.KBM).....	57
Tablo 9. Türkiye’de ağır taşıtlarda kullanılan lastik tipleri ve oranları (MICHELIN)	59
Tablo 10. Dingil ağırlığı ve başlangıç-son etüdüne göre ortalama dingil yükleri (Van 11.KBM)	59
Tablo 11. Modellenen tekerlekler ve temas alanları.....	60
Tablo 12. Dual tekerlek modeli için kullanılan parametreler	62
Tablo 13. Tekerlek tiplerine göre yol tabakalarında sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen sayısal radyal gerilme değerleri (DAE).....	66
Tablo 14. Tekerlek tiplerine göre yol tabakalarında sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen sayısal radyal gerilme değerleri (STDY)	67
Tablo 15. Tekerlek tiplerine göre yol tabakalarında sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen sayısal teğetsel gerilme değerleri (DAE)	68
Tablo 16. Tekerlek tiplerine göre yol tabakalarında sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen sayısal teğetsel gerilme değerleri (STDY)	69
Tablo 17. Tekerlek tiplerine göre yol tabakalarında sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen sayısal düşey gerilme değerleri (DAE)	71
Tablo 18. Tekerlek tiplerine göre yol tabakalarında sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen sayısal düşey gerilme değerleri (STDY)	73
Tablo 19. Tekerlek tiplerine göre yol tabakalarında sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen sayısal kesme gerilmesi değerleri (DAE).....	75
Tablo 20. Tekerlek tiplerine göre yol tabakalarında sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen sayısal oluşan kesme gerilmesi değerleri (STDY)	76
Tablo 21. Tekerlek tiplerine göre yol tabakalarında sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen sayısal deviator gerilme değerleri (DAE)	77

Tablo 22. Tekerlek tiplerine göre yol tabakalarında sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen sayısal deviator gerilme değerleri (STDY)	78
Tablo 23. Tekerlek tiplerine göre yol tabakalarında sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen sayısal kritik çekme deformasyonu değerleri (DAE).....	79
Tablo 24. Tekerlek tiplerine göre yol tabakalarında sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen sayısal kritik çekme deformasyonu değerleri (STDY).....	81
Tablo 25. Aks tiplerine göre yol tabakalarında sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen sayısal düşey gerilme değerleri (DAE)	82
Tablo 26. Aks tiplerine göre yol tabakalarında sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen sayısal oluşan kritik çekme deformasyonu değerleri (DAE)	83
Tablo 27. Aks ara mesafesi değişimine bağlı asfalt kaplama tabakası üstünde sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen sayısal düşey basınç gerilmesi değerleri.....	85
Tablo 28. Aks ara mesafesi değişimine bağlı asfalt kaplama tabakası altında sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen sayısal düşey basınç gerilmesi değerleri	87
Tablo 29. Aks ara mesafesi değişimine bağlı temel/alttemel tabakası altında meydana gelen düşey basınç gerilmesi değerleri	88
Tablo 30. Aks ara mesafesi değişimine bağlı asfalt kaplama tabakası üstünde sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen sayısal kritik çekme deformasyonu değerleri	89
Tablo 31. Aks ara mesafesi değişimine bağlı asfalt kaplama tabakası altında sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen sayısal kritik çekme deformasyonu değerleri	91
Tablo 32. Aks ara mesafesi değişimine bağlı temel/alttemel tabakası altında sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen sayısal kritik çekme deformasyonu değerleri	92
Tablo 33. Dual tekerlek ara mesafesine bağlı asfalt kaplama tabakası üstünde sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen sayısal düşey gerilme değerleri.....	94
Tablo 34. Dual tekerlek ara mesafesine bağlı asfalt kaplama tabakası altında sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen sayısal düşey gerilme değerleri.....	95
Tablo 35. Dual tekerlek ara mesafesine bağlı temel/alttemel tabakası altında sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen sayısal düşey gerilme değerleri.....	96
Tablo 36. Asfalt kaplama tabakası üstü sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen sayısal kritik çekme deformasyonu değerleri	98
Tablo 37. Asfalt kaplama tabakası altı sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen sayısal kritik çekme deformasyonu değerleri	99
Tablo 38. Temel/alttemel tabakası altı sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen sayısal kritik çekme deformasyonu değerleri.....	100

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

AASHTO	: American Association of State Highway and Transportation Officials
ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
AC	: Asfalt Kaplama Tabakası
APT	: Accelerated Pavement Testing
ARA	: Applied Research Associates
CBR	: California Bearing Ratio
DAE	: Dingil Ağırlığı Etüdü
DPT	: Devlet Planlama Teşkilatı
FAA	: Federal Aviation Administration
FHWA	: Federal Highway Administration
FWD	: Falling Weight Deflectometer
KEÜPR	: Karayolları Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehber
KBM	: Karayolları Bölge Müdürlüğü
KGM	: Karayolları Genel Müdürlüğü
MEPDG	: Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide
MNDOT	: Minnesota Department of Transportation
NCDOT	: North Carolina Department of Transportation
NCHRP	: National Cooperative Highway Research Program
OECD	: Organisation for Economic Co-operation and Development
PCA	: Portland Cement Association
SHRP	: Strategic Highway Research Program
STDY	: Standart Tek Dingil Yüğü
URL	: Yazarı Belli Olmayan İnternet Kaynakları
WASHO	: Western Association of State Highway Organizations
WSDOT	: Washington State Department of Transportation
A	: Malzemenin Sıcaklık Durumuna Bağlı Gerilme Sabiti
a	: Tekerlek Temas Alanı
d	: Yüğü Tatbik Süresi (Saniye)
E	: Elastik Modülü
E ₁	: Asfalt Kaplama Tabakası Elastik Modülü

ε	: Deformasyon
ε_p	: Kaplama Yüzeyinde (15 mm) Oluşan Toplam Kalıcı Deformasyon
ε_r	: İyileşebilir Deformasyon
ε_t	: Kaplama Altında Meydana Gelen Yatay Çekme Deformasyonu
ε_v	: Kaplama Yüzeyinde Oluşan Düşey Basınç Deformasyonu
ε_{vr}	: Düşey Deformasyon
F_p	: Pger. Tek Dingil Yükünü Standart Tek Dingil Yüküne Dönüştürme Faktörü
f_4 ve f_5	: Malzeme Sabitleri
h_{ac}	: Kaplama Kalınlığı
k'_1	: Eşitlik Sabiti
M_R	: Esneklik Modülü
N	: Nihai Tekerlek İzi Oluşumu İçin Standart Tek Dingil Sayısı
N_c	: Nihai Yorulma Çatlağı Oluşumu İçin Yük Tekerrür Sayısı
N_d	: Kabul Edilebilir 12,5 mm Tekerlek İzi Derinliğini Geçmeyecek Yük Tekrar Sayısı
N_f	: Yorulma Çatlağı Tayini İçin Gerekli Eşdeğer Tek Dingil Sayısı
N_r	: Nihai Tekerlek İzi Sınırı İçin Eşdeğer Tek Dingil Yükü Sayısı
n	: Üssel Katsayı
P_{ger}	: Gerçek Tek Dingil Yükü, Ton
P_{std}	: Standart Tek Dingil Yükü, Ton
R_{ut}	: Kabul Edilebilir Tekerlek İzi Sınırı
s	: Araç Hızı (Metre/Saniye)
σ	: Gerilme
σ_1	: Maksimum Normal Gerilme
σ_3	: Minimum Normal Gerilme
σ_d	: Deviator Gerilme
σ_r	: Radyal Gerilme
σ_t	: Teğetsel Gerilme
σ_z	: Düşey Gerilme
q	: Tekerlek Basıncı
τ	: Kayma Gerilmesi
T	: Asfalt sıcaklığı (°C)

v	: Poisson Oranı
V_a	: Boşluk Oranı (%)
V_b	: Etkin Binder Tabakası Yoğunluğu (%)
w	: Defleksiyon
x	: Eşitlik Katsayısı
z	: Gerilmenin Ölçüldüğü Derinlik
α ve β	: Malzeme Karışım Rijitliği ve Yüzdeliğine Bağlı Gerilme Sabitleri

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Toplum yaşamının vazgeçilmez bir parçası olan ulaştırma, insanların ve eşyanın bir noktadan diğer bir noktaya belli bir yararı getirmek üzere taşınması için sunulan hizmet olarak tanımlanmaktadır. Eski çağlarda sadece kara ve su yolu ile yürütülmekte olan ulaştırma hizmeti günümüzde ilaveten havayolu ile yapılmaktadır. Sanayi devrimini takip eden yıllarda motorlu taşıtların üretiminde ve tasarımında görülen büyük gelişmeler ulaştırma sektörünü, toplumların ve ülkelerin ekonomik ve sosyal yaşamının önemli bir unsuru haline getirmiştir. Günümüzde artık yeterli ve çağdaş ulaştırma hizmeti olmaksızın ekonomileri canlı tutmak ve toplumların sosyal yaşamlarını sürdürmek mümkün görülmemektedir (DPT, Karayolu Ulaştırması Özel İhtisas Raporu,1992).

Ulaştırma hizmetinin güvenli, hızlı, konforlu ve ekonomik olması esastır. Yolcu taşımalarında yolcu/km ve yük taşımalarında ise ton/km cinsinden ifade edilen ulaştırma hizmeti yukarıda belirtilen ilkelerin tümünü sağladığı sürece rağbet görür ve ülke kalkınmasına katkıda bulunur. Dünyada ve Türkiye’de ulaştırma sektörünün genel bütçeler içindeki payı giderek artan bir eğilim göstermekte olup karayolu ulaştırması, ulaşım sektöründe en büyük paya sahip görünmektedir. Karayolu ulaşım sisteminin diğer ulaşım sistemlerine kıyasla gelişme göstermesinin ve taşıma taleplerini karşılamada ilk sırayı almasının temelinde, taşımayı “kapıdankapıya” yapabilmesi yatmaktadır. Toplumlar ekonomik ve güvenilir olup olmamasına bakmaksızın “kapıdankapıya” yapılan taşımanın sağladığı kolaylık ve konforu tercih etmektedirler. Özellikle yolcu taşımalarında, küçük yük ve kısa mesafeli taşımalarda karayolu ulaştırma sistemi ile rekabet edebilmek kolay olmamaktadır. Bu nedenle de karayolu güncelliğini korumakta ve tüm sektör içerisinde ağırlıklı bir konumu bulunmaktadır (DPT, Karayolu Ulaştırması Özel İhtisas Raporu, 1992).

Yukarıda karayolunun öneminden bahsedilmekte fakat asfalt kaplamalı yollar; yapım, bakım ve onarım yönünden yüksek maliyet gerektirmektedir. Özellikle tasarım ömrü açısından yirmi yıllık olarak tasarlanan bu yollar, birkaç sene sonra deforme olmakta ve bakım onarım gerektirmektedir. Asfalt kaplamalı yolların performansını arttırmak amacıyla sürekli çalışmalar yapılmaktadır. Fakat bu konuda hala istenilen seviyeye

gelinememiştir. Özellikle kaplama tasarımı yol açısından büyük önem arz etmektedir. Çünkü trafiğin üzerinde seyrettiği yol tabakası olması nedeniyle bu tabakanın güvenliği ve konforu sağlanması istenmektedir. Fakat yol gövdesinde veya herhangi bir yol tabakasındaki deformasyon, kaplamanın formunu değiştirmektedir. Örneğin trafik yükünden dolayı, yol tabakalarında meydana gelen gerilme deformasyonlar kaplamada tekerlek izi hasarı ve çatlak olarak tezahür etmektedir. Bu problemlerin çözümü ve esnek üst yapı dizaynı ile ilgili AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) 1960'lı yıllardan bu yana çalışmalar yayımlamaktadır. Bu çalışmalar 1993'e kadar AASHTO'nun yol dizayn rehberinde deneysel (ampirik) yöntemler olarak yer aldı. Fakat 1993'ten sonra AASHTO mekanistik ampirik yöntemlere yönelik çalışmalar yapıp yine bu yönde araştırmaları desteklemektedir. Sadece deneysel (ampirik) yöntemler yol dizaynı açısından yetersiz kalmaktadır. Çünkü arazi koşullarının laboratuvar ortamında oluşturulması mümkün değildir. Yolun performansına etki eden birçok faktör mevcuttur (Trafik yükü, çevresel faktörler, malzeme, vb.). Bundan dolayı yol tasarımı ve analizi karmaşık hal almaktadır. Ampirik yöntemlerin yanında mekanistik olarak yol tasarımının desteklenmesiyle daha sağlıklı sonuçların alınabileceği tahmin edilmektedir. Özellikle son on yıl içerisinde bu yönde çalışmalar yoğunluk kazanmıştır. Mekanistik tasarım için literatürde kabul gören sayısal yöntemler, sonlu elemanlar metodudur. Çünkü yol dizaynını etkileyen birçok parametre mevcuttur. Bütün bu karışık parametrelerin çözümü, bunları kolaylıkla modelleyebilen sonlu elemanlarla mümkün olabilmektedir. Bu metotla yaklaşık çözümler elde edilmesine rağmen, herhangi bir elemanı tanımlamak ve özelliklerini doğru şekilde tayin etmek sonlu elemanlar metoduyla mümkün olabilmektedir. Sadece mekanistik yöntemler yeterlidir, bu tartışılabilir bir konudur fakat mekanistik yöntemlerin ampirik olarak desteklenmesi daha sağlıklı sonuçlara ulaşılmasını sağlar. Özellikle bunun için arazi şartlarına yakın veriler elde etmek amacıyla hızlandırılmış yol testleri (APT) günümüzde yaygın olarak uygulanmaya başlanmıştır. Ülkemizde bu konuda çalışmalar az olmakla birlikte Karadeniz Teknik Üniversitesi (KTÜ), Ulaştırma Anabilim Dalı, hızlandırılmış yol testi laboratuvarı kurarak bu konuda çalışmalar başlamıştır (Akpınar, 2010).

Bu çalışmada araziden alınan veriler ışığında ve karşılaştırmalı olarak mekanistik yöntem kullanılarak (Sonlu Elemanlar) ağır taşıtların aks ve tekerlekleri altında, yolda oluşan gerilme deformasyonların analizi ve kritiği yapılmıştır.

1.2. Mekanistik-Ampirik Tasarım

Ampirik tasarım, deney ve gözlem sonuçlarını temel almaktadır (Carvalho, 2006). Günümüzde yol tasarımı için yaygın olarak kullanılan metottur. Bu metot belli bir trafik yükü, yol malzemesinin fiziksel özellikleri ve iklimsel koşulları göz önünde bulundurarak yolun belirli bir gerilme-deformasyon değeri için oluşacak hasarlara göre yolun performansı ve davranışı tahmin eder (Ali, 2005). Bu yöntemde önceki arazi tecrübeleri ve gözlemlerden elde edilen sonuçlardan faydalanmak önemlidir. Ayrıca bu yöntemde kullanılan en yaygın deney CBR (California Bearing Ratio) deneyidir.

Mekanistik-ampirik tasarım yöntemi, yolda trafik yükü ve çevresel faktörlerden dolayı oluşan gerilme deformasyonları mekanik teorilerle analiz eder. Bu yönüyle ampirik yöntemlerden bir adım öndedir. Çünkü bu yöntemde, tahmin ve gözlemden çok sayısal analiz mevcut, bu da daha reel sonuçlara ulaşmayı sağlamaktadır (Carvalho, 2006).

Mekanistik tasarım yöntemlerle ilgili ilk çalışma Kerkhoven ve Dormon (1953) tarafından, taban zemini üstünde oluşan düşey basınç deformasyonunun asfaltta kalıcı hasarlara neden olduğu ve bu yüzden yol tabakaları tasarımında kriter olarak kullanılması önerildi (Carvalho, 2006). Saal ve Pell (1960) asfalt tabakası altında oluşan yanal çekme deformasyonunun hesaba katılmasıyla yorulma çatlaklarının minimize edilebileceğini yayınladı (Carvalho, 2006). Yukarıda bahsedilen iki kriteri, düşey basınç ve yanal çekme deformasyonlarını, yol tasarımında aynı kavramda ilk olarak kullanan Dormon ve Metcalf (1965) kullandı. Shell metodu (Claussen, vd. 1977) ve Asfalt Enstitüsü metodu (ABD) (Shook, vd. 1982; AI, 1992), trafik yükünden dolayı yol tabakalarında meydana gelen deformasyonların hesabına yönelik kriterleri, kendi mekanistik-ampirik tasarım prosedürlerinde kullandılar (Carvalho, 2006).

Mekanistik-ampirik tasarım yöntemi ile ilgili son yirmi yılda önemli çalışmalar yapıldı. Bu çalışmalara paralel önemli gelişmeler mevcut. Bahsettiğimiz çalışmaların önemli bir bölümü Shell ve Asfalt Enstitüsü tarafından geliştirilen deformasyon kriterlerini temel alan çalışmalardır. Kendi mekanistik-ampirik tasarım yöntemlerini geliştiren birkaç isim ise şöyle: Washington Eyaleti Ulaştırma Bölümü (WSDOT), Kuzey Carolina Ulaştırma Bölümü (NCDOT) ve Minnesota Ulaştırma Bölümü (MNDOT)...(Carvalho, 2006).

Mekanistik-ampirik tasarım yöntemi ile ilgili en son çalışma Ulusal Birleşik Yol Araştırmaları Programı (NCHRP) tarafından yapılan NCHRP 1-37A projesidir (NCHRP,

2004). Bu çalışmada daha önce yapılan çalışmalarda bulunan trafik yükü ve iklimsel koşullar gibi kriterler tekrar kalibre edildi. Örneğin, trafik yükünün standart tek dingil eşdeğerliğine çevirmek yerine (AASHTO, 1993), trafikte bulunan araçlar ve yük dağılımları sınıflandırılarak kullanıldı. İklimsel olarak, yolun mevsimsel sıcaklık farklarına bağlı yol malzemesinin davranış ve performansı hesaplandı (NCHRP, 2004). Daha önceki çalışmalarda olduğu gibi trafik yükünü standardize etmek ve yol malzemesi davranış parametrelerini her mevsim için tek değer kabul ederek bu faktörleri özetlemek yerine, trafik yükünün ve yol malzeme davranış parametrelerinin bütün kombinasyonlarını toplayarak yol tabakalarını analiz etmekle daha sağlıklı sonuçlara ulaşılabileceği düşünülebilir.

1.2.1. Ülkemizde Esnek Üstyapı Tasarımı

Karayolları Genel Müdürlüğüne ait ilk üstyapı projelendirme rehberi 1969 yılında yayınlanan, Karayolları esnek üstyapı projelendirmesine ait fenni şartnamedir. Daha sonra 1984 yılında, AASHTO 72 projelendirme kriterleri baz alınarak “Karayolları Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi” hazırlanmıştır. Bu rehberde genel itibariyle sathi kaplamalı yollar ile asfalt betonu kaplamalı yolların projelendirmesi birbirinden ayrılmıştır. Ayrıca üstyapı projelendirmesinde standart tek dingil yükü tekerrür sayısı kullanılmaya başlanmıştır. 1984-2002 yılları arasındaki dönemlerde ise takviye projelendirmesindeki eksiklikler, uygulamadan kaynaklanan aksaklıklar ve taşıt eşdeğerlik faktörleri revize edilmiştir. Karayolları son dönemlerde yapılan çalışmaları ve gelişmeleri “Karayolları Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi 2006 ve 2010”da yayınlamıştır. Bu çalışmalarda AASHTO 93 üstyapı projelendirme kriterlerini esas alınmış ve mekanistik-ampirik tasarım yöntemine geçiş için hazırlıklar yapılmıştır (KEÜPR, 2006;2010).

Yapısal olarak yol altyapı ve üstyapıdan meydana gelir. Altyapı, yarma ve dolgulardan; üstyapı ise kaplama (aşınma+binder), temel ve alttemelden oluşur. Üstyapı üzerine gelen trafik yükünü taban zemine aktarır, altyapı ise trafik ve doğal coğrafi şartların etkisi altında bulunan üstyapıya gereken desteği sağlaması amacıyla inşa edilir. Üstyapının performansı, altyapının fiziksel durumu ve verdiği destek ile doğru orantılıdır.

Karayolları tarafından AASHTO 93 üstyapı projelendirme kriterleri baz alınarak kullanılan “Servis Kabiliyeti Davranış İlişkisi”ne bağlı metod, üstyapı tabaka kalınlıklarını; zemin taşıma gücü, trafik yükü, coğrafi konum ve iklimsel koşullar ile yol malzemesinin

davranış özelliklerine bağlı olarak belirler. Esnek üstyapı tasarımında öncelikli olarak taşıt dingil tipleri, sayıları ve ağırlıklarını belirlemek amacıyla yolun inşa olunacağı güzergahta “Lodometre” çalışması yapılır. Bu çalışmada bütün trafik yükleri, dingil eşdeğerlik faktörleri yardımıyla standart tek dingil yükü olan 8,2 ton’a çevrilir. Dingil ve tekerlek yükü altında yol tabakalarında basınç ve çekme gerilme-deformasyonları oluşur. Oluşan bu gerilme-deformasyonların büyüklüğü, dingil ve tekerlek tipleri ile yüklerinin tekerrürü ile birebir ilişkilidir (KEÜPR, 2006;2010).

Taban zemininin taşıma gücü üstyapı tabakalarının kalınlıklarını etkilemektedir. Bundan dolayı Lodometre çalışmasından sonra yol taban zemininin taşıma gücünü belirlemek amacıyla CBR (California Bearing Ratio) ve Esneklik Modülü (M_R) deneyleri yapılır. Esneklik Modülü (M_R) değeri laboratuvar deneyi veya CBR değeri ile olan ilişkisinden abaklar veya formül yardımıyla tahmin edilebilir (KEÜPR, 2006;2010).

Esnek üstyapı tasarımında son olarak çevresel ve iklimsel faktörler göz önünde bulundurularak yolun gerekli servis kabiliyetinin sağlanması amacıyla yol drenaj altyapısı projelendirilir (KEÜPR, 2006;2010).

Şu an dünyada ve ülkemizde genel itibariyle yol tasarımı ampirik yöntemlerle yapılmaktadır. Fakat mekanistik-ampirik yöntemlere geçiş için yoğun çalışmalar yapılmaktadır. Ülkemizde de bu yönde çalışmalar başlamıştır (KEÜPR, 2006;2010). Mekanistik-ampirik metodta yola etkiyen üç temel faktör vardır. Bunlar: trafik yükü, yol malzemesinin fiziksel özellikleri ve iklim faktörüdür (Stephanos ve Schwartz, 2007). Trafik yüklerinin yol tasarımı açısından en önemli faktördür. Çünkü trafik yükü, yol tabakalarını etkileyen en büyük fiziksel kuvvet ve yolda yapısal bozulmalara (tekerlek izi, yorulma çatlakları) neden olan en etkili etmendir. Trafik yükleri çeşit çeşittir. Bu trafikte seyreden araç tiplerinin ve ağırlıklarının farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Araç tipleri ve ağırlıklarının farklı olması dingil ve tekerlek tiplerini ile ağırlıklarını da etkilemektedir. Dingil ve tekerlekler araç yükünü yola dağıtan elemanlar olması sebebiyle dingil ve tekerlek tipleri ile ağırlıklarının farklı olması yolda gerilme deformasyonlarda değişkenliğe sebep olmaktadır. Mekanistik-ampirik yöntem açısından bakıldığında trafik yükünün yola aktarımı sağlayan tekerlek ve dingil çeşitlerinin bilinmesi ve bu tekerlek, dingil çeşitleri içinde en kritik olanlarının tespiti, trafik yükünün sınıflandırılması ve modellenmesinde kolaylık sağlayacaktır.

1.2.2. Esnek ve Rijit Üstyapı Kaplamaları

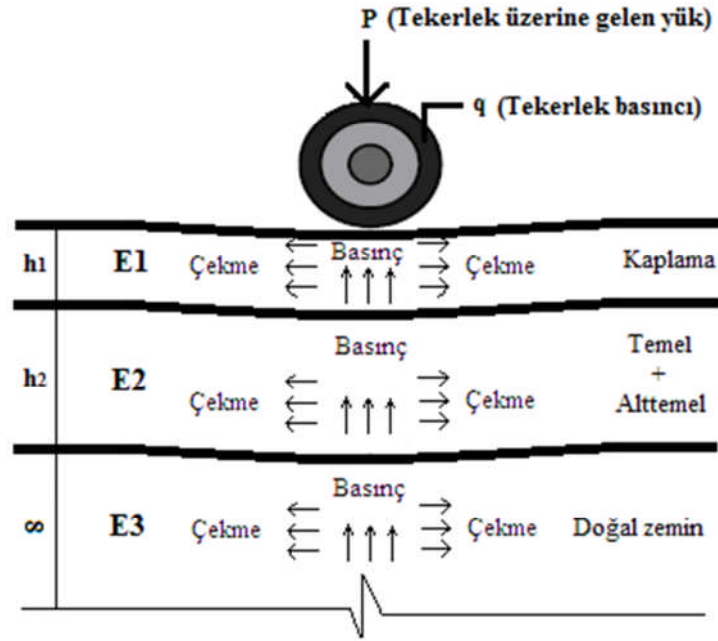
Sıcak asfalt karışımlar ile esnek kaplamaların yapımı 1870 yılında Newark, New Jersey, ABD’de başlamıştır (Wu, 2001). İlk profesyonel kaplama ise temiz, köşeli, gradasyonlu malzeme ile Pennsylvania Avenue, Washington, D.C.. de 1876 yılında yapılmıştır (Wu, 2001). İlk asfalt kaplamalarda, asfalt bağlayıcı olarak öğütülmüş kaya asfaltı kullanılmış ve buharlı silindirler ile sıkıştırılmıştır. Özellikle II. Dünya Savaşı’nın sonrasında otomobil endüstrisinin hızla gelişerek yeni yolların ve dolayısıyla kaplamaların yapımı hız kazanmıştır. II. Dünya Savaşı sırasında özellikle havaalanı ve kaplama yapımında büyük gelişmeler kaydedilmiş ve havaalanı kaplama kalınlığı tayini için CBR yöntemi ortaya konmuştur. ABD’de önceleri Maryland sonraları WASHO ve en sonunda 1960 ile 1970 yılları arasında ASHTO yol testleri ile yol kaplamaları ve Corps of Eng. ve PCA tarafından havaalanı kaplamaları tasarım yöntemleri geliştirilmiş ve zaman içinde modifiye edilerek bugünkü halini almıştır. Ayrıca SHELL, Asfalt Enstitüsü, FAA, vb. kurumların yaptıkları araştırmalarla kaplama tasarım yöntemlerinin gelişimine önemli katkılarda bulunmuşlardır.

Karayolu ve Havaalanı kaplamaları iki tip olarak sınıflandırılabilir. Birincisi: Granüller malzeme ve bitümden inşa edilen asfalt kaplama veya esnek üstyapı, İkincisi: Çimento ile inşa edilen rijit (beton) kaplamalardır (Wu, 2001). Bu iki kaplama tipinin beraber kullanıldığı uygulamalara ise kompozit (karışık) kaplamalar denir (Huang, 1993; Tunç, 2004). Rijit kaplamalar ağır ve yüksek trafik hacmine sahip yollarda granüler bir alttemel tabakası üzerine yapılan beton plaklardan ibarettir. Esnek kaplamalar çok tabakalı bir yapı olup alt tabakalar dren kabiliyeti yüksek granüler malzemelerle ve üst tabakalar ise yüksek stabilite ve sürüş konforu sağlamak amacıyla asfalt karışımlarla yapılmaktadır. Kompozit kaplamalar zamanla bozulmuş beton kaplamaların üzerine sıcak asfalt karışım takviye tabakası yapılarak veya bazen de bozulmuş esnek kaplamaların üzerine beton kaplama yapılarak elde edilir.

Yukarıda bahsedildiği gibi kaplamalar, trafik ve çevre etkilerine karşı koyan ve trafik yüklerini zemine ileten yapılardır. Trafik yüklerini zemine iletme kabiliyetleri her bir tabakanın yük dağıtma özelliğine bağlıdır. Bu nedenle kaplama kalınlığı, zeminin taşıma gücüne ve kaplamanın tipine bağlı olarak değişir. Kaplama altındaki tabakaların taşıma gücü ne kadar yüksek olursa kaplamanın performansı ve ömrü o kadar uzun olur.

Yol tabakalarında oluşan gerilme deformasyonların tümü yukarıdan aşağıya doğru derinliğin artması ile beraber azalır (Huang, 2004). Bu nedenle kaplamaları oluşturan tabakalar yukarıdan aşağıya doğru daha az kalite ve maliyete sahip olacak şekilde tasarlanmalı ve inşa edilmelidir.

Genel olarak tekerlek yükü altında esnek kaplama ve kaplama altı tabakalarında oluşan davranışlar Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Tekerlek yükü altında esnek kaplama davranışı

Yukarıda Şekil 1’de mevcut durum rijit kaplamalar içinde geçerlidir. Çünkü rijit kaplamalar her ne kadar yüksek stabiliteye sahip olsalar da üzerine gelen yükten dolayı esnek kaplamalar kadar olmazsa da belli bir miktar sehim oluşur.

Rijit ve esnek kaplamaları karşılaştıracak olursak rijit kaplamalar yapım aşamasında, maliyet bakımından esnek kaplamalara göre daha pahalıdır. Esnek kaplamalarda ise ilk yatırım maliyeti, rijit kaplamalara göre daha az olmasına rağmen daha fazla bakım-onarım gerektirmesi ve ömürlerinin daha kısa olması, ilk yatırım maliyeti açısından avantajını, dezavantaja çevirmektedir. Rijit kaplamalı yollar daha çok yüksek trafik hacmine sahip bölgeler için uygundur. Çünkü esnek kaplamalı yollara göre daha fazla trafik yükü taşıyabilmeleri ve bundan dolayı ömürlerinin daha uzun olması tercih sebebi olabilir. Ancak esnek kaplamalar uygulama aşamasında rijit kaplamalara göre daha az makine

altyapısı gerektirmesi, ayrıca kullanılan makinelerin bakım-onarımının ve kalibrasyonlarının daha kolay olması, özellikle esnek kaplamalı yollar inşa edildikten hemen sonra trafiğe açılabilmesi, esnek kaplamaları tercih sebebi yapmaktadır. Bu nedenle esnek kaplamaların performansını arttırmak yönünde araştırmalar yoğunluğunu korumaktadır.

Beton kaplamalı yolların en çok tercih edildiği yerler: Havaalanlarında pist, taksirut, apron, vb. kaplamalar, terminallerde (deniz, kara ve demiryolu) yükleme-boşaltma platformları, otopark ve endüstri tesislerinin kaplamalı sahalarında, küçük ve orta ölçekli sanayi bölgeleri ile kentiçi yollar gibi... Dünyada rijit ve esnek kaplamalar için en çok rağbet gören esnek kaplamalardır. FHWA (1990) araştırmalarında Amerika'da esnek kaplamalı yollar, tüm kaplamalı yolların %93'ünü oluşturmaktadır (Wu, 2001). NAPA'nın (2001) yayınladığı araştırmada ise bu oran %94 olarak verilmiştir (Cleveland vd., 2002). Son olarak FHWA'nın (2006) yayınladığı kaplama tipine göre yol uzunlukları istatistiğinde Amerika'da esnek kaplamalı otoyollar, tüm otoyolların %92,7'sini oluşturmaktadır. Bu durum Avrupa ve diğer gelişmiş dünya ülkeleri içinde yaklaşık böyledir. Türkiye'de ise bu oran yaklaşık %100'ü bulmaktadır.

1.2.3. Gerilme-Deformasyon İlişkisi

Trafik yükü altındaki yol davranışı, mekanistik olarak modellenerek yol katmanları içindeki gerilme deformasyonlar hesaplanır. Yol gerilme deformasyon analizi, yol davranışının analitik modellenmesi için ideal bir araçtır. Gerilme-deformasyon analizi ile yol sistemindeki katmanlar oluşturulur ve performans hesabı yapılır. Bu mekanistik tasarım teorisinin temelini oluşturur (Walubita ve F C van de Ven, 2000).

Gerilme, her bir birim alan üzerinde ölçülen kuvvet olarak tanımlanıyor (Walubita ve F C van de Ven, 2000). Yolda oluşan gerilmeler ise tekerlek yükünden dolayı oluşur. Gerilme eşitliklerini inceleyecek olursak genel olarak Hook kanununa göre gerilme hesabı aşağıdaki eşitlikle elde edilir.

Deformasyon, malzemede oluşan gerilmenin, malzemenin elastik modülüne oranıdır. Yani malzemenin rijitliğine bağlı olarak malzemede oluşan basınç ve çekme gerilmeleri altında, malzemenin gösterdiği davranış veya meydana gelen birim şekil değiştirmedir (Walubita ve F C van de Ven, 2000). Malzemede oluşan deformasyonlar malzemenin elastikiyet modülü ile ters orantılıdır. Malzemenin elastikiyet modülünün artması

malzemenin rijitliğinin artması anlamına gelir, malzeme rijitliğinin artması ise deformasyonların azalması demektir. Hook kanununa göre gerilme-deformasyon ilişkisi Eşitlik 1’de verilmiştir.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (1)$$

Burada:

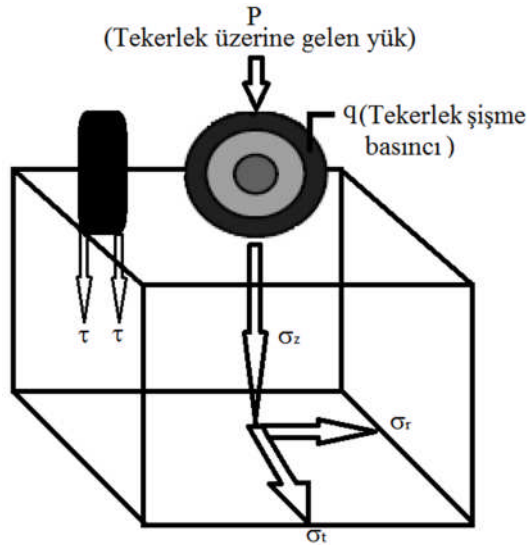
σ : gerilme

ε : deformasyon

E : elastik modülüdür.

1.2.4. Dingil Yükü Altında Yolda Oluşan Gerilme-Deformasyonlar

Tekerlek üzerine gelen dingil yükünden dolayı, yola basınç ve kuvvet uygular. Bu basınç ve kuvvete tepki olarak yolda birtakım davranışlar meydana gelir. Bu davranışlar; radyal gerilme, teğetsel gerilme ve düşey gerilme dediğimiz normal gerilmelerle kesme gerilmesidir (Huang, 2004). Bunlara ek olarak maksimum ve minimum normal gerilme arasındaki fark olarak tanımlanan deviator gerilme de eklenebilir (Walubita ve F C van de Ven, 2000). Bir de bu gerilmelerin neden olduğu deformasyonlar ve dikey defleksiyon mevcuttur.



Şekil 2. Tekerlek yükü altında yolda oluşan gerilmeler

1.2.4.1. Radyal Gerilme

Tekerleğin hareket yönüne paralel meydana gelen gerilmedir. Radyal gerilme ve teğetsel gerilme asfalt yüzeyine yakın bölgelerde basınç, derinliğin artmasıyla çekme durumuna geçer. Tekerlek altında yolda meydana gelen radyal gerilmeyi veren eşitlik aşağıdaki gibidir (Huang, 2004).

$$\sigma_r = \frac{q}{2} \left[\frac{1+2\nu-2(1+\nu)z}{(a^2+z^2)^{0.5}} + \frac{z^3}{(a^2+z^2)^{1.5}} \right] \quad (2)$$

Burada:

σ_r : radyal gerilme

ν : poisson oranı

q : tekerlek basıncı

a : tekerlek temas alanı

z : gerilmenin ölçüldüğü derinliktir.

1.2.4.2. Teğetsel Gerilme

Tekerleğin hareket yönüne teğet olarak oluşan gerilmedir. Asfaltın yüzeyine yakın bölgelerde basınç iken derinliğin artmasıyla beraber çekme durumuna geçer. Radyal gerilmeyi veren formülle teğetsel gerilmeyi veren formül aynıdır (Huang, 2004).

$$\sigma_t = \sigma_r \quad (3)$$

Burada:

σ_t : teğetsel gerilmedir.

1.2.4.3. Düşey Gerilme

Tekerlek altında, asfalta düşey yönde oluşan gerilmedir. Düşey gerilme asfalta düşey (dik) etki ettiğinden dolayı, asfalt katmanları boyunca basınç olarak devam eder. Kaplama

ve doğal zemin yüzeyinde oluşan düşey gerilme asfalt tasarımı açısından önemli bir faktördür. Yolda oluşan düşey gerilmeyi veren eşitlik Formül 3'te verilmiştir (Huang, 2004).

$$\sigma_z = q \left[1 - \frac{z^3}{(a^2 + z^2)^{1.5}} \right] \quad (4)$$

Burada:

σ_z : düşey gerilme

q : tekerlek basıncı

a : tekerlek temas alanı

z : gerilmenin ölçüldüğü derinliktir.

Düşey basınç gerilmesi, yolda tekerlek izi hasarına neden olur (Huang, 2004). Özellikle yaz mevsimi itibariyle sıcaklık değerlerin yüksek olduğu aylarda, tekerlek izi hasarı olma olasılığı daha büyüktür. Çünkü yüksek sıcaklıklarda ($\geq +25$), asfalt viskoelastik özellik gösterir. Bundan dolayı asfalt akışkanlaşır ve tekerlek yükü altında meydana gelen defleksiyonlar ve deformasyonlar (birim şekil değişikliği) kalıcı olur. Örneğin tekerlek izi hasarı gibi... Düşük sıcaklıklarda ($\leq +25$) ise asfalt elastik özellik gösterir ki bu asfaltta tekerlek yükü altında meydana gelen defleksiyonlar ve deformasyonların (birim şekil değişikliği), çok düşük oralar dışında hemen hemen tamamen iyileşebilir olması anlamına gelmektedir.

Düzenli veya düzensiz yüklemelerde, düşey basınç gerilmesinin derinliğin artması ile hızla azaldığı görülmüştür (Walubita ve F C van de Ven, 2000; Xie ve Zheng, 2003). Yaklaşık 20-25 cm'lik asfalt kaplamanın yüzeyinde, tekerlek temas basıncı etkisiyle oluşan düşey basınç gerilmesinden dolayı kaplama altında meydana gelen düşey basınç gerilmesi farkı %75'tir (Walubita ve F C van de Ven, 2000).

1.2.4.4. Deviator Gerilme

Deviator gerilme, maksimum normal gerilme ile minimum normal gerilme arasındaki fark olarak tanımlanır (Walubita ve F C van de Ven, 2000).

$$\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_2 \quad (5)$$

Burada:

σ_d : deviator gerilme

σ_1 : maksimum normal gerilme

σ_3 : minimum normal gerilmedir.

1.2.4.5. Kayma Gerilmesi

Kayma gerilmesi, deviator gerilmenin yarısıdır (Walubita ve F C van de Ven, 2000). Maksimum kayma gerilmesi tekerlek kenarı altında meydana gelir. Tekerlek kenarı altında meydana gelen maksimum kayma gerilmesi derinlikle artar, maksimum pik noktasına 60 mm civarında ulaşır, daha sonra tekrar azalır (Su vd., 2008).

$$\tau = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \quad (6)$$

Burada:

τ : kayma gerilme

σ_1 : maksimum normal gerilme

σ_3 : minimum normal gerilme

En büyük kayma kuvveti gerilmeleri yüzeyde, tekerlek kenarı bölgesinde meydana gelir. Tekerleğin altında yüzeyin 3-8 cm arasında en büyük kesme gerilmesi değeri elde edilir. Derinliğin ve tekerlek radyal mesafesinin artmasına bağlı olarak kayma gerilmeleri azalır (Xie ve Zheng, 2003; Su vd., 2008).

Kayma gerilmesi yolda tekerlek izi ve çatlaklarına neden olan en önemli faktördür. Tekerlek basıncı ve yükü, özellikle düşey basınç gerilmesi ve kayma kuvvetini etkileyen faktörlerdir. Asfalt kalınlığı ise kayma kuvveti üzerinde çok az etkilidir. Ayrıca malzeme rijitliği kayma kuvvetini etkiler (Su vd., 2008).

1.2.4.6. Defleksiyon

Esnek veya rijit bir üstyapıda, üzerinden geçen tekerlek yüklerinden dolayı, üstyapıda oluşan düşey yöndeki geçici deformasyona “defleksiyon” denir. Bir üstyapının yük altında gösterdiği defleksiyon, elastik deformasyon şeklindedir. Başka bir deyişle yükün uygulanmasıyla oluşan defleksiyon, yükün kalkmasıyla geri döner. Ancak, trafik yükünün kısa aralıklarla tekrarlanması nedeniyle yol üstyapısı sürekli geri gelen deformasyonların etkisinde kalır ve yorulma olarak isimlendirilen bir olay çıkar. Yorulma, oluşan defleksiyonların mertebesi ve üstyapının mukavemeti ile alakalıdır. Başka bir deyişle yüksek defleksiyonlar üstyapının zayıflığının göstergesidir ve defleksiyonlar arttıkça yol üstyapısındaki bozulmalar artar (KEÜPR, 2006).

Asfalt elastik ve viskoz davranış gösteren bir malzeme olması nedeniyle tekerlek yükü altında asfalt yüzeyinde ve ara yüzeylerinde defleksiyon (sapma) meydana gelir. Bu defleksiyonlar yüksek sıcaklıklarda tekerlek izi hasarına neden olur. Çünkü asfalt yüksek sıcaklık ve teker yükü altında viskoz özellik gösterir, bu da asfaltın akıcı hale gelmesi ve teker yükü altında oluşan defleksiyonların geri iyileşmemesine neden olur. Fakat düşük sıcaklıklarda asfalt elastik özellik gösterdiğinden dolayı oluşan defleksiyonlar iyileşebilir. Yolda teker yükü ve basıncı altında oluşan defleksiyon 8. eşitlikle bulunur (Huang, 2004). Bu durum esnek kaplamalı yollar için geçerlidir, rijit kaplamalı yollarda böyle bir durum söz konusu değildir.

$$w = q \cdot a \left[\frac{(1+\nu)}{E} \right] \left[\frac{a}{(a^2 + z^2)^{0.5}} + \frac{1-2\nu}{a} \right] \left[(a^2 + z^2)^{0.5} - z \right] \quad (7)$$

Burada:

w : defleksiyon

q : tekerlek basıncı

ν : poisson oranı

E : elastik modülü

a : tekerlek temas alanı

z : defleksiyonun ölçüldüğü derinliktir.

1.2.5. Gerilme-Deformasyonlara Bağlı Yolda Oluşan Tipik Bozulmalar

Tekerlek yükü altında yolda meydana gelen tüm aksenal gerilmeler asfalt yüzeyine yakın bölgelerde basınçtır. Bu gerilmeler asfalt yüzeyinde deformasyonlara neden olmaktadır. Orta bölgelerde düşey gerilme (σ_z) basınç olarak mevcut iken yatay gerilmeler (σ_x, σ_y) basınç durumundan çekme durumuna geçer. Asfalt altında ise yatay gerilmeler (σ_x, σ_y) çekme iken düşey gerilme (σ_z) basınçtır. Asfalta meydana gelen basınç gerilmeleri yolda tekerlek izine (rutting), asfalt altında meydana gelen çekme gerilmeleri ise yorulma çatlaklarına (fatigue cracking) neden olur. Maksimum gerilme direk tekerlek altında meydana gelir. Bu gerilme, derinliğin ve tekerlek yatay mesafesinin artmasına bağlı olarak azalır (Walubita ve F C van de Ven, 2000).

Huang (2004) yolda meydana gelen tipik bozulmaları; tekerlek izi (rutting), yorulma çatlakları (fatigue cracking) ve termal çatlaklar (thermal cracking) olarak sınıflandırmıştır. Bunların içinden tekerlek izi (rutting) hasarı yolda en yaygın olarak karşılaşılan hasar tipidir.

Son dönemlerde yapılan çalışmalarda yolda oluşan tipik bozulmaları azaltmak amacıyla, yol tabakalarında geosentetiklerin kullanılması tavsiye edilmektedir (Sert ve Akpınar, 2011). Yolda kullanılan geotekstillerin tabaka rijitliğini arttırarak tekerlek izi hasarı, yorulma çatlakları ve özellikle taban zemini üzerinde oluşan deformasyonları azalttığı görülmüştür.

1.2.5.1. Tekerlek İzi Hasarı

Tekerlek izi hasarı, asfalt betonu üzerinde, tekerlek izi boyunca meydana gelen boylamsal çöküntüdür. Bu çöküntü doğal zeminden kaplamaya kadar bütün yol katmanlarında görülebilir. Genel olarak hareketli kümülatif trafik yükünden dolayı oluşur (Huang, 2004). Trafik yükü altında yolda oluşan kesme gerilmesi, defleksiyon, düşey basınç gerilmesi ve deformasyonları nedeniyle asfaltın visko-plastik davranışı sonucu oluşan kalıcı hasarlardır. Tekerlek izi nedeniyle asfalt yüzeyinde oluşan su birikintileri, arabada sarsıntı, hâkimiyet kaybı, kayma ve fren mesafesinde kısalma gibi sorunlara neden olur (Yoder ve Witczak, 1975; Walubita ve C van de Ven, 2000). Özellikle kış aylarında

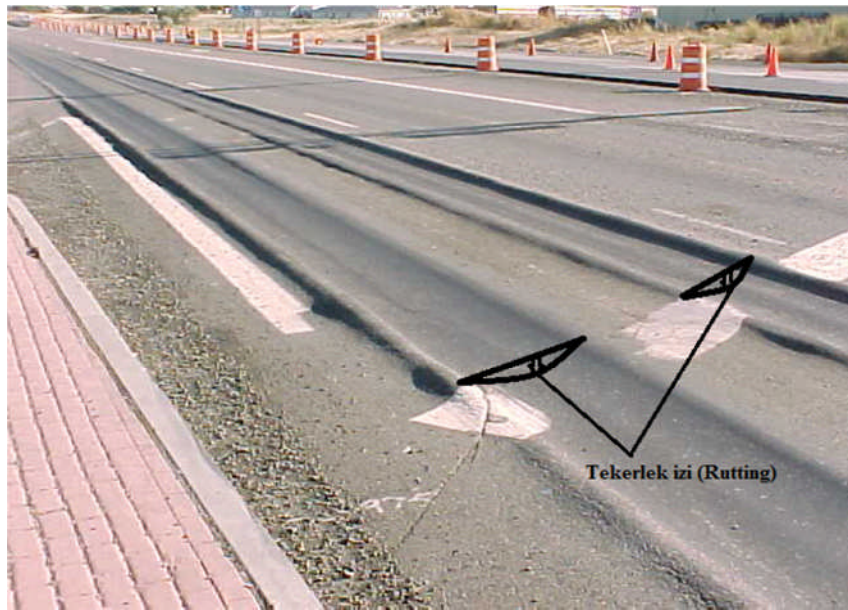
yolda, tekerlek izi hasarından dolayı biriken suyun donması, araba hâkimiyeti açısından ciddi problemler doğurur ki bu da büyük kazalara sebebiyet verebilir (Wu, 2001).

Gün geçtikçe trafik yoğunluğunun artması, kamyonların yükleme hadlerinin büyümesi ve özellikle tekerlek basınçlarının artması, tekerlek izini yolda daha yaygın bir problem haline getirmektedir (Wu, 2001).

1.2.5.1.1. Tekerlek İzi Hasarının Nedenleri

Tekerlek izi hasarı yalnızca esnek kaplamalı yollarda meydana gelir. Ve yukarıda da bahsedildiği gibi tekerlek altında, yol boyunca oluşan sürekli deformasyon veya tekerlek izidir. Tekerlek izi hasarı bütün kaplama tabakalarıyla beraber doğal zeminde de meydana gelebilir. Tekerlek yükü yol malzemesinin yanıl hareketine ve şişmesine neden olur. Yol malzemesinin yanıl hareketi ve şişmesi ise yapım esnasında yol katmanlarının iyi sıkıştırılmamış olması ve sıcak havalarda asfaltın plastik davranışından kaynaklanmaktadır (Huang, 2004).

Tekerlek izi hasarı en az iki nedenden dolayı istenmez. Birincisi: Eğer asfalt kaplaması geçirimsiz ise yüzeyde biriken sular 5 mm derinliği aştığında özellikle yolcu arabaları açısından sarsıntılar tehlike oluşturur. İkincisi: Yine tekerlek izi derinliğine bağlı olarak sürüş ve direksiyon hâkimiyetinde azalmalar meydana gelir (SHRP-A-415, 1994).



Şekil 3. Asfalt kaplama tabakası üstünde oluşan tekerlek izi hasarı

Patterson'a (1987) göre tekerlek izi hasarını önlemede önemli iki mekanizma vardır ki bunlardan biri "yoğunluk" diğeri ise "plastik akıcılıktır". Yoğunluk, yol katmanlarını teşkil eden malzeme parçacıklarının sıkıştırılma miktarı ile orantılıdır. Malzemeyi oluşturan parçacıklar iyi sıkışırsa malzeme yoğun ve rijit olur. Yoğunluk, malzeme parçacıklarının iyi sıkışması ve yine malzemeyi oluşturan küçük parçacıklardaki bozulmalar nedeniyle değişir. Yol inşaatı esnasında, sıkıştırma miktarı ile yol katmanlarının yoğunlukları kontrol edilebilir. Plastik akıcılık ise miktar ve yoğunlukla değil, kayma (kesme) deplasmanlarından kaynaklanır. Kayma (kesme) deplasmanları tekerlek temas alanının veya yüklü bölgenin kenarlarında ağırlıktan ve basınçtan dolayı meydana gelir. Kayma (kesme) gerilmesi, malzemenin kesme dayanımını aştığı zaman, malzemede sünme olur. Kayma (kesme) deplasmanlarından dolayı oluşan bu sünmeye "plastik akma" denir. Bu mekanizma, modern yol tasarımında yer alan, kayma (kesme) dayanımı kriterlerine (toprak için CBR, bitümlü malzeme için Marshall ve Hveem) göre malzeme seçimi yaparak kontrol edilebilir (Wu, 2001).

SHRP'nin (1994) A-318 raporunda ise tekerlek izi hasarının, karmaşık yoğunluk kombinasyonlarından ve kesme deformasyonundan kaynaklandığı belirtildi. Tekerlek izi hasarının birinci nedeni olarak da asfalt kaplamasının üst tabakalarında meydana gelen yoğun kayma (kesme) gerilmelerinin olduğu savunuldu. Kayma birim şekil değiştirmeler sıcaklıktan etkilenmektedir. Bu raporda, AASHO tarafından yapılan köklü bir çalışmada, tekerlek izi hasarının iki önemli faktörü arasından, kayma birim şekil değiştirmelerin yoğunluktan daha tehlikeli olduğunun bildirildiği ifade edildi. Yapılan çalışmalarda asfalt katmanında meydana gelen tekerlek izi hasarı derinliğinin yük tekrar sayısı ile orantılı olduğu ve limit olarak 10 cm'ye kadar çıktığı anlaşılmıştır. En azından yol alt tabakaları rijit malzemeden inşa edilirse tekerlek izi hasarı asfalt kaplama ile sınırlı kalır (SHRP-A-415, 1994).

1.2.5.1.2. Tekerlek İzi Oluşumuna Etkiyen Faktörler

Asfalt kaplamalı yollarda kullanılan malzemeler; asfalt betonu karışımlar, granüler temel tabakası malzemeleri ve taban zemininden oluşur. Asfalt betonu karışımlar ise iyi dizayn edilmiş agrega kombinasyonunun asfalt çimentosu ile kaplamasından teşkil olunur (Asphalt Institute, 1995). Yolda kullanılan malzeme karakteristiğinin çeşitliliği, tekerlek izi

hasarına karşı malzemenin direncini tehdit eden en önemli nedendir. Diğer nedenler ise trafik yükü ve sıcaklık değişimleri olarak sıralanabilir. Bu faktörleri tekerlek izi hasarını etkileyen en önemli faktörler olarak da sıralayabiliriz (Wu, 2001).

Agreganın, tekerlek izi hasarına karşı dayanımını etkileyen en önemli karakteristikleri: Yüzey dokusu, şekli, porozite (boşluk hacmi) ve agrega mineralojisidir. Yüzey dokusu ve agrega şekli, taneler arasındaki sürtünme açısından önemli bağlayıcılarıdır. Agregata taneleri arasındaki sürtünme, tekerlek izi hasarı dayanımı açısından malzemenin kayma (kesme) dayanımını sağlamaktadır. Taneler arasındaki yüksek sürtünme, yüksek kayma (kesme) dayanımı; düşük sürtünme ise düşük kayma (kesme) dayanımı sağlamaktadır. Agregalar yüzeysel dokusu itibariyle dört sınıfta toplanır. Bunlar: Çok pürüzlü, pürüzlü, pürüzsüz, parlak agregalardır. Tekerlek izi performansı açısından ilk iki sınıfın kullanılması arzulanmaktadır. Çünkü yukarıda da bahsedildiği gibi agrega tanelerinin arasındaki sürtünme oranının yüksek olması, malzemenin kayma (kesme) dayanımını arttırmaktadır. Agregata şekil olarak açılı, yuvarlağa yakın veya yuvarlaktır. Şekil olarak genellikle doğal açılı veya kırmataş agrega kullanımı tavsiye edilir (Archilla ve Madanat, 2000).

Agreganın yüzeysel gradasyonu, taneler arası yüksek sürtünme açısından çok önemli bir faktördür (Kandahl, 1990; Hughes ve Maupin, 1987). Ayrıca agrega gradasyonu, boyutsal açıdan ne kadar geniş aralığa sahip olursa malzemedeki boşluk oranı o kadar düşük olur, bu da daha iyi bir tekerlek izi hasarı dayanımını sağlar (VMA) (Brown vd., 1986). Bununla birlikte geniş agrega gradasyonunun taneler arasındaki boşluk oranını azaltarak yüksek kenetlenme sağladığı ve buna bağlı olarak kayma (kesme) dayanımını arttırdığı bilinmektedir (Brown ve Cooper, 1984).

Tekerlek izi hasarı için asfalt çimentosunun en önemli karakteristiği, yüksek sıcaklı değerlerinde rijit olmasıdır. Rijit binderler, sürekli deformasyonlara karşı kaplamayı destekler ve mukavemetinin artmasını sağlarlar. Çünkü kesme deformasyonları açısından rijit binderler daha az rijit binderlere göre daha küçük deformasyon değerlerine sahip olduğu sabit yükselteli basit kesme testi ile tespit edildi (Sousa vd., 1993). Hughes ve Maupin'e (1987) göre asfalt karışım dizaynı verileri açısından binder tabakalarının viskozitesi, agrega gradasyonu kadar önemli değildir. Bunun nedeni agrega gradasyonunun agrega taneleri arasındaki kenetlemeyi sağladığı ve buna bağlı olarak binder viskozitesinin düşmesidir (Wu, 2001).

İyi performans için kaplama malzemesi karışımları içindeki asfalt miktarı önemlidir. Çünkü tekerlek izi hasarı perspektifinden baktığımızda asfalt miktarı, yolda hem daha yüksek stabilite hem de konfor sunmaktadır. Şu unutulmamalıdır ki karışım dizaynında bulunan malzeme miktarları ve kalitesi, tekerlek izi hasarı direncini ve dayanıklılığı birinci derece etkilemektedir. Bu yüzden genellikle tekerlek izi hasarı nedeniyle kullanılan optimal asfalt çimentosu miktarı yerine daha yüksek bir miktar kullanılmalıdır (Wu, 2001).

Asfalt betonu karışımları içinde hava boşluğu, kaplama yapımı esnasında uygulanan sıkıştırma oranı ile değişkenlik gösterir. Yüksek sıkıştırma oranı hava boşluğu miktarını düşürmektedir. Bu yüzden yüksek sıkıştırma oranı, yüksek stabilite sağlar. Fakat şunu da belirtmek lazım, yapılan deneysel çalışmalar asfalt kaplamasında, %3'ün altındaki hava boşluğu oranının, kaplamanın stabilitesini oldukça düşürdüğü görülmüştür (Huber ve Heiman, 1987). Agregada gradasyonu, agregada taneleri içindeki boşlukları kontrol ederek asfalt malzemesi ile agregada porozitesinin kuvvetli birleşimini, bağ yapmasını sağlar. Bundan dolayı diyebiliriz ki agregada gradasyonu, karışım içindeki hava boşluklarını da kontrol eder. Tekerlek izi hasarını etkileyen faktörleri kontrol etmek oldukça zordur. Çünkü bu faktörlerin birçoğu birbiriyle ilişkilidir (Wu, 2001).

Granüler malzeme ve toprak malzemesi özellikleri şu faktörlerden etkilenmektedir. Bunlar: Gradasyon, su miktarı (yüzdeliği), yoğunluk, gerilme durumu, agregada şekli ve yüzey pürüzlülüğüdür (Haas vd., 1994). Buna benzer agregalar ile ilgili açıklamalar yukarıda mevcuttur. Ayrıca agregalar nitelik ve nicelik bakımından kohezyonlu ve kohezyonsuz olarak sınıflandırılabilir. Asfalt betonu karışımlarındaki agregaların, tekerlek izi hasarı dayanımına etkileri açısından en önemli faktörü, granüler tabakalardaki su mevcudiyetidir. Bu su mevcudiyeti agregada performansını etkilemektedir. Su içeriğine ve sıkıştırma oranlarına bağlı olarak tekerlek izi hasarı dayanımı varyasyonları geoteknik mühendisliği literatüründe genişçe rapor edilmiştir (Holtz ve Kovacs, 1981).

Tekerlek izi hasarını etkileyen faktörlerden olan yol malzemesi ile ilgili özetle şu söylenebilir ki asfalt betonu karışımlarının davranışları çok komplekstir. Asfalt betonu karışımları davranışlarını etkileyen birçok faktör arasında karışık (kalabalık) bir etkileşim söz konusudur. Bütün faktörler önemlidir. Örneğin bir faktörün kötü olması (haddinden fazla asfalt içeriği vb.) diğer iyi faktörleri geçersiz kılar (SHRP-A-415, 1994).

Asfalt betonu üzerine etkileyen kuvvetlerin etkisiyle asfaltta oluşan deformasyonların mahiyeti itibarıyla tekerlek izi hasarını etkileyen bir başka faktör de tekerlek veya aks yükleme süresidir. Yükleme süresinin uzamasına bağlı olarak tekerlek izi hasarı oranı

artar. Özellikle trafiğin yavaş seyrettiği yol kesimlerinde, bu faktörün göz önünde tutulması gereklidir. Örneğin trafik sıklığının arttığı köprü giriş çıkışları gibi...(Huang, 2004; White, 1996).

Trafikte seyreden araçların dinamik yüklemeleri, tekerlek izi hasarını etkileyen bir başka faktördür. Asfalt üzerindeki hareketli araçlardan dolayı asfalt üzerine gelen yükler, asfalt yüzeyinde çeşitli dinamik kuvvetlerin oluşmasına neden olur (Sweatman, 1983). Asfalt kaplamalarda oluşan tekerlek izi hasarı, yükleme süresi ve hıza duyarlıdır. Araç yüklerinin dinamik özelliği, tekerlek izi derinliğinin ilerlemesini etkilemektedir (Wu, 2001). Dinamik yüklerin tekerlek izi hasarı oluşumunu nasıl etkilediği ve araç yüklerinin dinamik özelliğinin yolda modellenmesi üzerine odaklı araştırmalar güncel olarak devam etmektedir.

Tekerlek izi hasarını etkileyen diğer faktörlerden biri aks (dingil) yükü, bir diğeri ise aks konfigürasyonudur. Trafikteki aks çeşitliliğini ve araç ağırlıklarının farklılıklarını göz önünde bulundurursak trafikteki bu farklı kompozisyon, trafik yükünün hesabını karmaşık hale getiriyor. Bu karmaşıklıkları gidermek amacıyla AASHTO 1961'den beri kullandığı farklı dingil ve taşıt ağırlıklarını Standart Tek Dingil yüküne dönüştürme metodunu geliştirdi (Tunç, 2001). AASHTO'nun (1993) son dizayn rehberinde yer alan standart tek dingil yükü (ESAL) değeri 8.2 tondur (80 kN). Standart tek dingil yükü eşitliği ile trafik etkisi, tek tekerleğe özetlendi. Gerçek trafik verileri (yükler ve yük aplikasyon sayısı vb.), 8.2 ton standart tek dingil yüküne çevrilir ki bu dingil yükü de yolda aynı hasar etkisini meydana getirmektedir. Asfalt araştırmacıları arasında tek tekerlek kullanımı, asfalt dizaynı ve performans analizleri ile ilgili modellemelerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Fakat maalesef, AASHTO'nun (1993) son dizayn rehberinde ve daha önceki dizayn rehberlerinde de verilen standart tek dingil yükü (ESAL) eşitliklerinin hepsi yolun servis kabiliyetini ölçme ile ilgilidir. Şu an kullanılan servis kabiliyeti indeksi, AASHO yol testinde geliştirilmiş yol durumu ile ilgili kullanıcıların pratik olarak yararlanacağı bir ölçektir. Tekerlek izi hasarı ile ilgili dingil yükleme eşitlikleri ile servis kabiliyetini ölçmeye yönelik eşitlikler farklı olabilir. Standart tek dingil kullanımı, tekerlek izi hasarı tahmini için tam olarak uygun olduğu söylenemez (Wu, 2001). Aks konfigürasyonu asfalt dizaynı açısından önemli bir faktördür. Trafikte tek aks, tandem (çift) aks ve tridem (üçlü) aks konfigürasyonları mevcuttur. Standart tek dingil yükü 8.2 ton (80 kN) iken tandem aks için 14.7 tondur (143 kN). AASHTO'nun (1993) varsayımına göre 14.7 ton (143 kN) tandem aksın neden olduğu hasar, yaklaşık olarak standart tek dingil yükünün neden

olduğu hasarla aynıdır. Bu varsayım AASHTO tarafından eski tasarım kriterlerine göre türetilmiş bir varsayımdır. Yeni geliştirilen dizayn kriterleri için bu varsayımın tamamen doğru olduğu söylenemez (Wu vd., 1999). Bu nedenle mekanistik çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır.

Tekerlek tipi, tekerlek şişme basıncı ve trafik seyir çizgisi tekerlek izi hasarına etki eden faktörlerdir. Phang (1988) tekerlek şişme basıncının 5.1 kg/cm^2 (75 psi) olan normal değerinden 7.6 kg/cm^2 'ye (110 psi) çıkarılması nedeniyle Kanada yollarında iki kat daha fazla tekerlek izi hasarı meydana geldiğini bildirmiştir. Kim'in (1988) bulduğu sonuçlara göre tekerlek basıncının artması, asfalt kaplaması altında oluşan maksimum çekme gerilmesi ve kaplama ortasında meydana gelen düşey basınç gerilmesinin artmasına neden olmuştur (Wu, 2001).

Şu bilinen bir gerçek ki trafik bir tekerlek izinde akmaz, trafiğin yanal olarak dağıtıldığı bir trafik seyir çizgisi vardır. Üzerine gelen yükten dolayı tekerlek izi altında en fazla gezinmeye maruz kalan bölgelerde tekerlek izi hasarı meydana gelir. Trafiğin hep aynı seyir çizgisinde takip etmesi tekerlek izi hasarını olumsuz yönde etkiler, hasarın oluşumunu veya ilerlemesini tetikler. Trafik seyir çizgisi ne kadar genişse veya tekerlek üzerine gelen yük ne kadar geniş alanlara dağıtılırsa tekerlek izi hasarı oluşumu ve tekerlek izi hasarı derinliği o kadar azalır (White, 1998).

Son olarak tekerlek izi oluşumunu etkileyen faktör, iklim koşullarıdır. Mevsimsel hava değişiklikleri, yolda kullanılan malzemenin özelliklerinde değişikliğe neden olmaktadır. Dolayısıyla yolda kullanılan malzemenin özelliğinin değişmesi, yol karakteristiğini olumsuz yönde etkiler (OECD, 1998). Özellikle asfalt çimentosu, yüksek sıcaklıktan çabuk etkilenmektedir. Asfalt çimentosu yüksek sıcaklıkta (+25 ve üzeri) yumuşamakta ve dolayısıyla üzerine gelen yükü taşıma bakımından zayıflamaktadır. Bu nedenle asfalt malzemesi daha fazla kesme kuvveti ve hasara maruz kalmaktadır (Brosseaud vd., 1993). Düşük sıcaklıklarda (0 ve altı) ise temel ve alttemel tabakalarında meydana gelen "donma-çözümler" asfalt performansını kötü etkilemekte ve tekerlek izi hasarı oluşumuna neden olabilmektedir (OECD, 1998).

KGM'nin (2006) Karayolları Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberinde yer alan asfalt betonu ve sathi kaplamalı yollarda meydana gelen tekerlek izi oluşumuna etkileyen faktörleri ve yukarıda verilen konuyu maddeler halinde özetleyecek olursak:

- Yüksek ısı, düşük viskoziteli bağlayıcı ve yüksek bitüm içeriği nedenleri ile bitümlü sıcak karışım tabakalarının stabiliteğini kaybetmeleri

- Bitümlü sıcak karışım tabakalarının yetersiz sıkıştırılması
- Üstyapı tabakalarının aşırı gerilmeler altında kalıcı deformasyonlara maruz kalması
- Trafik yükleri altında boşluk suyu basıncı nedeniyle doygunluğa ulaşan temel ve alttemel tabakalarının stabiliteelerini kaybetmeleri
- Drenaj yetersizliği ve/veya yetersiz sıkışma nedeni ile üstyapı tabanının stabilitesini kaybetmesi, taşıma gücünün zayıflaması
- Banket malzemesinin stabil olmaması, yeterli yanal desteği sağlayamaması

gibi faktörler tekerlek izi hasarı (oturma) oluşumunu etkileyen faktörlerdir.

1.2.5.2. Yorulma Çatlakları

Yorulma çatlakları, stabilize temel tabakası veya kaplama yüzeyinde kümülatif tekrar eden tekerlek yükü altında meydana gelen ve sürekli ilerleyen çatlaklardır. Yorulma çatlaklarına, kaplama tabakalarının altında meydana gelen çekme gerilme deformasyonları neden olur. İlk çatlaklar kaplama altından başlar, yüzeye doğru yayılarak devam eder. Nihai olarak bu çatlaklar kaplama yüzeyinde, tekerlek hareket yönü boyunca timsah sırtı çatlakları (aligator) olarak meydana gelir. Asfalt tabakalarında meydana gelen yorulma çatlakları, asfalt yapısında meydana gelen temel yapısal hasarlardan biridir. Çoğunlukla yorulma çatlaklarına trafik yükü neden olur. Kaplama yüzeyinde meydana gelen aligator çatlaklardan dolayı yağmur suları, asfalt katmanlarına sızar ve asfaltta yapısal hasarlara neden olur. Asfaltta meydana gelen yorulma çatlakları hasarı metrekareye düşen çatlak oranı olarak ölçülür (Walubita ve C van de Ven, 2000).

Yorulma çatlakları asfalt dizaynında kullanılan önemli bir faktördür. Asfalt altında meydana gelen çekme deformasyonu, mekanistik dizayn açısından yorulma çatlaklarını kontrol eden bir parametredir (Baburamani, 1999).

Asfalt ve beton kaplamalı yollarda meydana gelen çatlakların birçok türü ve nedenleri vardır. Örneğin sıcaklık, kullanılan malzeme türü ve oranı, yük, tekerlek ve dingil konfigürasyonları gibi... Yolda meydana gelen çatlaklar içinde popüler olanı boylamsal yönde meydana gelen çatlaklardır ki bu çalışmada araştırılan yük, tekerlek ve aks konfigürasyonu bu hasar tipine en çok etki eden faktörlerdir (Akpınar, 2008).



Şekil 4. Asfalt kaplama tabakasında meydana gelen yorulma çatlakları

1.2.5.2.1. Yorulma Çatlaklarının Nedenleri

Yolda meydana gelen yorulma çatlaklarının başlıca nedenleri, tekerlek yükü tekrarı nedeniyle oluşan çekme gerilme-deformasyonları ile çevresel faktörlerdir (Baburamani, 1999). Yol, servis ömrü boyunca tekerlek yüküne maruz kalır. Bunun sonucunda tekerlek tekrar yükü kümülatif olarak artar. Kümülatif artan tekerlek yükü, zamanla yolda deformasyonların oluşumuna sebep olur. Yol altında meydana gelen çekme deformasyonları ve malzemenin çevresel faktörler nedeniyle yaşlanması sonucunda, asfalt altında çok küçük çatlaklar meydana gelir, zamanla bu çatlaklar yüzeye doğru yayılarak asfalt üstünde geniş çatlakların oluşumuna neden olur. Yorulma çatlaklarına neden olan çevresel faktörlerden biri olan sıcaklık ise mevsimsel ve gün içindeki farklılık nedeniyle malzemenin mukavemetini etkiler, ayrıca sıcaklık farkından dolayı oluşan genleşme-büzülme gibi faktörler yorulma çatlaklarına neden olur. Bunun yanında yağışlarla beraber artan yer altı su seviyesi nedeniyle yol katmanlarında oluşan şişme ve çökme gibi faktörler yol katmanlarının kaplamaya sağladığı desteği düşürür, buna bağlı olarak tekerlek yükü altında kaplamada oluşan sehim artar ve çatlak oluşumuna neden olur.

1.2.5.2.2. Yorulma Çatlaklarına Etki Eden Faktörler

Yol performansını ve yolda meydana gelen yapısal hasarları etkileyen başlıca faktörler: Yolda gerilme-deformasyonlara neden olan trafik yükü, çevresel faktörler ve asfalt karışım tipi veya yolda kullanılan malzeme çeşitliliğidir (Baburamani, 1999). Bu faktörleri ayrıntılı inceleyecek olursak trafik yükü yola tekerlek ve aks yardımıyla aktarılır, bu da yolda tekerlek yükü altında oluşan hasarların direkt tekerlek ve aks tiplerinden etkilendiğini gösterir. Tekerlek şişme basıncı, tekerlek ile asfalt arasındaki temas yüzeyini belirlemesi nedeniyle gerilme deformasyon oluşumunu etkiler, dolayısıyla yorulma çatlakları oluşumunu da etkilediği söylenebilir (Xie ve Zheng, 2003). Ayrıca trafik hızına bağlı olarak da yolda oluşan gerilme deformasyonların değiştiği bilinmektedir (Kim vd., 2001). Gerilme deformasyonların yolda oluşan hasarların temel nedeni olduğu bilindiğine göre trafik hızının yorulma çatlaklarını etkilediği anlaşılır. (İleriki konularda tekerlek ve aks konfigürasyonları, tekerlek basıncı ve trafik yükünün yol hasarları üzerindeki etkisi ayrıntılı olarak incelenecektir, o yüzden burada kısa kesildi). Çevresel faktörler ise: Sıcaklık, yaşlanma vb. faktörlerdir ki bunlardan sıcaklığın asfalt üzerinde önemli etkileri bulunmaktadır. Bilindiği üzere asfalt viskoelastik bir malzemedir. Bunun anlamı sıcaklık oranları değişimine bağlı olarak asfalt rijitliği değişir. Koole vd. (1989) göre rijitliğin değişmesine bağlı olarak trafik yükü altında, asfalt katmanları içinde meydana gelen gerilme-deformasyonlarda da değişiklikler meydana gelir. Sonuç olarak asfalt kaplaması altında oluşan ve yorulma çatlaklarına neden olan çekme gerilme-deformasyonu sıcaklığa bağlıdır ve sıcaklık değişimi, asfalt malzeme karışımını rijitliğini etkilemektedir. Yüksek rijitliğe sahip asfalt malzemedede oluşan yorulma çatlakları oranı, düşük rijitliğe sahip asfalt malzemedede oluşan yorulma çatlakları oranına göre daha düşüktür (Baburamani, 1999).

Gün içinde ve mevsimsel olarak oluşan sıcaklık farkları asfaltın daha çabuk yıpranmasına neden olur. Çünkü yüksek sıcaklıkta asfalt yumuşar ve zayıflar, böylece mukavemeti düşer ve mukavemeti düşen yol katmanlarının trafik yükü altında yorulma çatlakları oluşumu oranı büyür. Düşük sıcaklıklarda ise yol katmanları içinde bulunan suyun donma-çözülme etkisiyle asfalt malzemesinde çatlaklar meydana gelir. Bu çatlaklar sayesinde su, yol üst tabakalarına kadar çıkar ve yine donma-çözülme etkisi ve trafik yükü etkisiyle zamanla çatlaklar yüzeyde yayılarak ilerler (OECD, 1988).

Bilindiği üzere trafikte seyreden araçlar farklı tekerlek ve aks konfigürasyonlarının yanında, farklı yük dağılımı, tekerrür ve hıza sahiptir. Asfalt visko-elastik olduğu için

trafik yükü altında yol katmanlarında defleksiyon (esneme) meydana gelir, yük kalktıktan sonra asfalt tekrar eski halini (iyileşme) alır. Asfaltta meydana gelen bu iyileşme periyotları, trafikte seyreden araçların hızına ve tekerrür sayısına bağlı olarak değişir. Bu dinlenme veya iyileşme periyodu arasında yolda oluşan gerilme-gevşemeler esnasında, yolun binder tabakasında mikro çatlaklar meydana gelir. Zamanla bu çatlaklar kaplama yüzeyine doğru yayılarak genişler (Kim, Little ve Benson, 1990; Kim, Whitmoyer ve Little, 1994).

Asfaltta meydana gelen iyileşmeler, asfalt sağlamlığı açısından önemli bir faktördür. Tekrarlanan trafik yükleri esnasında yolda yorulma hasarları meydana gelir ki bu yorulma hasarları yolda çatlama olarak görülür. Yolda meydana gelen iyileşme kapasitesi ve buna bağlı meydana gelen çatlaklar asfaltın viskoelastik özelliğine, başka bir deyişle bitümlü malzemenin rijitliğine bağlıdır (Baburamani, 1999).

Sert veya rijit bitümde, trafik yükü altında defleksiyon ve tekrar iyileşme çok zordur. Tayebali vd. (1993) göre ABD’de, çatlak oluşumu az ve daha uzun ömürlü yol, yumuşak bitümlü kompozit yollardır (Baburamani, 1999). Trafik yükü tekerrür frekansının artmasına bağlı olarak yolda oluşan yorulma çatlaklarının artması ve yol ömrünün kısılması, trafik yükü tekerrür frekansının yol iyileşme frekansından büyük olmasıyla açıklanabilir (Kong Kam Wa vd. 1997). Trafik yükü tekerrür frekansının iyileşme frekansında daha yüksek olması, yolun dinlenme periyodunun düşmesi ve yol tam iyileşmeden tekrar yüke maruz kalması anlamına gelir. Bu da yolda daha büyük yorulma hasarlarına neden olur.

Asfaltta yorulma çatlakları oluşumuna etkileyen bir faktör de yaşlanmadır. Yol, servis ömrü boyunca atmosferik oksijen ve oksidasyon vb. çevresel etkilere maruz kalarak gevrekleşir ve kırılğan hale gelir. Asfaltta meydana gelen yaşlanma, sıkıştırılan yol katmanları içindeki hava boşluklarından etkilenir. Genellikle yol katmanları içindeki düşük oranlı hava boşlukları, asfaltta yaşlanmaya karşı daha fazla dayanım sağlamaktadır. Yüksek oranlı (%7-%10) hava boşluklarında ise asfalt yaşlanmaya karşı hassaslaşır. Servis ömrü boyunca yolda, yaşlanma yüzünden meydana gelen sertleşme veya gevrekleşme, binder tabakasının durabilitesi ve özellikle agrega kombinasyonundan ve sıcaklıktan etkilenmektedir. Binder tabakasının yaşlanmasıyla elastik modülü değişir, yani yaşlanma rijitliğini etkiler (Baburamani, 1999). Yaşlanma, asfalt yorulma ömrü tayininde ve yol dizaynında kullanılan bir parametre değildir. Fakat yapılan çalışmalar ve raporlar (Potter ve Youdale, 1998), bu parametrenin asfalt dizaynında kullanılmasını tavsiye etmektedir.

Roberts vd. (1993) yolda oluşan çatlakların oluşumunu azaltacak ve yolda yaygın olarak uygulanabilecek yöntemleri aşağıdaki gibi kategorize etmiştir (Baburamani, 1999):

- Kaplama kalınlığını arttırmak
- Var olan mevcut yüzeyin iyileştirilmesi ve bakımı
- Oluşan çatlakların ve derzlerin tamiri ve bakımı
- Kaplama dizaynına ayrıca önem göstermek

1.2.6. Gerilme-Deformasyonlara Bağlı Asfalt Ömrü Tayini

Esnek üstyapı dizaynı için kullanılan bütün mekanistik dizayn metotlarında, tekerlek yükü altında asfalt katmanlarında oluşan gerilme-deformasyon ve deplasmanların hesabına yönelik algoritmaları baz alınır. Fakat yol katmanlarında kullanılan malzemenin karmaşıklığı ve trafik yükleme durumu, yukarıda saydığımız mekanistik hesap algoritmalarının kesin ve net hesaplarını zorlaştırmıştır. Bu karmaşık durum için yolda bazı kabuller ve yaklaşık çözümler kullanılmaktadır. Bu kabuller ve yaklaşık çözümler için sonlu elemanlar yönteminden faydalanılmaktadır (Ziari ve Khabiri, 2007).

Asfalt ömrünün tayininde veya tahmininde trafik yükü altında yol katmanlarında oluşan gerilme deformasyonlardan faydalanılmaktadır. Asfalt ömrü hesaplanırken gerilme-deformasyonların çevrilmesinde kullanılan ve yaygın olarak kabul gören birkaç eşitlik vardır. Bunlardan biri “Shell Metodu”dur. Bu eşitlikler şöyledir (Ziari ve Khabiri, 2007):
Tekerlek izi hasarı için:

$$N_r = \left(\frac{0.028}{\varepsilon_v} \right)^4 \quad (8)$$

Burada:

N_r : Nihai tekerlek izi sınırı için eşdeğer tek dingil yükü sayısı

ε_v : Kaplama yüzeyinde oluşan düşey basınç deformasyonudur.

Yorulma çatlakları için:

$$N_c = 0.0685 \left(\frac{1}{\varepsilon_t} \right)^{5.671} (E_1)^{-2.363} \quad (9)$$

Burada:

N_c : Nihai yorulma çatlağı oluşumu için yük tekrür sayısı

ε_t : Asfalt kaplaması altında oluşan yatay çekme deformasyonu

E_1 : Asfalt kaplama tabakası elastik modülüdür.

Yukarıda da bahsedildiği gibi asfalt ömrünün tayininde yolda hasara neden olan faktörler göz önünde bulundurulur. Bunlardan biri olan yorulma çatlaklarının genellikle asfalt kaplaması altında oluşan ve ağır aks yüklerinin neden olduğu yatay deformasyonlardan dolayı oluştuğu bilinmektedir. Asfalt altında meydana gelen çekme deformasyonundan yararlanarak asfalt yorulma çatlağı ömrünün tayininde kullanılan ve AASHTO 2002 MEPDG’de yer alan eşitlik ise şöyledir (ARA, 2004):

$$N_f = 0.00432 k'_1 C \left(\frac{1}{\varepsilon_t} \right)^{3.9492} \left(\frac{1}{E} \right)^{1.281} \quad (10)$$

$$C = 10^M \quad (11)$$

$$M = 4.84 \left(\frac{V_b}{V_a + V_b} - 0.69 \right) \quad (12)$$

$$k'_1 = \frac{1}{0.000398 + \frac{0.003602}{1 + 10^{11.02 - 3.49h_{ac}}}} \quad (13)$$

Burada:

N_f : Nihai yorulma çatlağı sınırı için gerekli eşdeğer tek dingil sayısı

ε_t : Kaplama altında meydana gelen yatay çekme deformasyonu

E : Elastik modül

h_{ac} : Kaplama kalınlığı

V_a : Boşluk oranı (%)

V_b : Etkin binder tabakası yoğunluğu (%)

k'_1 : Eşitlik sabitidir

Yukandaki eşitlik orijinal olarak asfaltta oluşan çekme deformasyonları için türetilmiştir. Fakat asfaltta kesme deformasyonlarından dolayı yüzeyde ve yüzeye yakın bölgelerde oluşan çatlakların hesabında, sadece k'_1 eşitliği aşağıdaki gibi değiştirilerek hesaplanabilir:

$$k'_1 = \frac{1}{0.01 + \frac{12}{1 + 10^{15.676 - 2.8186h_{xc}}}} \quad (14)$$

Yolda hasara neden olan ve asfalt ömrü tayininde kullanılan bir ikinci faktörde sıcak havalarda veya yavaş hareket eden araçların tekerlekleri altında, sürekli deformasyonların neden olduğu ve tekrar iyileşmeyen kalıcı hasarlardan biri olan tekerlek izi hasarıdır. AASHTO 2002 MEPDG' de kullanılan ve tavsiye edilen tekerlek izi hasarı eşitliği şöyledir (ARA, 2004):

$$\text{Log} \left(\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_r} \right) = -3.74938 + 0.4262 \log(N_r) + 2.02755(T) \quad (15)$$

Burada:

ε_p : Kaplama yüzeyinde (15 mm) oluşan toplam kalıcı deformasyon

ε_r : İyileşebilir deformasyon

N_r : ε_p ile ilgili yük tekrar sayısı

T : Asfalt sıcaklığıdır (°C).

Prophete (2003) göre Eşitlik 8 aşağıdaki şekilde de yazılabilir (Al-Qadi, I.L. ve Wang, H., 2009):

$$N_r = \left(\frac{15}{h\varepsilon_{vr}10^x} \right)^{1.74} \quad (16)$$

Burada:

$$X = -3.74938 + 2.02755 \log(T)$$

T : Asfalt sıcaklığı

h : Kaplama kalınlığı

ε_{vr} : Düşey deformasyondur.

Freeme ve Strauss (1979), Güney Afrika mekanistik asfalt tasarımı için “Monismith ve Mclean (1972)”, “Heukelom ve Klomp (1964)” ve “Kingham ve Kallas’ın (1972)” çalışmalarından faydalanarak asfalt yorulma çatlakları ömrü tayininde kullanılmak üzere bir eşitlik geliştirdi. Hala Güney Afrika’da kullanılan bu eşitlik şöyledir:

$$N_f = 10^{\left[\alpha \left(1 - \frac{\log \varepsilon_t}{\beta} \right) \right]} \quad (17)$$

Burada:

N_f : Nihai yorulma çatlağı oluşumu için standart tek dingil yükü sayısı

ε_t : Kaplama altında oluşan yatay çekme deformasyonu

α ve β : Malzeme karışım rijitliği ve yüzdeliğine bağlı gerilme sabitleridir.

Kaplama yüzeyinde veya yol tabanında (doğal zeminde) meydana gelen tekerlek izi hasarı için Jordan (1994) tarafından geliştirilen eşitlik aşağıda verilmiştir:

$$N = \left(\frac{\varepsilon_v}{20^{2.37} Rut} \right)^{-10} \quad (18)$$

Burada:

N : Nihai tekerlek izi oluşumu için standart tek dingil sayısı

ε_v : Maksimum düşey basınç gerilme veya deformasyonu

Rut : Kabul edilebilir tekerlek izi sınırıdır.

Yine tekerlek izi hasarı için Theyse vd., (1996) tarafından tekerlek izi hasarı ömrü için geliştirilen başka bir eşitlik aşağıda verilmiştir:

$$N = 10^{A-10\log(\varepsilon_v)} \quad (19)$$

Burada:

N : Nihai tekerlek izi oluşumu için standart tek dingil sayısı

ε_v : Maksimum düşey basınç gerilme veya deformasyonu

A : Malzemenin sıcaklık durumuna bağlı gerilme sabitidir.

Son olarak Asfalt Enstitüsü ve Shell tarafından tekerlek izi hasarı için kullanılan eşitlik:

$$N_d = f_4 (\sigma_z)^{f_5} \quad (20)$$

şeklindedir (Huang, 2004).

Burada:

N_d : Kabul edilebilir 12.5 mm tekerlek izi derinliğini geçmeyecek yük tekrar sayısı

σ_z : Düşey basınç gerilmesi

f_4 ve f_5 : Malzeme sabitleridir.

Yukarıda genel olarak mekanistik tasarımı açısından asfalt ömrü tayininde kullanılan tekerlek izi (sürekli deformasyon) hasarı ve yorulma çatlakları parametrelerinden bahsedildi. Dünyada, yol mühendisliğinin yönü mekanistik yöntemlere doğru kayarken hala bu konuda yapılan çalışmalar ve gelişmeler istenilen seviyeye gelmemiştir.

1.3. Aks ve Tekerlek Konfigürasyonları

Asfaltta meydana gelen hızlı bozulmalara neden olan en kritik faktörlerden birkaçı, kamyon yükünün değişimine bağlı olarak aks ve tekerlek konfigürasyonunun çeşitliliğidir. Ayrıca tekerlek konfigürasyonunun yanında tekerlek basıncıda yolda oluşun hasarları etkileyen önemli bir faktördür. Bundan dolayı dingil (aks) ve tekerlek çeşitliliği, tekerlek basıncı ve bunların neden olduğu dinamik gerilme-deformasyonlar esnek üstyapı dizaynında kullanılan temel parametrelerdir.

Wang ve Al-Qadi'ye (2008) göre yolda meydana gelen bozulmaların temel üç nedeni vardır: Kamyon veya ağır taşıt yükü, asfalt yapısı ve çevresel etkilerdir. Kamyonların ürettiği yüklerin asfalta iletilmesinde etkili iki faktör mevcuttur. Bunlar tekerlek ve aks konfigürasyonlarıdır. Kamyon yükünün asfaltta neden olduğu hasarların daha iyi karakterize edilebilmesi için göz önünde bulundurulması gereken faktörler: Tekerlek yükü etkisi, tekerlek şişme basıncı, araç hızı ve tekerlek konfigürasyonudur.

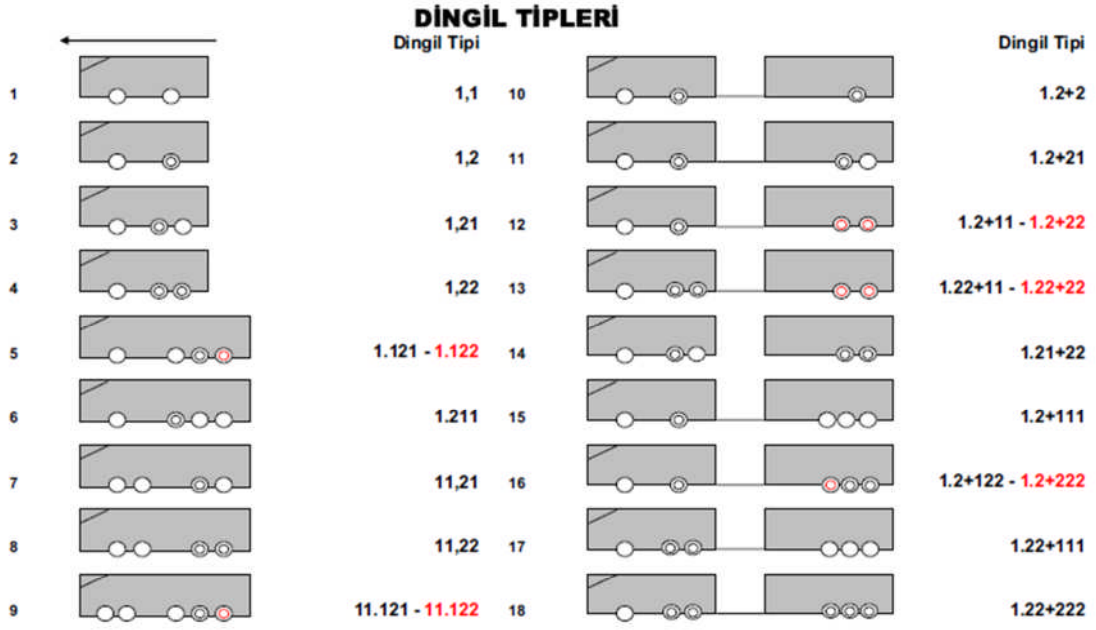
1.3.1. Aks Konfigürasyonları ve Yükleme Haddi

1.3.1.1. Aks Konfigürasyonları

Aks konfigürasyonu ve tekerlek konfigürasyonu yolda meydana gelen hasarlar açısından son derece önemli faktörlerdir. Yükün araçlardan yola aktarılırken mümkün olduğu kadar yayılması oluşacak hasarları azaltır. Yapılan araştırmalar bunu doğrular niteliktedir. Çünkü 9 tonluk bir araç yükünü tek aks yerine tridem aks veya tandem aks kullanılması asfaltta meydana gelen bozulmaları azaltacaktır. “Wisconsin Transportation Bulletin” in yayınladığı makalede (URL-1, 2010):

- En tehlikeli aks tipi, tek aks tipidir.
- Tridem aks yaklaşık olarak tandem aksın üçte ikisi (2/3) kadar yola hasar vermektedir.
- Tek aks üzerindeki dual tekerlek, tek aks üzerindeki tek tekerleğe oranla yolda yaklaşık %10-%20 daha az bozulma meydana getirir.

‘Al-Qadi, vd.’nin (2004) “Farklı tekerlek ve araç (aks) konfigürasyonunun yolda meydana getirdiği hasar” adlı çalışmasında aks konfigürasyonuna göre hasar faktörleri ve en kritik aks Tablo 4’te verilmiştir.

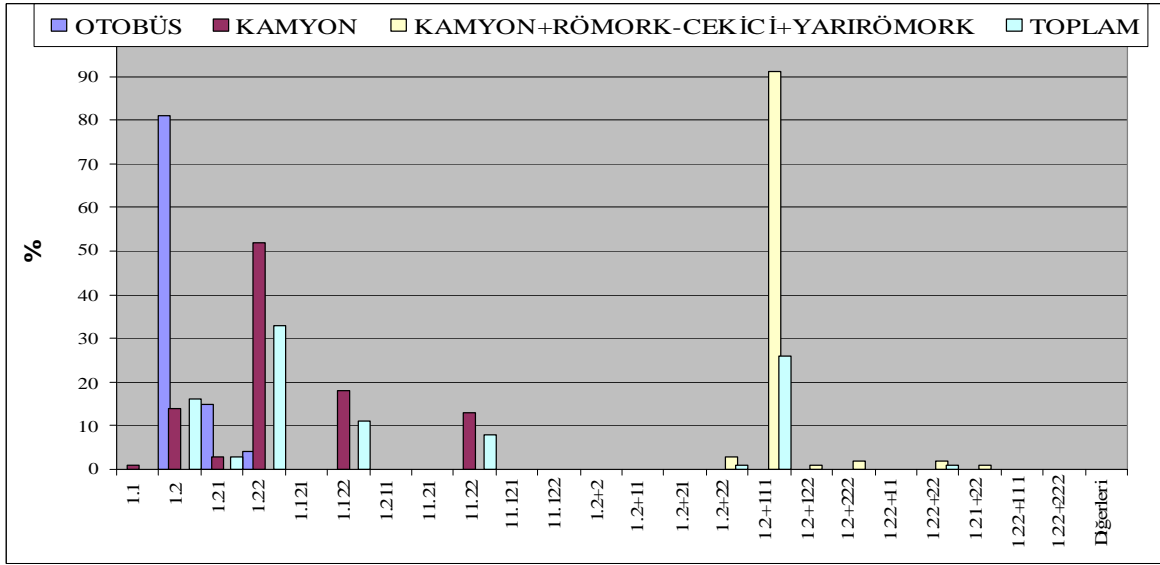


Şekil 6. Dingil tipleri (KGM, 2010)

Yukarıda ağır taşıtlar için kullanılan dingil tipleri verilmiştir. Ülkemizde ağır taşıtlarda hangi tip dingil kullanıldığı, Karayolları Genel Müdürlüğüne (2010) yayınlanan araştırmada Tablo 1'deki gibi verilmiştir.

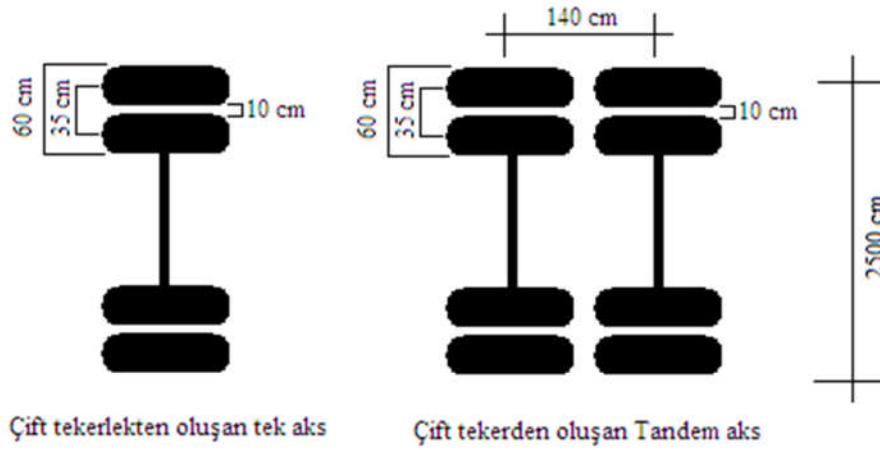
Tablo 1. Taşıt sınıflarına göre dingil tipleri dağılımı (KGM, 2010)

2009 YILI TAŞIT SINIFLARINA GÖRE DİNGİL TİPLERİ DAĞILIMI				
DİNGİL TİPİ SINIFLARI	OTOBÜS (%)	KAMYON (%)	KAMYON+RÖMORK - ÇEKİCİ + YARI RÖMORK (%)	TOPLAM (%)
1.1	0	1	0	0
1.2	81	14	0	16
1.21	15	3	0	3
1.22	4	52	0	33
1.121	0	0	0	0
1.122	0	18	0	11
1.211	0	0	0	0
11.21	0	0	0	0
11.22	0	13	0	8
11.121	0	0	0	0
11.122	0	0	0	0
1.2+2	0	0	0	0
1.2+11	0	0	0	0
1.2+21	0	0	0	0
1.2+22	0	0	3	1
1.2+111	0	0	91	26
1.2+122	0	0	1	0
1.2+222	0	0	2	0
1.22+11	0	0	0	0
1.22+22	0	0	2	1
1.21+22	0	0	1	0
1.22+111	0	0	0	0
1.22+222	0	0	0	0
Diğerleri	0	0	0	0

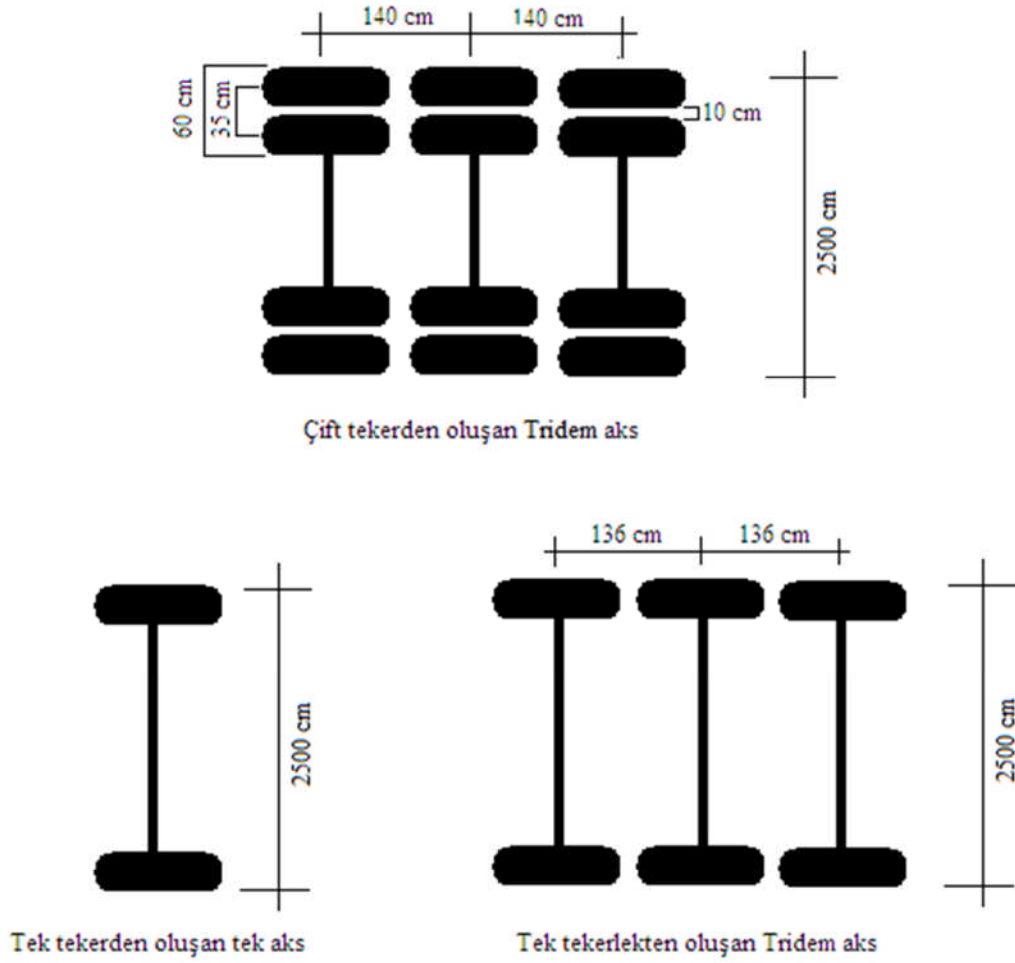


Şekil 7. Taşıt sınıflarına göre dingil tipleri dağılımı grafiği (KGM, 2010)

Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından yapılan araştırmada görüldüğü gibi otobüslerde en çok kullanılan dingil tipi % 81 gibi bir oranla 1.22 dingil tipi, kamyonlarda ise % 52 oranla 1.22 dingil tipi, kamyon + römork – çekici + yarırömorklarda ise % 91 oranla 1.2+111 dingil tipidir.



Şekil 8. Trafikte kullanılan dingil tipleri



Şekil 8. Trafikte kullanılan dingil tipleri (devamı)

1.3.1.2. Aks Yükleme Kapasitesi

Ticari ağır vasıtaların (kamyon, treyler, otobüs) maksimum müsaade edilmiş ağırlıkları ülkeden ülkeye değişmektedir. Müsaade edilmiş tek dingil yükü için 80 kN ile 130 kN (8.2 ile 13.3 ton) arasında değişirken tandem dingil yükü için 145 kN ile 210 kN (14,8 ile 21.4 ton) arasında değişmekte ve çoğunlukla 160 kN (16.3 ton) olarak alınmaktadır. Standart tek dingil yükü için birçok ülkede 80 kN veya 100 kN ağırlık esas alınmaktadır. Ülkemizde, tek dingilli taşıtlar için 11.5 ton, tandem (çift) dingilli taşıtlar için 16 ton ve tridem dingilli taşıtlar için 24 ton yasal yükleme sınırı getirilmiştir (Tunç, 2001).

Trafikte seyreden araçlar doğal olarak farklı ağırlıklarda olduklarından dolayı kaplamaya intikal eden yüklerde farklı olacaktır. Ayrıca hafif taşıtlar tek dingilli olarak ve ağır taşıtlar ise tandem hatta tridem veya daha fazla dingilli olarak yapılmaktadır. Tek dingilli ve tandem dingilli taşıt yüklerinin kaplamada oluşturduğu gerilme dağılımı

farklıdır (Tunç, 2001). Çünkü tandem dingilde her bir teker yükünün yarattığı gerilme tandem aralığından dolayı belli derinliğine kadar ayrı ayrı iken derinlik arttıktan sonra üst üste çakışarak birlikte gerilme yaratmaktadır. Bu nedenlerden ötürü, farklı taşıt ağırlıklarının tek bir yüke dönüştürerek trafik yükünün hesabı kompleks olmaktan kurtarılmalıdır. Bunun için farklı taşıt ağırlıkları standart tek dingil yüküne Formül 22 ile dönüştürülmektedir.

$$F_p = \left(\frac{P_{ger}}{P_{std}} \right)^n \quad (21)$$

Burada:

F_p : P_{ger} tek dingil yükünü standart tek dingil yüküne dönüştürme faktörü

P_{ger} : Gerçek tek dingil yükü, ton

P_{std} : Standart tek dingil yükü, ton

n : Üssel katsayıdır.

n üssel sayısı 3.5 ile 4.5 arasında değişmekte olup ülkemizde KGM tarafından 4.4 olarak alınmaktadır (Tunç, 2001).

Ülkemizde karayolları tarafından izin verilen dingil yükleme sınırları Tablo 2’de verilmiştir. Verilen bu dingil yükleri için gösterilen istisnai durumlar ve toleranslar şöyledir. “Karayollarında yapılacak sabit veya seyyar ağırlık kontrolü esnasında, aracın azami toplam ağırlığının en çok % 5’i kadar tartı toleransı tanınır. Ancak ocaklardan çıkarılan ve ocak sahasının içinde tartılmayan madenlerin paketlenmemiş veya herhangi bir şekilde seçilecek stok sahalarına depolanması, zirai ürünlerin üretildiği arazi parçasından stoklama alanlarına yapılacak seri taşıma amaçlı depolamalar sırasında, her türlü karayolu üzerinde bir kilometreye kadar yakın mesafeli taşımalarda, taşıtların hızı 60 km/s’i geçmemek kaydı ile istiab hadlerini % 15 oranında aşabilmeleri mümkündür (URL-2, 2010; Karayolları trafik yönetmeliği, 2003)”.

Tablo 2. Karayolları trafik yönetmeliğine göre dingil yükleme kapasiteleri

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 Onayı 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:	
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

1.3.2. Tekerlek Konfigürasyonları ve Yükleme Kapasitesi

Dünyada kullanılan tekerlek çeşitlerine baktığımızda genel olarak kullanılan iki tip tekerlek çeşidi vardır. Bunlar tek tekerlek ve dual tekerlek çeşitleridir. Tek tekerlek normal tek tekerlek ve geniş tek tekerlek versiyonları olmak üzere iki tiptir. Araç yükü aks vasıtasıyla tekerleğe, tekerlekten de yola iletilir. Bu nedenle aks ve tekerlek konfigürasyonu yol dizaynı açısından önemlidir. Özellikle tekerlekle asfalt yüzeyi arasındaki temas alanına bağlı olarak yolda oluşan hasarlar sürekli araştırılan güncel konulardır. Çünkü asfaltta meydana gelen hasarları göz önünde bulundurduğumuzda, tekerlek yapısı bu hasarları etkileyen en önemli faktörlerin başında gelir. Tekerlek yapısına ve boyutlarına bağlı olarak asfaltla temas alanı değiştiğinden, yolda neden oldukları etkiler de değişmektedir. Yol için en kritik tekerlek hangisidir? Yani asfaltta neden oldukları hasarlar (yorulma, çatlaklar, teker izi) açısından en tehlikeli tekerlek hangi tip tekerlektir? Bu soruların cevaplarını bulmak için bu konuda yapılmış birkaç çalışmaya bakalım.

Al-Qadi, vd. (2004) tarafından yayımlanan çalışmada, farklı tekerlek ve araç (aks) kombinasyonunu hem yolda deneysel olarak test ederek hem de sonlu elemanlar analizi ile yapılan karşılaştırma ve bulguları final raporlarında şöyle açıklamışlardır:

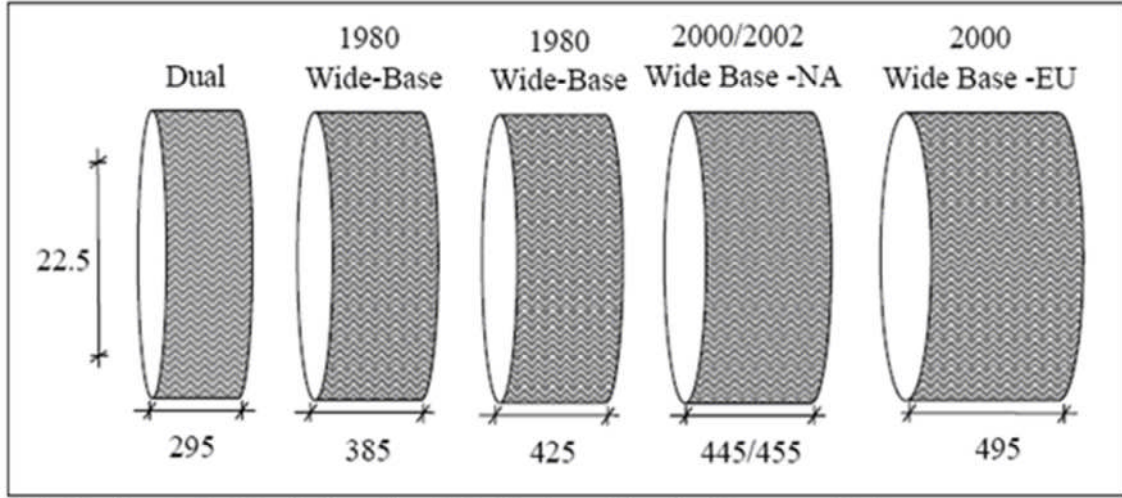
Farklı yük (1937, 3875 kg), farklı hız (8, 24, 40, 72 km/s), farklı tekerlek basıncı (7.3, 6.32, 4.23, 2.09 kg/cm²) ve farklı sıcaklıklarda (5, 25, 40 C) yolda yapılmış bütün deneysel çalışmalarımız gösterdi ki:

- Her durumda en kritik ve tehlikeli tekerlek tipi normal tek tekerlektir.
- Araç dingil konfigürasyonu açısından en tehlikeli dingil, tek dingil tipi olarak test edildi.
- İlk jenerasyon geniş tekerlek (445/50R22.5) tipi her durumda, ikinci jenerasyon geniş tekerlek (455/55R22.5) tipinden daha tehlikeli ve hasara neden olduğu test edilmiştir.
- Her iki geniş tekerlek tipi de yol yapısında, dual tekerleğe göre daha büyük zararlara ve hasarlara neden olduğu görülmüştür.
- Geniş tek tekerlek (445/50R22.5) doğal zeminde, dual tekerleğe göre biraz daha büyük tekerlek izi hasarına neden olmuştur. Bir diğer geniş tekerlek olan ikinci jenerasyon geniş tek tekerlek (455/55R22.5) sıcaklık ve hıza bağlı olarak yavaş hızda (8 km/s) dual tekerleğe göre daha az hasara neden olmaktadır yüksek hızda (105 km/s) daha fazla hasara neden olmaktadır.

- Geniş tek tekerlek (445/50R22.5) asfalt kaplama yüzeyinde, dual tekerleğe göre biraz daha büyük tekerlek izi hasarına neden olmaktadır. Yine yukarıdaki gibi ikinci jenerasyon geniş tek tekerlek (455/55R22.5) sıcaklık ve hıza bağlı olarak yavaş hızda (8 km/s) dual tekerleğe göre daha az hasara neden olmaktadır yüksek hızda (105 km/s) daha fazla hasara neden olmaktadır.
- Tekerek konfigürasyonları altında ölçülen gerilme ve deformasyonlar açısından geniş tek tekerlek (445/50R22.5), dual tekerlek konfigürasyonuna göre asfaltta daha büyük hasarlara neden olmaktadır.
- Asfalt yüzeyinde meydana gelen dikey basınç gerilmeleri açısından en kritik tekerlek yapısı sırasıyla: Geniş tek tekerlek, Tek tekerlek ve Dual tekerlektir.
- Yatay deformasyonlar açısından en kritik tekerlek yapısı sırasıyla: Tek tekerlek, Geniş tek tekerlek ve Dual tekerlektir.
- Asfalt katmanları altındaki doğal zeminde ölçülen dikey basınç gerilmeleri açısından dual tekerlek altında ölçülen değerler, yaklaşık geniş tek tekerlek altında ölçülen değerlere eşittir.

Sonlu elemanlar ile yapılan modellemelerden elde edilen analizlerinden, yukarıdaki deneysel çalışmalarda elde edilenlere benzer sonuçlar çıkmıştır. Bu analizlere göre:

- Geniş tek tekerlek, dual tekerleğe göre daha büyük yorulma hasarlarına neden olmaktadır.
- Asfalt altında meydana gelen yorulma çatlakları açısından geniş tek tekerlek, dual tekerleğe göre daha büyük hasarlara neden olmaktadır.
- Asfaltta meydana gelen tekerlek izi bakımından, geniş tek tekerlek, dual tekerlek konfigürasyonuna göre hem kaplama yüzeyinde hem de diğer katmanlarda daha büyük hasarlara neden olmaktadır.
- Yüzeyde meydana gelen çatlaklar açısından geniş tekerlek ile dual tekerleği karşılaştırdığımızda, dual tekerleğin daha tehlikeli olduğu görülmüştür. Çünkü yüzeysel çatlaklar genellikle tekerlek temas yüzeyinin bitiminden itibaren meydana gelen hasarlardır. Geniş tekerlek basıncı ve kuvveti daha geniş alana yayması açısından, dual tekerleğe göre yüzey çatlakları açısından daha az hasara neden olmaktadır. Yüzey çatlakları açısından en kritik tekerlek normal tek tekerlektir.



NA: Designed for North America, EU: Designed for the European Union

Şekil 9. Geniş tek tekerleğin gelişimi (Al-Qadi vd.)

Tablo 3'te tekerlek çeşitlerine bağlı olarak tekerlek hasar oranları bir tablo olarak sunulmuştur. Bu tablodaki hasar oranları ağır araçların en arka aks grubuna göre hesaplanmıştır. Yukarıdaki analizde bahsedildiği gibi en kritik aks tipi tek aks tipi olmasına rağmen, arka aks grubunun referans seçilmesi daha fazla yük taşımasındandır. Eşit yükler altında tek aks, tandem veya tridem aks'a göre kaplama için üç-dört kat daha agresif, alt katmanlar için ise beş-sekiz kat daha agresif olduğu anlaşılmıştır. Fakat ağır araçlarda yükün büyük bir bölümü arka aks grubu tarafından taşındığından bu aks grubu referans olarak seçilmiştir.

Tablo 3. Aks konfigürasyonuna göre tekerlek hasar faktörleri (Al-Qadi vd.)

Aks tipi	Tekerlek tipi	Genişlik (mm)	Çap (mm)	Kaplama	Temel/Alttemel
				TKF	TKF
Arka aks (towed)	Dual	410	973	1.57	1.43
	Geniş tek tek.	328	1049	1.84	2.82
Orta aks (driven)	Dual	455	1038	1.04	1.00
	Geniş tek tek.	427	1013	1.22	1.64
Ön aks (steering)	Tek (Single)	245	1023	3.25	5.86
	Geniş tek tek.	307	1035	2.07	3.21

TKF: Tekerlek Konfigürasyonu Hasar Faktörleri

Tablo 3'te üç değişik aks türü için dual tekerlek ve geniş tek tekerlek hasar faktörleri verilmiştir. Tipik bir Avrupa kamyonu üç farklı aks konfigürasyonuna sahiptir. En öndeki tek tekerden oluşan tek aks (steering), ortadaki arabayı çeken çift tekerlekten oluşan tek aks (driven: çeker aks) ve en son aks (towed) grubudur. Bu aks gruplarının eşit yük ve tekerlek basıncı altındaki hasar faktörleri verilmiştir.

Tablo 4. Tandem ve tridem akslar (towed) için tekerlek konfigürasyonu hasar faktörleri (Al-Qadi vd.)

Tekerlek Konfigürasyon Faktörleri										
Tekerlek Ölçüsü	Tipi	Tkr.G	T.A.G	Tpl.G	Çap	Kaplama	Kap. Altın. diğer asfalt katmanları			
		mm	mm	mm	mm	Üst.T.İ	Ort.Ağr	Üst.T.İ	Alt.T.İ	Yor.Çat
Referans tekr.	Dual	235	470	570	1059	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
205/65R17.5	Dual	175	350	450	711	2.57	2.04	2.57	1.80	2.02
215/75R17.5	Dual	175	350	450	767	2.36	1.93	2.36	1.80	1.85
245/70R17.5	Dual	215	430	530	789	1.63	1.39	1.63	1.18	1.47
245/70R19.5	Dual	200	400	500	839	1.71	1.48	1.71	1.37	1.47
265/70R19.5	Dual	210	420	520	872	1.51	1.34	1.51	1.24	1.34
11R22.5	Dual	184	368	468	1054	1.52	1.45	1.52	1.63	1.23
315/80R22.5	Dual	247	494	594	1085	0.91	0.89	0.91	0.88	0.89
385/55R22.5	Tek	329	329	329	998	1.91	2.78	1.87	3.98	2.04
385/65R22.5	Tek	285	285	285	1071	2.23	3.64	2.19	5.76	2.25
445/45R19.5	Tek	380	380	380	895	1.70	2.21	1.66	2.75	1.93
445/65R22.5	Tek	340	340	340	1155	1.53	2.43	1.50	3.66	1.66

Tkr.G: Tekerlek genişliği, T.A.G: Temas alanı genişliği, Tpl.G: Toplam genişlik,
 Üst.T.İ: Üst tekerlek izi, Alt.T.İ: Altta oluşan teker izi, Yor.Çat: Yorulma çatlağı

Bir başka çalışma da ise: Fernandes, vd. (2005) çalışmasında tek tekerlek ile dual tekerleğin yoldaki etkilerini ve kritiklerini aşağıdaki gibi açıklamışlardır:

- İki farklı tekerlek basıncı (5.6 kg/cm^2 ve 8.4 kg/cm^2) ile ve 4078 kg ile 14276 kg arasında aks yükünü 2039 kg arttırarak yapılan çalışmada, eşdeğer yük faktörü açısından her durumda tek tekerleğin dual tekerleğe göre daha tehlikeli olduğu görülmüştür.

Greene vd. (2009) dual tekerlek (11R22,5) ve geniş tek tekerlek tipleri (425/65R22.5-445/50R22.5-455/55R22.5) üzerinde yaptıkları araştırmada, 425 tekerleğinin asfalta en fazla hasar veren tekerlek olduğu tespit edildi. 445 tekerleği ise dual tekerleğe göre hem asfalt yüzeyinde hem de asfalt altında daha büyük hasarlar oluşturdu. Dual tekerleğe yakın

hasar değerleri performansı gösteren 455 tekerleği, geniş tek tekerlek tipleri arasındaki en güvenli tekerlek tipi olduğu bu araştırmada sunulmuştur.

1.4. Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Modelleme

Sonlu elemanlar yönteminin yol problemlerine uygulanması ile ilgili çeşitli bilgisayar programlar mevcuttur. Genel itibariyle bu programlar, Burmister'in (1945) çok katlı yol sistemleri teorisi göz önünde bulundurularak geliştirilmiştir. Bunlardan en basiti ve en yaygın olarak bilineni Chevron araştırma şirketi (Warren ve Dieckmann, 1963) tarafından geliştirilen CHEVRON programıdır. Önceleri bu program sadece lineer elastik malzemeler için kullanılabilirken Asfalt Enstitüsü tarafından, DAMA programı kapsamında geliştirilerek lineer olmayan granüler malzemeler içinde uygulanabilir hale getirildi (Hwang ve Witczak, 1979). Shell tarafından geliştirilen BİSAR programı yaygın olarak bilinen bir diğer programdır. Bu program sadece dikey yükleri değil aynı zamanda yatayda oluşan yükleri de hesaba katmaktadır. ELSYM5 programı ise orijinal olarak Kaliforniya (Berkeley) üniversitesi tarafından geliştirildi, daha sonra mikrobilgisayarlara uyarlandı. Bu program birden çok tekerlek yükü altındaki elastik beş katlı yollar için tasarlandı (Kopperman vd., 1986). Bir diğer program ise KENLAYER bilgisayar programıdır. Bu program elastik çok katmanlı sistemler için geliştirilmiştir. Ayrıca lineer olmayan ve viskoelastik tabakaları sıralama metoduyla çözümler (Huang, 2004). Bununla beraber, bu program tekerlek izi hasarı ve yorulma çatlakları hesabı kriterlerini taşıyan bir programdır (Wu, 2001).

Katlı teorinin en büyük dezavantajı, bütün katmanların homojen ve aynı özellikte kabul edilmesidir. Bu varsayım, lineer olmayan yol malzemesinin analizini zorlaştırmaktadır. Genel kanaat, bu zorluğun sonlu elemanlar metodu kullanılarak üstesinden gelinabileceği yönündedir (Huang, 2004).

Sonlu elemanlar metodu altmışlı yılların sonlarından itibaren yol mühendisliğinde kullanılmaya başlandı. Duncan vd. (1968) ilk olarak sonlu elemanları yol analizlerinde kullanmaya başladılar. Geliştirdikleri bu program sonra ILL-PAVE bilgisayar programı olarak kullanılmaya başlandı (Raad ve Figueroa, 1980). Başlangıçta bilgisayarların günümüzdeki gibi yeterince gelişmiş olmamasından dolayı, sonlu elemanlar analizlerini fazla zaman alması ve yüksek kapasite (bellek) gerektirmesi rutin analizlerde kullanma imkanı sağlamıyordu. Daha sonraları ILL-PAVE analiz eşitlikleri üzerinde yapılan

birtakım değişiklikler ve eşitliklerin geliştirilmesi sonucunda, bu program yol analizlerinde rahatlıkla kullanılmaya başlandı (Thompson ve Eliot, 1985). Lineer olmayan sonlu elemanlar yaklaşımı ilk olarak Michigan Eyalet Üniversitesi tarafından geliştirilen MICHIPAVE bilgisayar programında kullanılmaya başlandı. Bu programda ayrıca lineer olmayan özellikteki yol malzemesinden agrega temel ve toprak materyal seçenekleri de sunuldu (Wu, 2001).

Yukarıda tartışıldığı üzere tekerlek izi hasarı, asfalt karışımların visko-elastik ve visko-plastik özelliğiyle toprak ve agreganın plastik özellikleri gibi yol malzemesinin lineer olmayan davranışlarından dolayı oluşur. Arazi koşullarına yakın analizler, katlı elastik teori dışındaki sayısal modellemelerle örneğin sonlu elemanlar metodu gibi modellemelerle asfalt tekerlek izi hasarı modeli, bütün doğrusal davranmayan yol katmanları için modellenebilir ve daha gerçek sonuçlar elde edilebilir (Wu, 2001).

Yol araştırmalarında sonlu elemanlar metodu üzerine birçok kurum kuruluş ve araştırmacı tarafından çalışmalar yayımlanmıştır. İki boyutlu (2D) ve üç boyutlu (3D) doğrusal olmayan dinamik sonlu elemanlar analizleri günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. Çok katlı yol sistemleri ile ilgili geçmişte yapılmış, doğrusal olmayan üç boyutlu (3D) analizler mevcuttur (Desai, 1982). Zaghoul vd. (1994) ağ'lı (mesh) asfalt yüzeyi üzerine hareketli tekerlek yükünü, tekerlek temas alanı olarak modelledi. Bu süreksiz problemde olumlu sonuç alamadı. Bu gibi problemlerde doğru sonuca ulaşmak için yük ağın üzerinde hareket etmeli ve yük ile ağ sınırları arasındaki mesafe yeterince büyük olmalı ki hatalar sınırlı bölge içinde tanımlanabilsin. Bu yöntem olumlu sonuçlar alabilmek için etkin bir metod değildir (Wu, 2001).

Kirkner (1994, 1996) visko-elastik ve visko-plastik yol katmanları üzerinde hareketli tekerlek yükünden dolayı oluşan kalıcı gerilme hasarlarını modelleyen sonlu elemanlar algoritması geliştirdi. Dang Van (1993), Kirkner'den bağımsız olarak benzer bir çalışmayı daha önceden geliştirmişti. Bu algoritmalarda yük sabit bir hızla hareket ettiği kabul edilerek problemler daha basite indirgenebiliyordu. Bunun için bir hareket koordinat sistemi kullanılabilir. Hareket koordinat sistemi içindeki yerdeğıştirmeler zaman olarak ve yer olarak gösterilebilir veya yüklemelerden sonra meydana gelen yerdeğıştirmeler ve kalıcı deformasyonlar, uzun yük geçişlerinden ve yüklemelerden sonra meydana gelir. Bu hareketli yük yönünde tanımlanan koordinat, oluşan deplasmanların hareketli yük yönündeki koordinat boyunca değişmemesini sağlar. Bu metod bilgisayar için az bellek gerektirir ki bu da sayısal olarak cihaz (donanım) için daha kolay analiz olanağı sağlar.

Başka bir deyişle temel karmaşık yol malzemesi bağıntıları, bilgisayar için analizlerde daha az zaman ve bellek anlamına gelir.

Birçok araştırmacı, tekerlek izi hasarı tahmin modeli için kendi sonlu elemanlar programını geliştirmektense hazır ticari sonlu elemanlar programını kullanmayı tercih etmektedir. Çünkü bilgisayar hızı ve kapasitesindeki hızlı gelişmelerden dolayı ticari sonlu elemanlar kullanımının daha doğru ve ekonomik olduğu görülmektedir. Şu an yaygın olarak kullanılan ticari sonlu elemanlar programlarından birkaçı: ABAQUS, ANSYS, LS-DYNA vb. programlarıdır. Bunlar arasından yol problemlerine en çok ABAQUS uygulanmaktadır (Kuo, 1994; Huang ve White, 1996; Merrill vd., 1999).

Sonuç olarak günümüzde hala araştırmacılar yol malzemesinin ve katmanlarının nasıl en doğru şekilde sonlu elemanlara aktararak modelleneyeceğini ve bununla birlikte en gerçekçi ve doğru sonuçların elde edilebileceği üzerine araştırmalar sürdürmektedirler. Son dönemlerde bu araştırmalar artış göstermekle birlikte istenilen seviyeye daha gelinememiştir.

1.5. Çalışmanın Amacı

Esnek üstyapı dizaynı yapılırken göz önünde bulundurulacak en önemli faktörlerin başında dingil ve tekerlek vasıtasıyla yola gelen yüklerdir. Bundan dolayı dingil çeşitliliği, tekerlek yapısı ve bunların neden olduğu dinamik gerilmelerin bilinmesi esnek üstyapı dizaynında önemlidir. Çünkü kaplamada kullanacağımız malzemenin dinamik gerilmeler altındaki davranışları test edilebilirse malzeme seçimi bu test sonuçlarına göre daha sağlıklı bir şekilde tayin edilebilir. Özellikle son dönemlerde AASHTO ve diğer literatürler, üstyapı dizaynında ampirik (deneysel) yöntemlerin yanında mekanistik yöntemlere yönelmekte ve bu yönde çalışmalarını desteklemektedirler.

Mekanistik-ampirik yöntem açısından bakıldığında, trafik yükünün yola aktarımı sağlayan tekerlek ve dingil çeşitlerinin bilinmesi, bu tekerlek ve dingil çeşitleri içinde en kritik olanlarının tespiti, trafik yükünün sınıflandırılması ve modellenmesinde kolaylık sağlayacaktır. Bundan dolayı bu çalışmada, en kritik tekerlek ve dingil tipi; arazi verileri ışığında, üç boyutlu (3D) sonlu elemanlarla modellenerek belirlenmeye ve tekerlek tipi olarak dual tekerleğin lastikleri arasındaki mesafenin artması veya azalması durumunda, gerilme deformasyonlardaki değişimler gözlemlenerek yol tabakalarının üstündeki etkileri belirlenmeye çalışılmıştır. Bu çalışmanın çıktılarının özellikle “Kamyon ve Lastik

“Üreticileri ile Karayolları” açısından faydalı olacağına inanmaktayız. Bu çalışmada sonlu elemanlar programı olarak LS-DYNA 971 (2006) kullanılmıştır.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Sonlu Elemanlarla Analiz

Hareketli yük altındaki esnek kaplamaların davranışı, elastik çok katlı analizle tahmin edilir. Bu tip analizlerde, tekerlek durumuna göre kaplama ve temel tabakalarında oluşan deformasyonlar ve deformasyonların tipine göre hasar tahmini yapılabilir. Örneğin, tekerlek izi genellikle kaplama veya doğal zemin üzerinde meydana gelen dikey gerilme-deformasyonlardan dolayı yorulma çatlakları ise kaplama altında oluşan çekme deformasyonlarından dolayı meydana gelir. Asfaltın düşük sıcaklıklarda elastik davrandığı, yüksek sıcaklıklarda ise visko-elastik ve visko-plastik davrandığı bilinmektedir. Özellikle sıcaklıkların yüksek olduğu aylarda yolda tekerlek izi hasarı oluşumu gözlemlenmektedir. Bunun nedeni; yol malzemesinin doğrusal olmayan davranışından kaynaklanmasıdır. Toprak ve agregalardan oluşan diğer yol katmanları ise genel itibariyle plastik davranır (Wu, 2001). Bundan dolayı, bütün yol katmanlarının doğrusal elastik davrandığı varsayılarak yapılan modellemeler ile doğru asfalt modeli oluşturulamaz. Yol tabakalarının farklı malzemeden oluştuğu ve farklı davranış sergilediği bilinmesine rağmen, bütün yol katmanlarının doğrusal elastik davrandığı varsayılarak yapılan modelleme ile gerçek arazi şartları arasındaki uyumsuzluk açıkça görülebilir. Yine yukarıda bahsedildiği gibi gerçekte asfalt karışımı malzemeler visko-elastik, visko-plastik ve temel tabakaları ile doğal zemin plastik davranış sergiler (Wu, 2001).

Birçok kuruluş ve araştırmacı günümüzde araştırmalarında sonlu elemanlar programını kullanmaktadır (Wu, 2001). Sonlu elemanlar, birçok değişkeni hesaba katarak analiz yapılabilir. Örneğin dinamik yükleme ve doğrusal olmayan malzeme davranışı gibi... Sonlu elemanlar metodu; genellikle kesin çözümü olmayan problemlerin yaklaşık çözümünde sayısal metod olarak kullanılır. Bu metod; çözümlenecek bölgeyi, bir sonlu sayıdaki basit alt bölgelere (sonlu elemanlar) ayırarak çözüm yapar. Başka bir deyişle bu yöntem, bir katı cisim veya sonsuz boyuttaki problemi sonlu şekle çevirerek ve sonra bu sonlu elemanı yaklaşık çözümü elde etmek için kullanır. Sonlu elemanlarla yaklaşık çözüm elde edilmesine rağmen herhangi bir elemanı tanımlamak ve özelliklerini doğru şekilde tayin etmek imkânsız değildir. Çünkü sonlu elemanların en önemli avantajı, her yükleme,

şekil ve materyal özellikleri için yüksek uygulanabilirlik imkanı sunması ayrıca geleneksel yapı problemlerinde rahatlıkla kullanılmasıdır.

Genel itibariyle sonlu elemanlar yönteminin çalışma adımları aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Çözüm ortamı oluşturulur.
- Ortam sonlu elemanlara bölünerek, ağ atılır.
- Eleman malzeme özellikleri ve sınır şartları girilir.
- Çözüm yapılır ve sonuçlar elde edilir.

2.1.1. LS-DYNA ile Çözüm

Bu çalışmada; tekerlek, aks ve yol modellemeleri ve analizi için üç boyutlu sonlu elemanlar paket programı olarak LS-DYNA kullanıldı. LS-DYNA programının tercih edilmesindeki en önemli faktör dinamik analizler için geliştirilmiş bir program olması ve ayrıca birçok malzeme özelliği sunmasıdır. Özellikle yoldaki yüklemelerin dinamik yükleme olması ve yol materyal özelliği olarak elastik, visko-elastik, plastik materyal özelliklerine sahip olması ve bu materyal özelliklerinin LS-DYNA ile rahatlıkla modellenmesi bu programın özellikle seçilmesindeki temel nedendir. Ayrıca son dönemlerde sonlu elemanlarla yapılan araştırmalarda LS-DYNA kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Bunlardan birkaçından bahsedecek olursak: Sarica vd. (2004) trafik güvenliği ve kontrolü açısından yol bariyerlerinin tasarımı ve davranışı LS-DYNA ile analiz edilmiştir. Bu analizde beton bariyerler ve araç LS-DYNA ile modellenip aracın belirli açılarla bariyerlere çarpması sonucunda bariyerlerin ötelenme ve aracın savrulma durumları gözlemlenmiştir. Diğer bir çalışmada ise Uddin ve Ricalde (2006) FWD (falling weight deflectometer) testi ile statik ve dinamik yol analizi yaptılar. Dinamik FWD yükleme analizleri ile viskoelastik malzeme özelliklerinin asfalt üzerindeki davranışları araştırıldı. Viskoelastik malzeme özellikleri UMAT olarak tanımlandı. UMAT malzeme özellikleri olarak Maxwell viskoelastik model ve mikroçatlak yayılımı metodolojisini paylaşmaktadır. Shoukry vd. (2007) donatılı beton yollarda, trafik yükü ve sıcaklık faktörlerinin donatı çevresinde oluşan üçeksenli gerilmeler üzerindeki etkilerini araştırdılar. Bu çalışmada donatılı beton yol ve yüklemeler LS-DYNA ile modellendi. Shoukry vd. (2008) tarafından termo-elastik asfalt yapısı ve lineer olmayan davranış

sergileyen yol malzemesi problemlerinin çözümü ile ilgili yapılan çalışmada ise sonlu elemanlarla yapılan modelleme ile araziden alınan veriler karşılaştırılarak yatay doğrultuda oluşan deformasyonlar araştırıldı. Uddin (2001, 2002) tarafından yayınlanan bir çalışmada, otoyol ve havaalanı malzemesinin karakterizasyonu için FWD testi simülasyonu LS-DYNA ile modellendi. Bu çalışmada arazide ölçülen FWD değerleri, LS-DYNA da modellenip sonuçlar karşılaştırıldı. Simülasyondan elde edilen sonuçlarla araziden alınan veriler arasında yüksek oranda tutarlılık olduğu görüldü.

Yukarıda LS-DYNA ile yapılmış çalışmalar baz alınarak, bu çalışmada yapılan modelleme ve çözüm basamakları şöyle sıralanabilir:

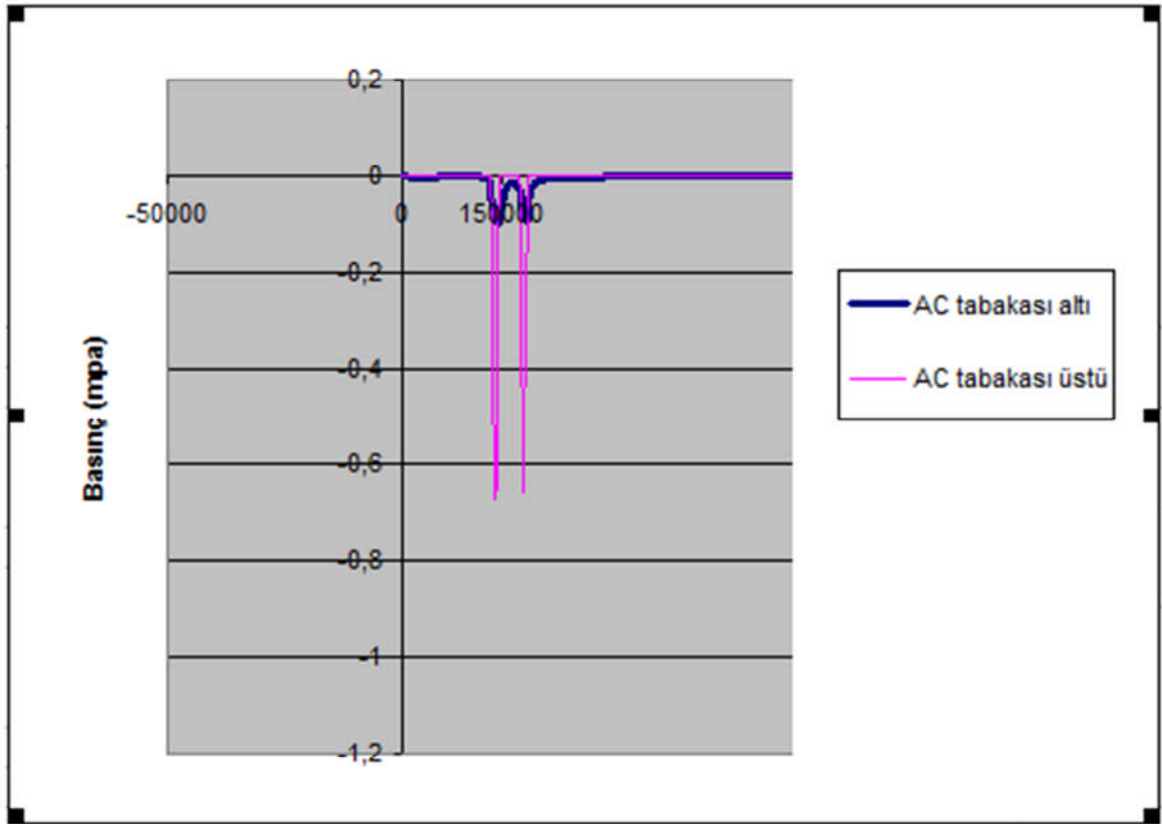
- Problem geometrik olarak tanımlandı.
- Geometrik alana düğüm-nokta atayarak, alt bölgelere ayrıldı.
- Gerekli kritik bölgeler daha yoğun meşlendi.
- Problemi çözüm için katı (Solid) veya kabuk (Shell) olarak tanımlandı.
- Problemin materyal özelliklerini tanımlandı.
- Probleme ait farklı geometrik parçalar arasına bağlantı (kontakt) atandı.
- Geometrik alanın sınır koşullarını tanımlandı.
- Problemin yükleme dataları girildi.
- Gerekli kontrol kartları açıldı ve problem koşturuldu.

2.2. Araziden Alınan Verilerin Sonlu Elemanlar Modeli ile Karşılaştırılması

Tekerlek tipi, basıncı ve temas alanı, tekerleğin yolda neden olduğu gerilme-deformasyonların araştırılması ve sağlıklı sonuçlara ulaşılması bakımından önemli faktörlerdir. Çünkü tekerlek üzerine gelen yük altındaki tekerlek boyutları ve şişme basıncı, tekerleğin temas alanının büyümesine veya küçülmesine neden olur. Temas alanı basıncı ise yoldaki gerilme ve deformasyonların oluşumuna neden olur. Bütün bu etkilerin araştırılması amacıyla arazi çalışması yapıldı (Şekil 14). Bu çalışmada, Trabzon-Arsin karayolundan, 20 cm çapında basınç ölçer ile 25 cm kalınlığındaki asfalt kaplama (AC) tabakasının üstünde ve altında oluşan basınç gerilmeleri ile tekerlek temas alanları ölçüldü. Bu verilerin ışığında, sonlu elemanlarla asfalt modellemesi yapıldı. Bu modellemede kullanılan tekerlek temas alanı basıncı olarak araziden basınç ölçer ile tekerlek altında ölçülen basınç gerilmesi verilerinden, ortalama tekerlek basıncı olan 700 kPa' la (0.0714

kg/mm^2) (Wu, 2001) yakın bir değer olan 667 kPa'lık (0.0680 kg/mm^2) temas alanı basıncı değeri ve tekerlek temas alanı için de yine araziden ölçülen $26.5 \times 29 \text{ cm}^2$ 'lik dikdörtgen temas alanı değeri seçildi.

Şekil 10'da görüldüğü gibi kaplama yüzeyinde oluşan 667 kPa'lık (0.0680 kg/mm^2) temas alanı basıncı, kaplama altında 99 kPa'lık (0.0100 kg/mm^2) düşey basınç gerilmesine neden oldu. Yolda tekerlek izi hasarına düşey basınç gerilmelerinin neden olduğu bilinmektedir (Huang, 2004).

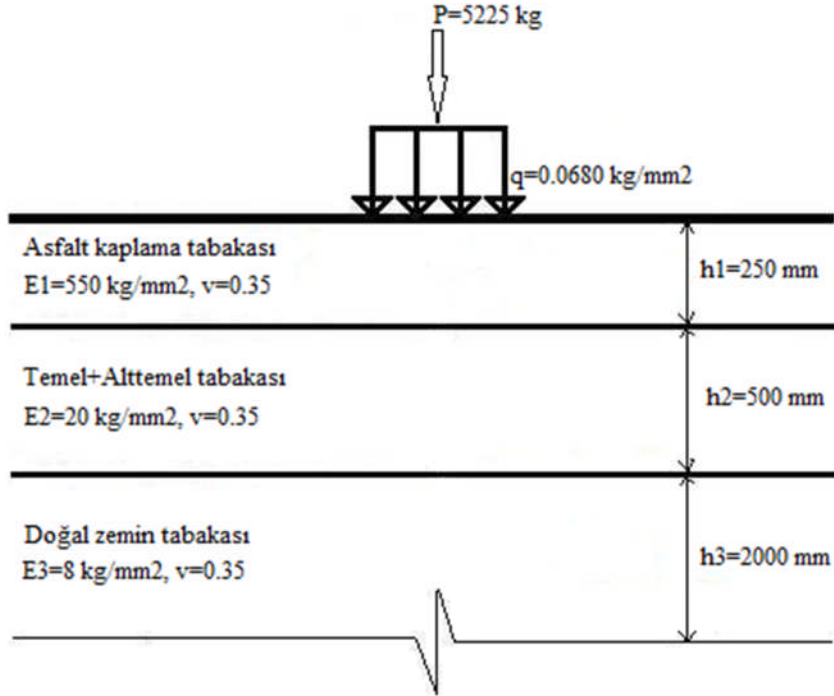


Şekil 10. Kaplama tabakası (AC) üstünde ve altında oluşan düşey basınç gerilmeleri (Trabzon-Arsin karayolu).

Sonlu elemanlar yöntemi ile Şekil 11 a'da görülen üç tabakalı yol sistemi, Şekil 11 b'de görüldüğü gibi tasarlandı. Yol tabakalarının davranışı elastik kabul edildi. Bu analizde Şekil 14'te görülen çalışma sonucu, basınç ölçer ile arazide tekerlek altından alınan temas alanı basıncı ve tekerlek yükü değerleri kullanıldı. Sonlu elemanlar modelinde kullanılan diğer parametreler Tablo 5'te verilmiştir.

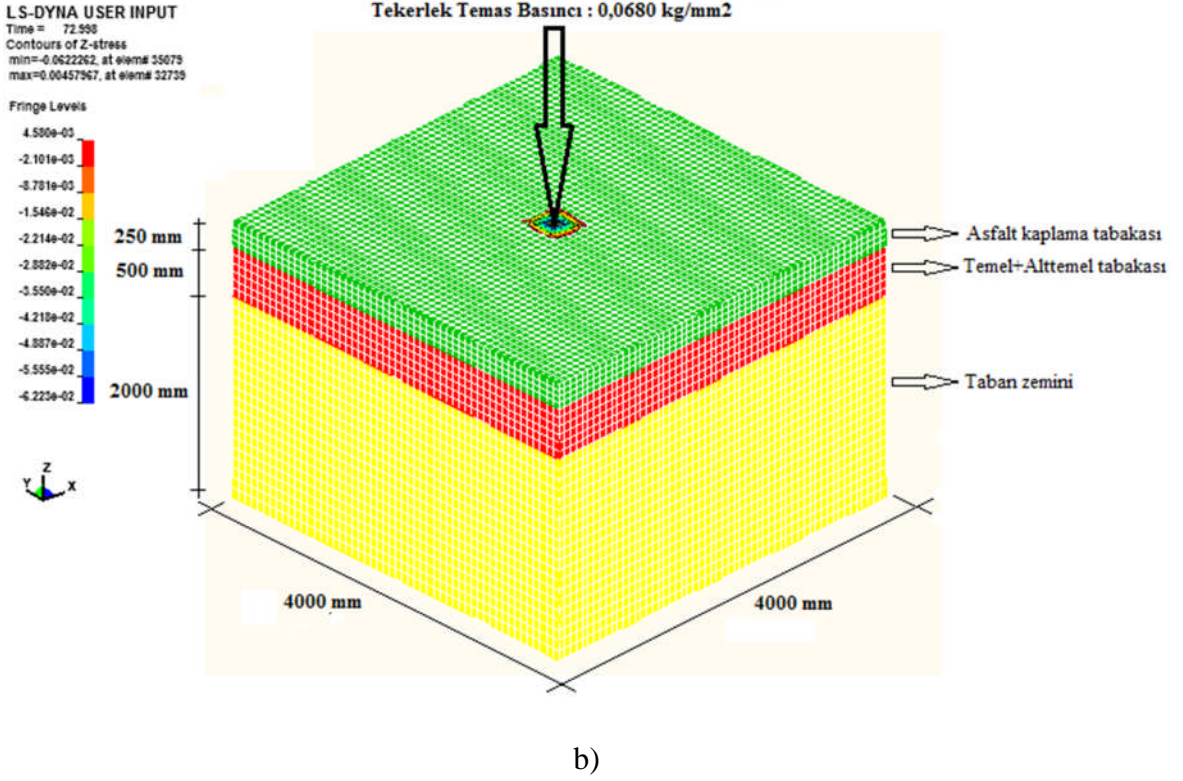
Tablo 5. Sonlu elemanlar modelinde kullanılan parametreler

Tasarım Parametreleri	Değer
Kaplama Kalınlığı (h1) (mm)	250
Kaplama Yoğunluğu (d1) (kg/mm ³)	2400 x 10 ⁻⁹
Kaplama Elastik Modülü (E1) (kg/mm ²)	550
Kaplama Poisson Oranı (v1)	0.35
Temel/Alttemel Kalınlığı (h2) (mm)	500
Temel/Alttemel Yoğunluğu (d2) (kg/mm ²)	2100 x 10 ⁻⁹
Temel/Alttemel Elastik Modülü (E2) (kg/mm ²)	20
Temel/Alttemel Poisson Oranı (v2)	0.35
Doğal Zemin Kalınlığı (h3) (mm)	2000
Doğal Zemin Yoğunluğu (d3) (kg/mm ³)	1800 x 10 ⁻⁹
Doğal Zemin Elastik Modülü (E3) (kg/mm ²)	8
Doğal Zemin Poisson Oranı (v3)	0.35

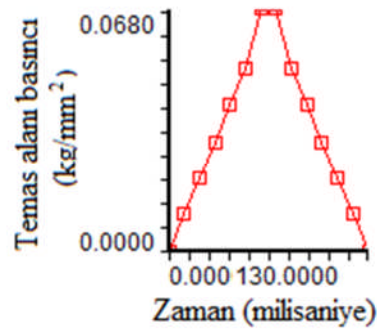


Şekil 11. a) Üç tabakalı yol sistemi b) 3D-Sonlu elemanlar modeli

Şekil 11'in devamı

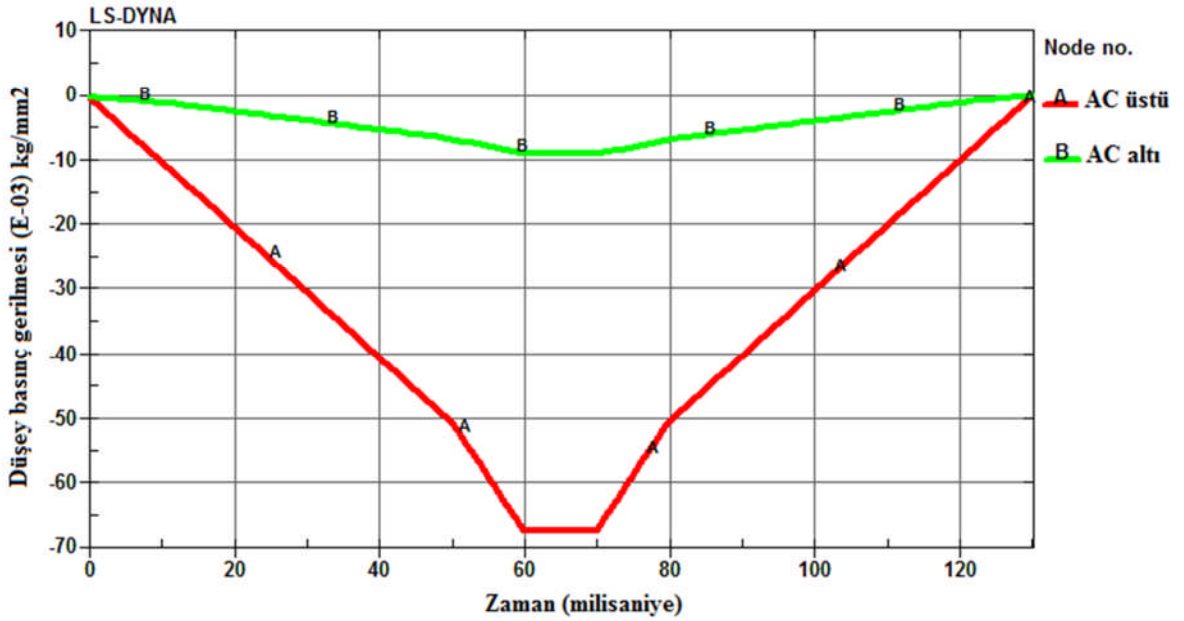


Sonlu elemanlarla yapılan dinamik analizde, Şekil 12’de görülen dinamik yükleme modeli ile zamana bağlı temas alanı basıncı girildi. Zamanla 0.0680 kg/mm²’lik maksimum temas alanı basıncına ulaşan değer, Şekil 13’te görüldüğü gibi kaplama yüzeyinde kendisine eşit kaplama altında ise 0.0098 kg/mm²’lik düşey basınç gerilmesi olarak meydana geldi.



Şekil 12. Ls- Dyna zamana bağlı yükleme grafiği

Asfalt kaplaması üstünde oluşan düşey basınç gerilmesi ile asfalt kaplaması altında oluşan düşey basınç gerilmesi arasında % 85 oranında düşüş olduğu görüldü. Bu düşüş oranı araziden alınan verilerde de %85 oranında olduğu Şekil 10'dan anlaşılmaktadır. Walubita ve F C van de Ven (2000) yaptıkları çalışmalarında 200 mm'lik asfalt kaplamanın üstünde oluşan düşey basınç gerilmesi ile asfalt kaplamanın altında oluşan düşey basınç gerilmesi arasında % 75 oranında düşüş olduğu belirtilmiştir. Bu iki çalışmada bulunan sonuçlar arasındaki % 10'luk fark, kaplama kalınlıkları arasındaki 50 mm'lik farktan kaynaklanabilir.



Şekil 13. Sonlu elemanlar analiziyle kaplama tabakası üstünde ve altında elde edilen düşey basınç gerilme grafikleri



Şekil 14. Trabzon-Arsin karayolunda basınç ölçer ile gerilme ölçümü

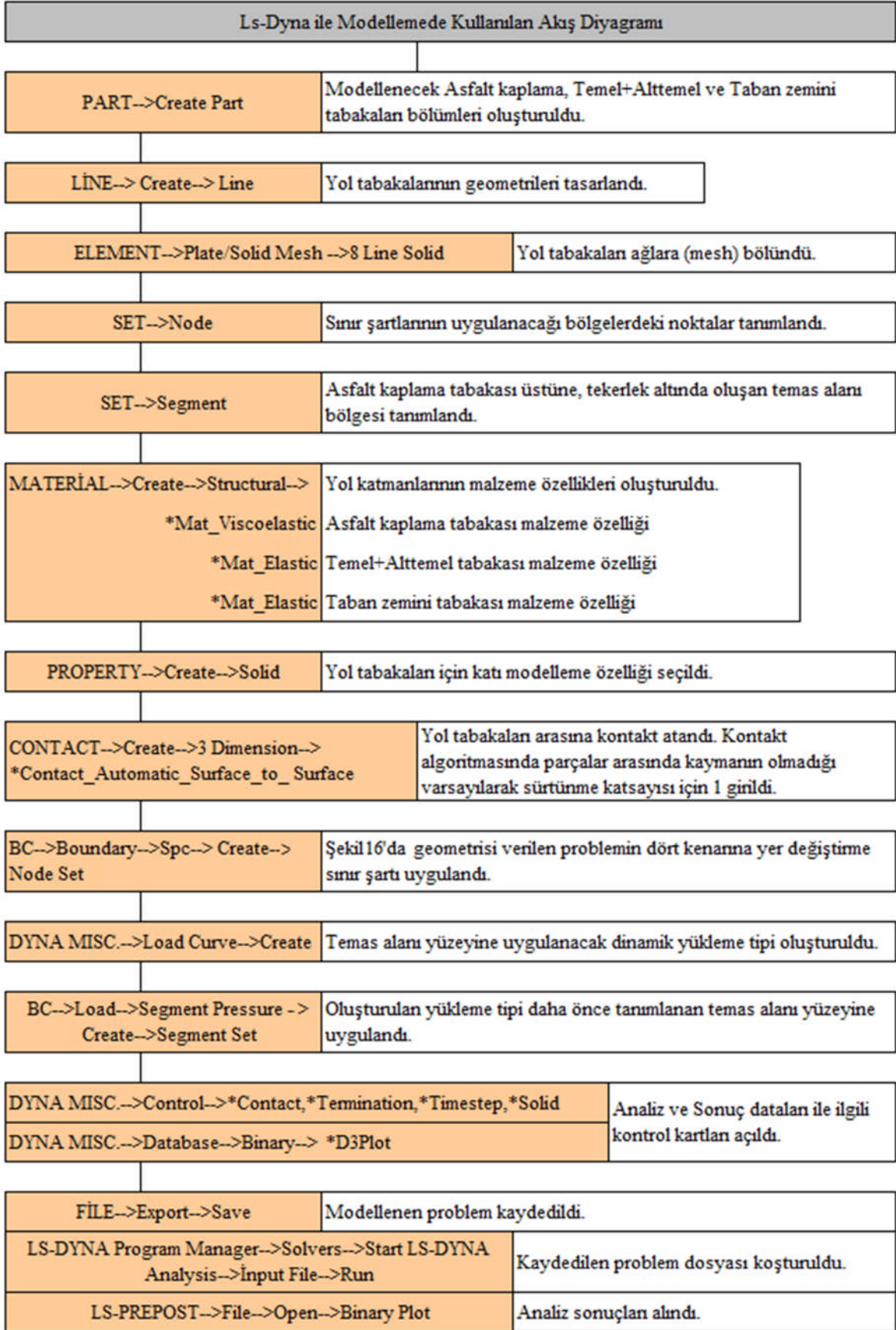
Tablo 6. Arazi verileri ile sonlu elemanlar analizi değerlerinin karşılaştırması

Analiz Tipi	AC Kalınlığı (mm)	Temas Alanı (mm)	Temas Alanı Basıncı (kg/mm^2)	Kaplama üstü Gerilme (kg/mm^2)	Kaplama Altı Gerilme (kg/mm^2)
Arazi	250	265 x 290	0.0680	0.0680	0.0100
S.E.M	250	265 x 290	0.0680	0.0680	0.0098

Sonlu elemanlar analiziyle elde edilen gerilme değerleri ile araziden alınan gerilme verileri birbirine yakın bulunmuştur. Kaplama altında meydana gelen gerilme değerlerine bakıldığında, araziden alınan değer ile sonlu elemanlarla elde edilen değer arasında %2'lik bir hata mevcut ki bu da ihmal edilebilir bir değerdir.

2.3. Karayollarından Alınan Dingil Ağırlıkları ile Standart Tek Dingil Yüğü Ağırlığı İçin Yapılan Sonlu Elemanlar Modeli ve Akış Diyagramı

Bu çalışmada üç tabakalı yol sistemi üç boyutlu (3D) olarak modellenip dinamik analiz ile çözülmüştür. Statik analiz yerine dinamik analiz seçilmesinin sebebi, yoldaki yüklemelerin hareketli olmasıdır. Ls-Dyna ile yapılan modelleme ve çözüm basamakları akış diyagramı Şekil 15'te verilmiştir.



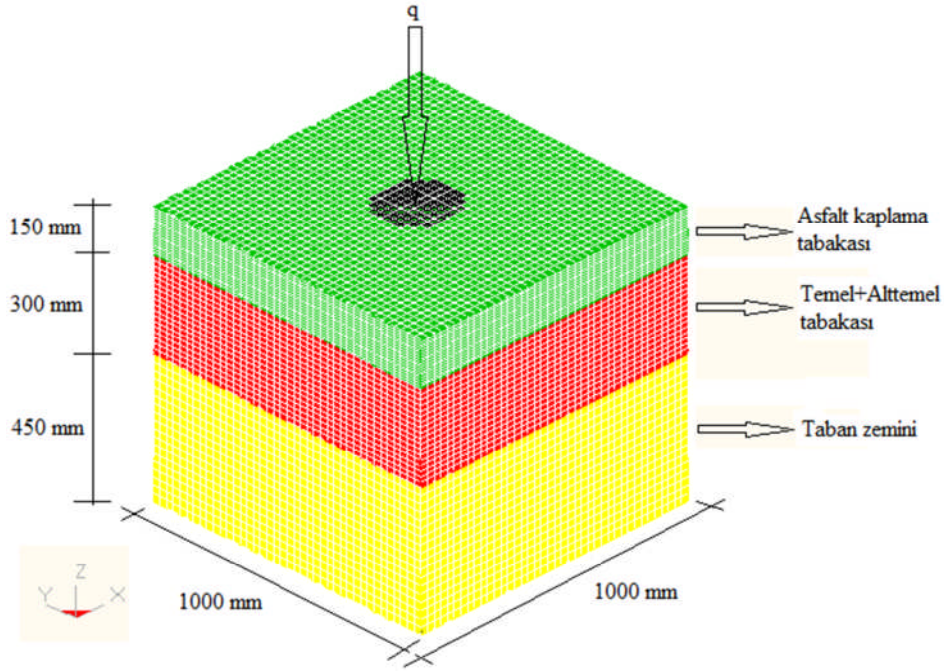
Şekil 15. Ls-Dyna ile modellemede kullanılan akış diyagramı

2.3.1. Yol Tabakalarının Modellenmesi

Modellenen yol tabakaları; asfalt kaplama tabakası (AC), temel/alttemel tabakası (base/subbase) ve taban zemini (subgrade) olarak teşkil edilmiştir. Kaplama tabakası viskoelastik, diğer tabakalar ise elastik özellikte modellenmiştir. Kaplama tabakası (bitümlü tabaka) kompleks malzeme özelliklerine sahiptir. Çünkü çevresel faktörler ve yük durumuna göre malzeme özellikleri farklılık gösterir. Örneğin yüksek sıcaklıkta viskoelastik özellikte davranış sergilerken düşük sıcaklıklarda ise elastik davranış sergilemektedir. Asfalt malzemesinin hareketli yük altındaki en doğru davranışını veren malzeme özelliği viskoelastik malzeme özelliği olması nedeniyle (Sousa, vd. 1991), asfalt kaplama tabakası malzeme özelliği olarak viskoelastik özellik seçilmiştir. Asfalt kaplama tabakası dışındaki diğer yol tabakaları ise davranış olarak elastik davranış sergiledikleri için elastik özellikte modellenmiştir. Yol tabakalarının modellenmesinde kullanılan malzeme parametreleri Tablo 7’de verilmiştir.

Tablo 7. Yol tabakaları için tasarım parametreleri

Tasarım Parametreleri	Değer
Kaplama Kalınlığı (h1) (mm)	150
Kaplama Yoğunluğu (d1) (kg/mm ³)	2400 x 10 ⁻⁹
Kaplama Elastik Modülü (E1) (kg/mm ²)	550
Kaplama Poisson Oranı (v1)	0.35
Kaplama Bulk Modülü (K) (kg/mm ²)	611
Kaplama Kesme Modülü (G) (kg/mm ²)	204
Temel/Alttemel Kalınlığı (h2) (mm)	300
Temel/Alttemel Yoğunluğu (d2) (kg/mm ²)	2100 x 10 ⁻⁹
Temel/Alttemel Elastik Modülü (E2) (kg/mm ²)	19
Temel/Alttemel Poisson Oranı (v2)	0.4
Doğal Zemin Kalınlığı (h3) (mm)	450
Doğal Zemin Yoğunluğu (d3) (kg/mm ³)	1800 x 10 ⁻⁹
Doğal Zemin Elastik Modülü (E3) (kg/mm ²)	7.5
Doğal Zemin Poisson Oranı (v3)	0.4



Şekil 16. 3D-Sonlu elemanlar yol modeli

2.3.2. Aks ve Tekerlek Tiplerinin Modellenmesi

Bölüm 1.3.1’de, “Aks Konfigürasyonları ve Yükleme Haddi” başlığı altında, genel itibariyle kullanılan aks tipleri ve yükleme hadleri verilmiştir. Ayrıca KGM (Karayolları Genel Müdürlüğü) tarafında en çok kullanılan aks tipleri ve yük istatistikleri tablo ve grafiksel olarak sunulmuştur. Verilen bu bilgilerin yanında, Van Karayolları 11. Bölge Müdürlüğü tarafından 30/09/2009 tarihinde Tatvan-Gevaş yolu arasında, S011109 no’lu istasyonda yapılan dingil ağırlığı ve başlangıç-son etüdü çalışmasında, kamyon genel bilgileri ile dingil tipi ve yükleri araştırılmıştır. Bu araştırmanın sonuçları Ek Tablo 1 ve Ek Tablo 2’ de verilmiştir.

Bu çalışmada yapılan sonlu elemanlar aks ve tekerlek modellerinde, aks ve tekerlek yükü için Van Karayolları 11. Bölge Müdürlüğü tarafından yapılan dingil ağırlığı ve başlangıç-son etüdü çalışmasından elde edilen ortalama aks ve tekerlek yükleri baz alınmıştır. Ayrıca aks ve tekerlek modellerinde bire bir aks veya tekerlek değil, bunların üzerine gelen yüklerden dolayı asfalt kaplama yüzeyinde oluşan temas alanı basınçları modellenmiştir. Çünkü tekerlek malzeme olarak kompozit ve birkaç tabakadan meydana gelmektedir. Bununla beraber jant ve dingil gibi diğer tekerlek elemanlarını göz önünde

bulundurarak bütün bu bileşenleri doğru bir şekilde modellemek başlı başına bir çalışma ve araştırma gerektirmektedir.

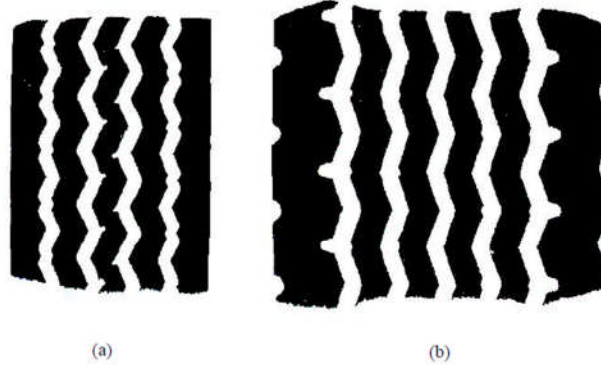
Tablo 8. Türkiye’de kullanılan dingil tipleri (Van 11.KBM)

Aks Sınıfı	Aks Tipi	Aks Yeri	Ortalama Aks Yüğü (Kg)
Tek aks	Tek tekerlekli tek aks	Ön dingil	6710
	Tek tekerlekli tek aks	Çekici dingil	6863
	Dual tekerlekli tek aks	Çekici dingil	10552
Tandem aks	Dual tekerlekli tandem aks	Arka dingil	17284
Tridem aks	Geniş tek tekerlekli tridem aks	Arka dingil	19190

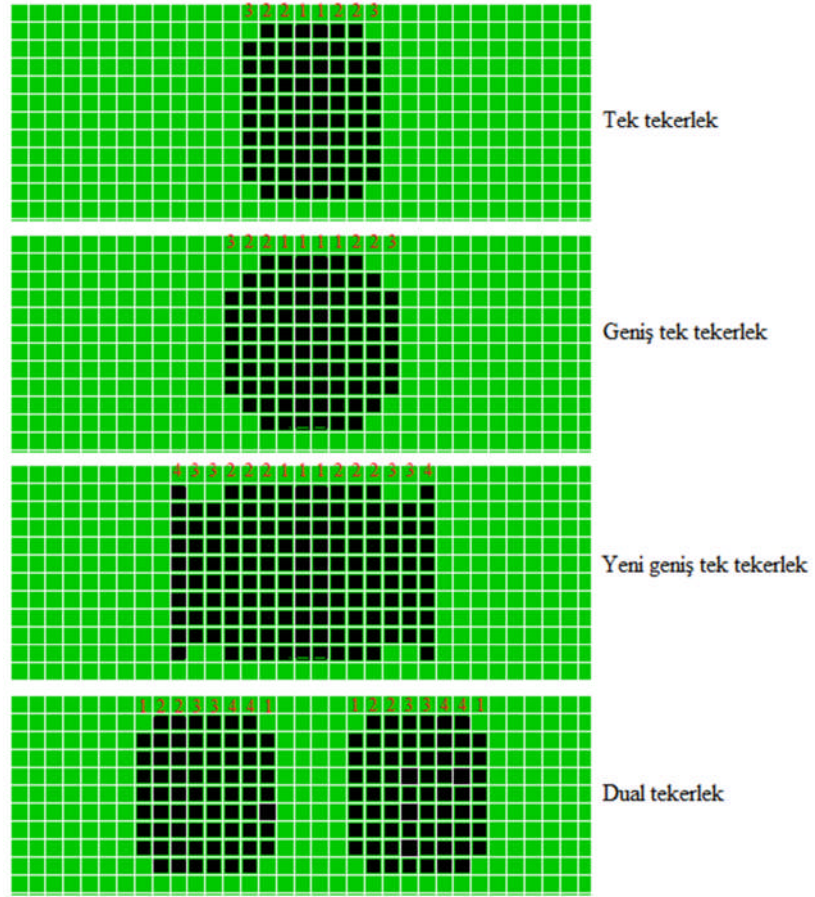
Genel itibariyle şimdiye kadar yapılan yol analizlerinde, tekerlek temas alanı dairesel ve üniform olarak kabul ediliyordu (Huang, 2004). Fakat son dönemlerde yapılan araştırmalarda tekerlek temas alanı basınçlarının üniform ve temas alanlarının da dairesel olmadığı kanıtlanmıştır. Şekil 17’te görüldüğü üzere, dual tekerleklerde genelde dıştan içe doğru basınç artmaktadır. Geniş tekerlekte ise kenarlarda meydana gelen basınç, tekerlek ortasında meydana gelenden daha büyük olmaktadır (Salgado ve Kim, 2002). Ayrıca tekerlek temas alanları genel itibariyle dikdörtgen şeklindedir. Dual tekerlekte; tekerlek hareket yönü temas genişliği, yanal genişliğinden küçüktür. Geniş tekerlekte ise bu durum tam tersidir. Tekerlek temas alanı, tekerlek tipi, basıncı ve yükleme durumuna göre değişiklik arz etmektedir (Douglas vd., 2008; Salgado ve Kim, 2002; Xie and Zheng, 2003).

Bu çalışmada, Şekil 18’de görüldüğü gibi tekerlek temas alanı basınçları non-üniform olarak modellenerek, numaralandırılan bölgelere farklı basınç yüklemeleri yapıldı.

Örneğin tek tekerlek için 1 no’lu bölgeye 0.0729 kg/mm^2 , 2 no’lu bölgeye 0.0700 kg/mm^2 ve 3 no’lu bölgeye 0.0561 kg/mm^2 ’lik temas alanı basıncı Şekil 20’de verilen dinamik yükleme grafiğinde olduğu gibi uygulandı.



Şekil 17. (a) Klasik dual tekerlek izi, (b) Geniş tek tekerlek izi (Salgado and Kim)



Şekil 18. Tekerlek tipine göre non-üniform olarak modellenen temas alanları

MICHELIN (2010) firmasının Türkiye geneli satış temsilciliklerinin verilerine göre, ağır taşıtlarda en çok kullanılan lastik sınıfı ve ebatları Tablo 9'da verilmiştir.

Tablo 9. Türkiye’de ağır taşıtlarda kullanılan lastik tipleri ve oranları (MICHELIN)

Ebatlar	Kullanım Oranı (%)	Tavsiye Edilen Kullanım Yeri
12 R 22.5	31	Kamyon ve Otobüslerde Tüm Dingiller
315 / 80 R 22.5	27	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

Tablo 9’da verilen yüzde rakamlarına bakıldığında, Tablo 1’de verilen ve KGM (2010) tarafından yapılan “Taşıt Sınıfına Göre Dingil Tipleri Dağılımı” çalışması sonuçlarına yakın sonuçlar olduğu görülmektedir. Yine bu şekilden, kamyonlarda 1.22 ve 1.1+22 dingil tiplerinin, treylerde ise 1.2+111 dingil tipinin yaygın olarak kullanıldığı anlaşılmaktadır. Tablo 10 ve 11’de ülkemizde genel itibariyle en çok kullanılan dingil ve tekerlek tipleri ile yükleri verilmiştir.

Tablo 10. Dingil ağırlığı ve başlangıç-son etüdüne göre ortalama dingil yükleri (Van 11.KBM)

ORTALAMA DİNGİL YÜKLERİ						
Kamyon Adedi	Dingil Tipi	1.Dingil	2.Dingil	3.Dingil	4.Dingil	5.Dingil
		Ağırlığı(kg)	Ağırlığı(kg)	Ağırlığı(kg)	Ağırlığı(kg)	Ağırlığı(kg)
31 (%58)	1.22	5145	8620	5947		
12 (%23)	1.2+111	6710	10552	6525	6227	6438
10 (%19)	1.1+22	6132	6863	10062	7222	

Not: Yukarıdaki veriler karayolları tarafından, araziden alınan ölçümlerden derlenmiştir.

Yukarıdaki bilgiler baz alınarak bu çalışmada yapılan sonlu elemanlar analizinde, dingil tipi olarak tek dingil, tandem dingil ve tridem dingil, tekerlek tipi olarak ise tek tekerlek (315/ 80 R 22,5), geniş tek tekerlek (385 / 65 R 22,5), yeni geniş tek tekerlek (455 / 55 R 22.5) ve dual tekerlek (12 R 22,5) kullanılmıştır (Tablo 10,11). Yeni geniş tek tekerlek Avrupa’da yaygın olarak kullanılmakta, ülkemizde ise yurtdışından gelen araçlar dışında fazla kullanılmamaktadır. Fakat daha kapsamlı bir çalışma sunmak amacıyla bu tekerlek tipide modellenmiştir. Bütün tekerlekler için şişme basıncı ise 0.0714 kg/mm^2 (700 kPa) olarak alınmıştır. 700 kPa ortalama tekerlek şişme basıncı değeri olduğu için (Korkiala, 2008), bu değer kabul edilerek tekerlek tipleri için temas alanı basınçları bulunmuştur.

Tablo 11. Modellenen tekerlekler ve temas alanları

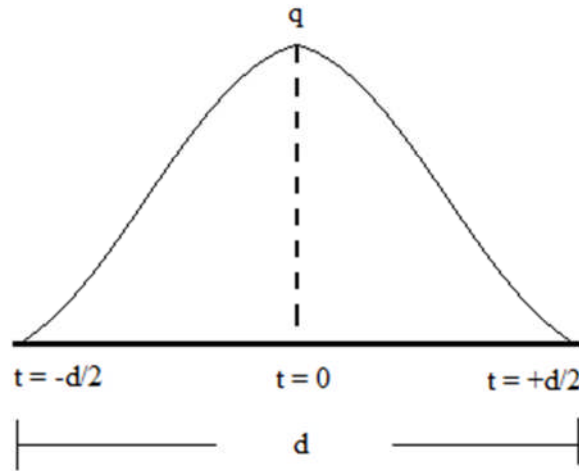
Modellenecek Tekerlek Tipi	Tekerlek Yüğü (kg)	Tekerlek Temas Alanı (mm ²) Uzunluk x Genişlik
315 / 80 R 22.5	3355 (Arazi)	225 x 225
	4100 (STDY)	250 x 225
385 / 65 R 22.5	3262.5 (Arazi)	225 x 300
	4100	250 x 300
455 / 55 R 22.5	5276 (Arazi)*	350 x 375
	4100	325 x 350
12 R 22.5	5276 (Arazi)	225 x 225+225 x 225
	4100	225 x 200+225 x 200

*Not: Yeni geniş tek tekerlek yükleme haddi, dual tekerleğin yükleme haddi kadar kabul edilmiştir.

2.3.3. Trafik Yükünün Modellenmesi

Yol tabakalarının davranışını tahmin etmede trafik yükü önemli bir faktördür. Trafik yükü statik veya dinamik olabilir. Dinamik yüklerin modellenmesinde, zaman faktörü önemlidir. Çünkü asfalt üzerindeki sabit bir noktaya yük etki süresi uzarsa bu noktadaki deformasyonlarda artar (Al-Qadi, vd., 2004). Yük etki süresini etkileyen faktör ise araç hızıdır. Araç hızının artması, yük etki süresini azaltır, araç hızının azalması ise tam tersi bir etki yaratmaktadır.

Hareketli bir aracın tekerleğinden dolayı, asfalt üzerinde sabit bir noktadaki yük-zaman grafiği aşağıdaki gibidir (Huang, 2004).



Şekil 19. Hareketli yük için zaman fonksiyonu (Huang).

Yukarıdaki fonksiyondan çıkarılan ve dinamik analizlerde yük tatbik süresini bulmak için kullanılan eşitlik, Formül 22’te verilmiştir.

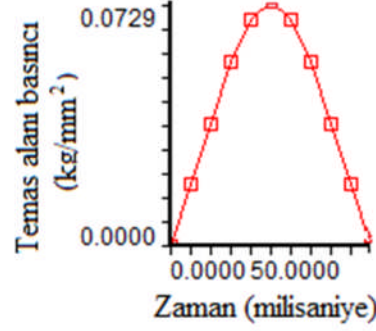
$$d = \frac{12a}{s} \quad (22)$$

Burada:

d : Yük tatbik süresi (saniye)

a : Tekerlek temas alanı çapı (metre)

s : Araç hızı (metre/saniye) dir.



Şekil 20. Sonlu elemanlar yöntemi ile modellenen dinamik yükleme grafiği

Bu çalışmada sonlu elemanlar analizi için Şekil 19’da verilen ve Huang tarafından geliştirilen “Hareketli Yük-Zaman Fonksiyonu” baz alınarak, Şekil 20’de verilen dinamik yük modeli oluşturulmuştur. Yük olarak ise Tablo 11’de verilen “Standart Tek Dingil Yüğü” ile “Dingil Ağırlığı ve Başlangıç-Son Etüdü” çalışması sonucu araziden elde edilen ortalama dingil yükleri kullanılmıştır. Tekerlek temas alanı olarak Korkiala (2008) tarafından hızlandırılmış yol testleri ve laboratuvar çalışmalarından elde edilmiş, Tablo Ek 3 ve Tablo Ek 4’te belirtilen verilerden yararlanılmıştır. Korkiala farklı tekerlek basıncı ve tekerlek yüklerinde, dual ve geniş tek tekerlek için temas alanı değişimleri kaydetmiştir. Ayrıca yine çalışmasında, Formül 22’ye göre bulunan dairesel temas alanlarının muadili olan dikdörtgenel temas alanlarını deneysel olarak bulmuştur (Ek Tablo 3,4).

Bu çalışmada modellediğimiz tekerlek tipleri ve boyutları farklı olduğu için aynı yük altında temas alanları farklı olmaktadır. Bundan dolayı, Formül 22'ye göre yük tatbik süreleri değişmektedir. Yaptığımız modellemede ise yük tatbik süresini standart tek dingil (STDY) yüklemesi için sabit alarak (0.5 saniye), aynı şartlarda analiz yapmayı amaçladık. Dingil ağırlığı etüdü (DAE) verileri yüklemesi için yükleme süreleri değişmektedir. Çünkü asfalttaki farklı yükleme süresi, yol tabakalarında farklı gerilme-deformasyonlar oluşmasına neden olabilmektedir (Al-Qadi, vd., 2004).

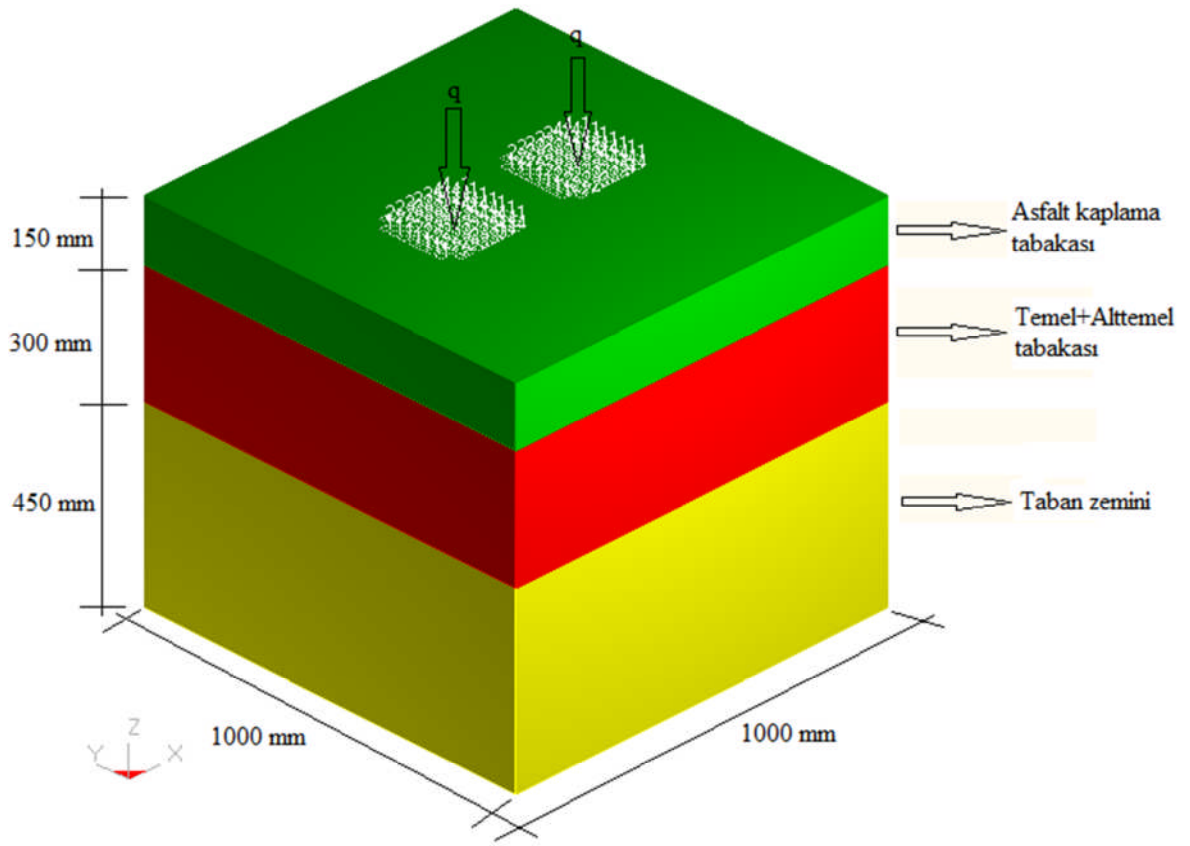
2.3.4. Dual Tekerlek Lastikleri Ara Mesafesi Değişiminin Modellenmesi

Lastik tiplerinin asfalt üzerindeki etkileri sürekli araştırılan bir konudur. Geniş tek tekerlek tipleri (385, 425, 445, 455) ile dual tekerlek tipi üzerinde yapılmış çalışmalarda; bu tekerlek tipleri, asfalt yapısında neden oldukları gerilme-deformasyonlara göre sınıflandırıldığında, dual tekerlek en az hasar veren lastiktir (Greene, vd. 2009). Bu tekerleğin alternatifi olarak yeni geniş tek tekerlek (455) sunulmuştur (Al-Qadi, vd., 2004). Yeni geniş tek tekerlek (455), dual tekerleğe göre, asfalt yüzeyinde daha az çatlak oluşumuna ve tekerlek izine neden olmaktadır. Fakat yeni geniş tek tekerlek (455), doğal zeminde daha büyük tekerlek izi ve toplam yorulma hasarına neden olmaktadır. Dual tekerlek, diğer bütün geniş tek tekerlek tiplerine göre kaplama altında daha fazla çatlığa neden olmaktadır (Al-Qadi ve Wang, 2008, 2009).

Yukarıda sonuçlar göz önünde bulundurulduğunda, özellikle yüzey çatlakları açısından, dual tekerlek lastikleri arasındaki mesafe değişimine bağlı olarak yolda neden olduğu gerilme-deformasyonlardaki farklılıkları görmek amacıyla dual tekerleğin sonlu elemanlar analizi yapıldı. Dual tekerlek modeli ile ilgili parametreler aşağıda Tablo 12'de verilmiştir.

Tablo 12. Dual tekerlek modeli için kullanılan parametreler

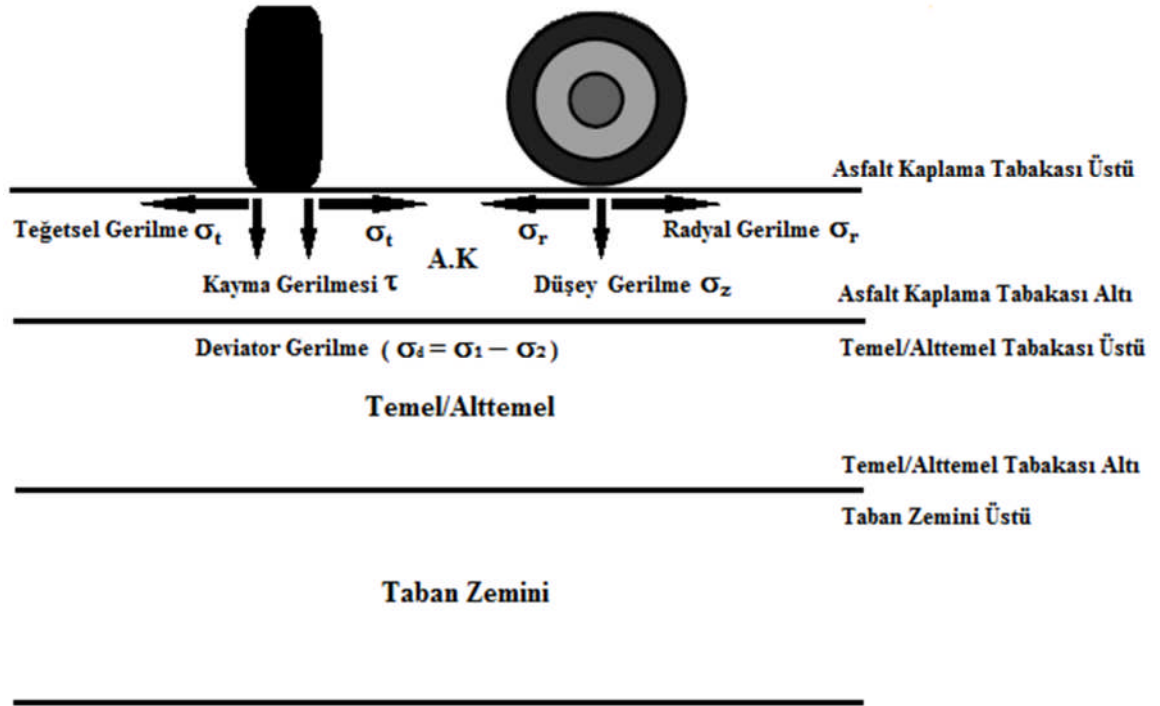
Tasarım Parametreleri	Değer
Dual Tekerlek Basıncı (kg/mm ²)	0.0714 (700 kPa)
Dual Tekerlek Yüğü (kg)	4100
Dual Tekerlek Temas Alanı (mm ²)	(225x200) + (225x200)
Dual Tekerlekte Lastikler Arası Mesafeler (mm)	50, 100, 150, 200



Şekil 21. Sonlu elemanlar 3D dual tekerlek modeli

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Karayolları 11.Bölge Müdürlüğü (Van) “Dingil Ağırlığı ve Başlangıç Son Etüdü” (DAE) arazi çalışmasından elde edilen dingil ve tekerlek yükleri ile “Standart Tek Dingil Yükü” (STDY) göz önünde bulundurularak yapılan sonlu elemanlar analizinden elde edilen farklı tekerlek ve aks konfigürasyonlarının yolda neden oldukları gerilme deformasyon değerleri ile bulgular aşağıda yazılmıştır.



Şekil 22. Tekerlek yükü altında yol tabakalarında meydana gelen gerilme tipleri

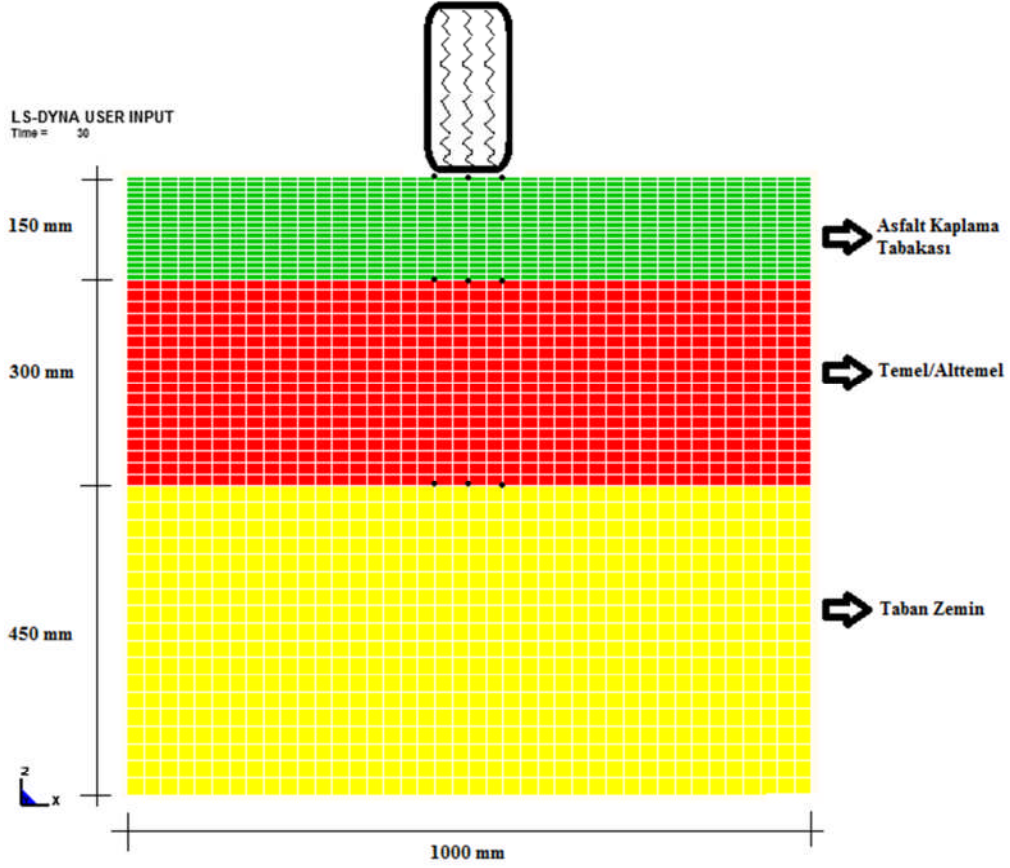
3.1. Sonlu Elemanlar Analizi Sonucu Tekerlek Konfigürasyonu İçin Elde Edilen Bulgular

Şekil 23'te tekerlek altında yol tabakalarında meydana gelen gerilme değerlerinin ölçüldüğü noktalar gösterilmiştir.

3.1.1. Radyal Gerilme

Trafik yükü nedeniyle kaplama altında oluşan yatay çekme gerilme-deformasyonları (radyal ve teğetsel), yolda yorulma çatlaklarına neden olur (Baburamani, 1999; Walubita ve C van de Ven, 2000). Yorulma çatlakları asfalt tasarımında kullanılan önemli bir faktördür. Asfalt altında meydana gelen çekme deformasyonu, mekanistik dizayn açısından yorulma çatlaklarını kontrol eden bir parametredir (Baburamani, 1999).

Bu çalışmada “dingil ağırlığı ve başlangıç son etüdü” verileri analizinden elde edilen ve Tablo 13 ile Şekil 24’te verilen sonuçlara göre kaplama üstünde en büyük radyal basınç gerilmesine neden olan tekerlek tek tekerlek, en düşük radyal basınç gerilmesine neden olan tekerlek ise geniş tek tekerlektir. Radyal gerilme kaplama yüzeyinde basınç iken kaplama altında çekme durumuna geçtiği görüldü. Yani derinliğin artmasıyla radyal gerilme, basınç durumundan çekme durumuna geçmektedir. Kaplama altında radyal çekme gerilmesine neden olan en kritik tekerlek tipi ise yeni geniş tek tekerlektir. Bu tekerleği sırasıyla dual tekerlek, tek tekerlek ve geniş tek tekerlek izlemektedir. Asfalt kaplama tabakası altında meydana gelen gerilme değerleri ile temel/alttemel tabakasında üstünde meydana gelen gerilmeler aynıdır (Huang, 2004). Bu durum temel/alttemel tabakası altı ve taban zemini tabakası üstündeki değerler içinde aynıdır (Ek Tablo 5). Temel/Alttemel tabakası altında ve taban zemini yüzeyinde meydana radyal çekme gerilmesi açısından en kritik tekerlek ise dual tekerlek, yeni geniş tek tekerlek, tek tekerlek ve geniş tek tekerlektir. Taban zemini üzerinde oluşan radyal çekme gerilmesi açısından en kritik tekerlek dual tekerlektir. Bu tekerleği yeni geniş tek tekerlek izlemektedir. En az radyal gerilme oluşturan tekerlek ise geniş tek tekerlektir.

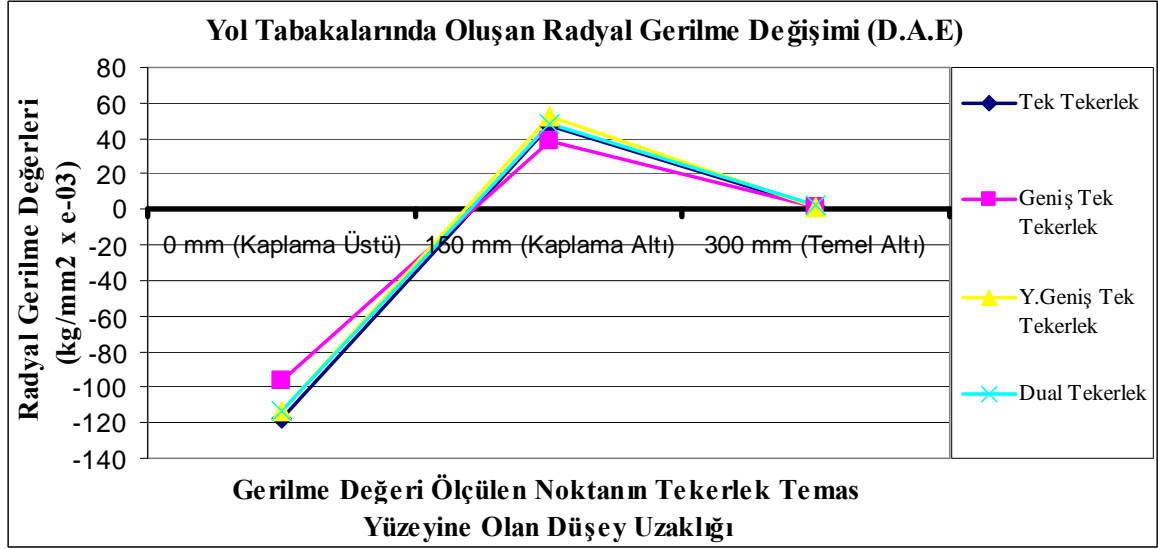


Şekil 23. Tekerlek altında yol tabakalarında gerilme değerleri ölçülen noktalar

Tablo 13. Tekerlek tiplerine göre yol tabakalarında sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen sayısal radyal gerilme değerleri (DAE)

DAE Verileri Modeli Radyal Gerilme Değerleri ($\text{kg}/\text{mm}^2 \times 10^{-3}$)				
Gerilme Değeri Ölçülen Noktanın Tekerlek Merkezine Olan Düşey Uzaklığı	Tek Tekerlek	Geniş Tek Tekerlek	Y.Geniş Tek Tekerlek	Dual Tekerlek
0 mm (Kaplama Üstü)	-118	-96	-113	-113
150 mm (Kaplama Altı)	47	39	52	48
300 mm (Temel Altı)	1.13	1.1	1.85	2.25

(+) : Çekme, (-) : Basınç



(+) : Çekme, (-) : Basınç

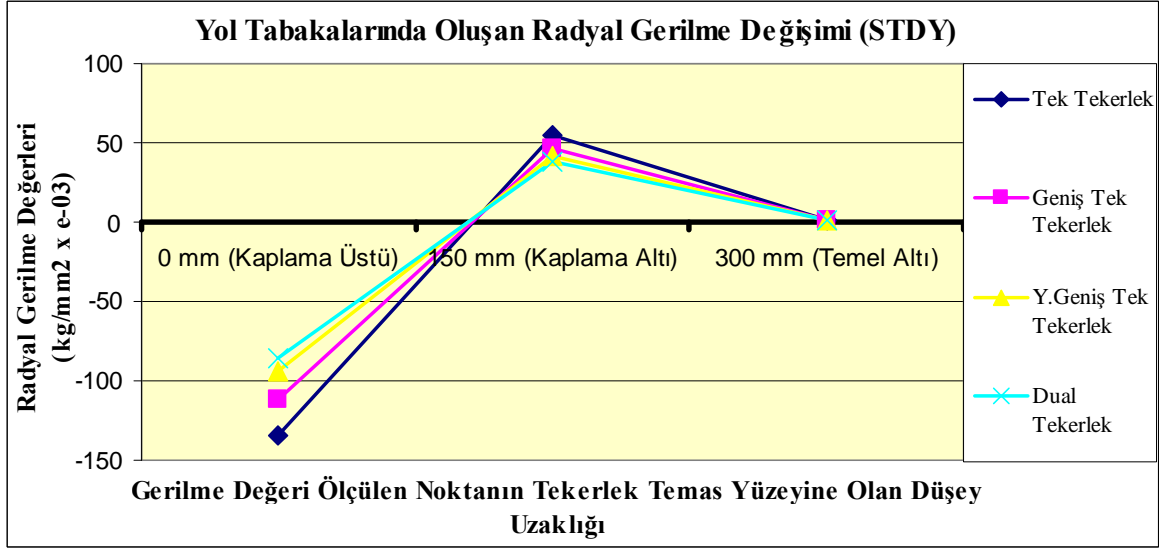
Şekil 24. Tekerlek tiplerine göre yol tabakalarında oluşan radyal gerilme değişimi (DAE)

“Standart tek dingil yükü” verileri analizinden elde edilen ve Tablo 14 ile Şekil 25’de verilen sonuçlara göre kaplama üstünde en büyük radyal basınç gerilmesine neden olan tekerlek, tek tekerlektir. Bu tekerleği; geniş tek tekerlek, yeni geniş tek tekerlek ve dual tekerlek izlemektedir. Kaplama altında oluşan radyal çekme gerilmesi açısından en tehlikeli tekerlekler ise sırasıyla şunlardır: Tek tekerlek, geniş tek tekerlek, yeni geniş tek tekerlek ve dual tekerlek. Taban zemini üzerinde ise en az gerilmeye neden olan tekerlek, diğer tabakaların aksine dual tekerlek değil, yeni geniş tek tekerlektir. Dual tekerleğin taban zemini üzerinde en büyük radyal çekme gerilmesine neden olduğu görüldü. Tek tekerlek ise taban zemini açısından, dual tekerlekten sonraki ikinci en kritik tekerlektir.

Tablo 14. Tekerlek tiplerine göre yol tabakalarında sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen sayısal radyal gerilme değerleri (STDY)

STDY Verileri Modeli Radyal Gerilme Değerleri (kg/mm ² x 10 ⁻³)				
Gerilme Değeri Ölçülen Noktanın Tekerlek Merkezine Olan Düşey Uzaklığı	Tek Tekerlek	Geniş Tek Tekerlek	Y.Geniş Tek Tekerlek	Dual Tekerlek
0 cm (Kaplama Üstü)	-135	-112	-94	-86
15 cm (Kaplama Altı)	55	46	42	38
30 cm (Temel Altı)	1.5	1.38	1.19	1.75

(+) : Çekme, (-) : Basınç



(+) : Çekme, (-) : Basınç

Şekil 25. Tekerlek tiplerine göre yol tabakalarında oluşan radyal gerilme değişimi (STDY)

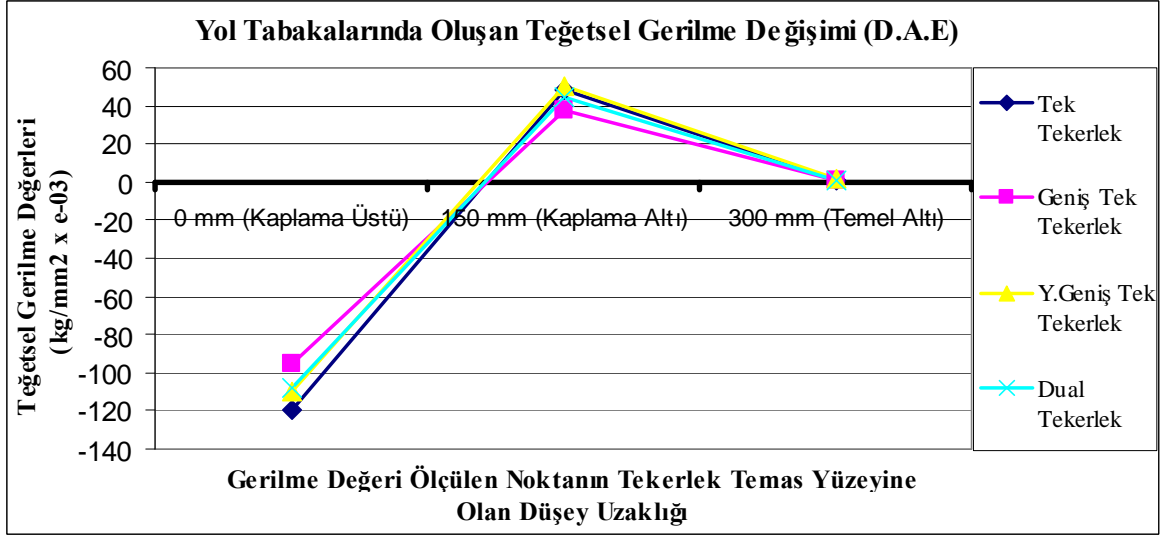
3.1.2. Teğetsel Gerilme

Dingil ağırlığı ve başlangıç son etüdü verileri modelinden elde edilen ve Tablo 15 ile Şekil 26'da verilen sonuçlara göre kaplama üstünde en az basınç gerilmesi ve diğer asfalt tabakalarında da en az çekme gerilmesine neden olan tekerlek, geniş tek tekerlektir. Kaplama üstünde geniş tek tekerlektan sonra en az basınç gerilmesine neden olan tekerlekler sırasıyla şunlardır: Dual, yeni geniş tek tekerlek ve tek tekerlek. Kaplama altında ve taban zemini üstünde ise bu sıralama dual tekerlek, tek tekerlek ve yeni geniş tek tekerlek şeklindedir.

Tablo 15. Tekerlek tiplerine göre yol tabakalarında sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen sayısal teğetsel gerilme değerleri (DAE)

DAE Verileri Modeli Teğetsel Gerilme Değerleri ($\text{kg}/\text{mm}^2 \times 10^{-3}$)				
Gerilme Değeri Ölçülen Noktanın Tekerlek Merkezine Olan Düşey Uzaklığı	Tek Tekerlek	Geniş Tek Tekerlek	Y.Geniş Tek Tekerlek	Dual Tekerlek
0 mm (Kaplama Üstü)	-120	-95	-110	-108
150 mm (Kaplama Altı)	48	38	50	44
300 mm (Temel Altı)	1.18	0.98	1.5	1.05

(+) : Çekme, (-) : Basınç



(+) : Çekme, (-) : Basınç

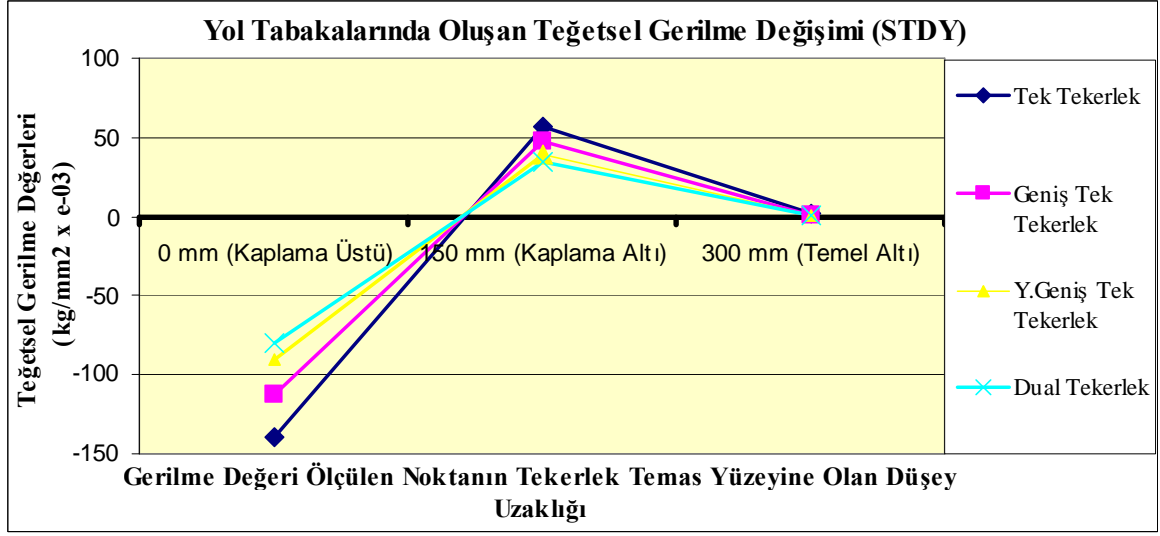
Şekil 26. Tekerlek tiplerine göre yol tabakalarında oluşan teğetsel gerilme değişimi (DAE)

Standart tek dingil yükü (STDY) analizinden elde edilen ve Tablo 16 ile Şekil 27’de verilen sonuçlara göre eşit yük ve tekerlek basıncı altında yolun tüm tabakalarında, teğetsel gerilme bakımından en düşük değerler, dual tekerlek altında elde edildi. Bu tekerleği sırasıyla yeni geniş tek tekerlek, geniş tek tekerlek ve tek tekerlek izledi.

Tablo 16. Tekerlek tiplerine göre yol tabakalarında sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen sayısal teğetsel gerilme değerleri (STDY)

STDY Verileri Modeli Teğetsel Gerilme Değerleri ($\text{kg/mm}^2 \times 10^{-3}$)				
Gerilme Değeri Ölçülen Noktanın Tekerlek Merkezine Olan Düşey Uzaklığı	Tek Tekerlek	Geniş Tek Tekerlek	Y.Geniş Tek Tekerlek	Dual Tekerlek
0 cm (Kaplama Üstü)	-140	-113	-90	-80
15 cm (Kaplama Altı)	57	47	39	34.5
30 cm (Temel Altı)	1.45	1.28	1.1	0.97

(+) : Çekme, (-) : Basınç



(+) : Çekme, (-) : Basınç

Şekil 27. Tekerlek tiplerine göre yol tabakalarında oluşan teğetsel gerilme değişimi (STDY)

Yol tabakalarında meydana gelen yatay gerilmeler (radyal, teğetsel), tekerlek altında oluşan kesme gerilmelerini önemli ölçüde etkileyebilmektedir (Su, vd., 2008). Yatay gerilmeler açısından Şekil 24 ve 26'daki grafikler incelendiğinde, yatay gerilme büyüklüğü bakımından tekerlek sırası ile Şekil 30'daki kesme gerilmesi grafiğindeki tekerlek sıralamasıyla aynı olduğu görülecektir. Yatay yönde en büyük gerilmelere neden olan tekerlek, en büyük kesme gerilmesine de neden olduğu görülmektedir.

Tablo 13, 14, 15, 16'da görüldüğü üzere radyal ve teğetsel gerilme değerleri, yol tabakaları arasında ve tabakaların derinliğiyle değişmiştir. Asfalt kaplama üstü ile altı arasında %50 oranında azalma görülmektedir. Yine % 50 oranında azalma temel/alttemel tabakası üstü ile altında oluşan radyal ve teğetsel gerilme değerinde de mevcuttur. Taban zemini üstünde ise ihmal edilebilecek oranda radyal ve teğetsel gerilme değerleri oluşmaktadır. Yol tabakaları açısından en büyük çekme gerilmeleri (radyal ve teğetsel) asfalt kaplama tabakasında meydana gelmektedir. Bundan dolayı asfalt kaplama tabakası altında yorulma çatlakları oluşur ve yüzeye doğru yayılarak asfalt kaplama üstünde aligator çatlaklar oluşur. Bu aligator çatlaklardan temel/alttemel ve taban zeminine su sızar ve ayrıca asfalt kaplama üstünde oluşan su birikintileri, fren mesafesi ve araç hakimiyetinde azalmaya neden olarak sürüş emniyetini düşürmektedir (Walubita ve C van de Ven, 2000).

Tablo 13, 14, 15 ve 16 incelendiğinde yatay doğrultuda oluşan gerilme büyüklükleri açısından, tek tekerlek altında teğetsel yönde oluşan gerilme, radyal yönde oluşan

gerilmeden ortalama %3 daha büyüktür. Geniş tek tekerlekte teğetsel ve radyal yönde oluşan gerilmeler eşittir. Yeni geniş tek tekerlek ve dual tekerlekte ise teğetsel gerilme radyal gerilmeden daha küçüktür. Yeni geniş tek tekerlek altında oluşan teğetsel gerilme radyal gerilmeden ortalama %3,5, dual tekerlekte ise %6 daha küçük olduğu tespit edilmiştir. Teğetsel gerilme ve radyal gerilmelerin tekerlek tiplerine göre farklılık arz etmesinin nedeni, tekerlek temas alanlarının; tekerlek tipi, basıncı ve yükleme durumuna göre değişiklik arz etmesidir (Douglas vd., 2008; Salgado ve Kim, 2002; Xie and Zheng, 2003).

3.1.3. Düşey Gerilme

Asfaltta oluşan düşey basınç gerilmesi yolda kullanılan önemli tasarım kriterlerindedir (Huang, 2004). Düşey basınç gerilmesi yolda tekerlek izi hasarı oluşumuna etki eden önemli bir faktördür. Tekerlek izi hasarı, asfalt kaplama tabakası üzerinde tekerlek izi boyunca meydana gelen boylamsal çökmedir. Bu çöküntü doğal zeminden kaplamaya kadar bütün yol katmanlarında görülebilir. Genel olarak hareketli kümülatif trafik yükünden dolayı oluşur. (Huang, 2004). Trafik yükü altında yolda oluşan kesme gerilmesi; defleksiyon, düşey basınç gerilmesi ve deformasyonları nedeniyle asfaltın visko-plastik davranışı sonucu oluşan kalıcı hasarlardır (Yoder ve Witczak, 1975; Walubita ve C van de Ven, 2000).

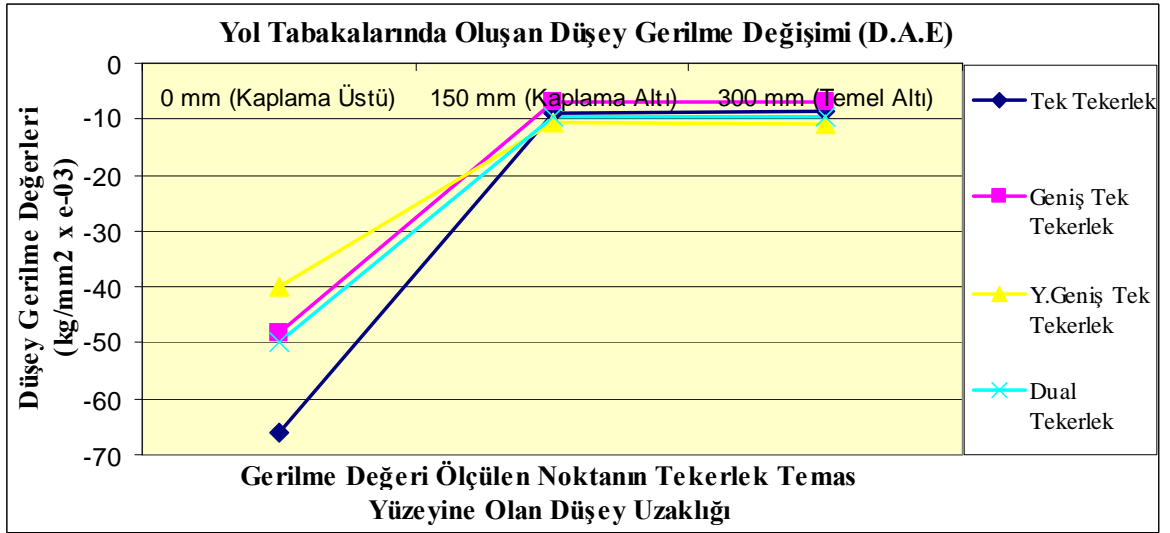
Tablo 17. Tekerlek tiplerine göre yol tabakalarında sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen sayısal düşey gerilme değerleri (DAE)

DAE Verileri Modeli Düşey Gerilme Değerleri ($\text{kg/mm}^2 \times 10^{-3}$)				
Gerilme Değeri Ölçülen Noktanın Tekerlek Merkezine Olan Düşey Uzaklığı	Tek Tekerlek	Geniş Tek Tekerlek	Y.Geniş Tek Tekerlek	Dual Tekerlek
0 mm (Kaplama Üstü)	-66	-48.3	-40	-50
150 mm (Kaplama Altı)	-9	-7	-10.5	-9.6
300 mm (Temel Altı)	-8.5	-7	-11	-9.5

(+) : Çekme, (-) : Basınç

Dingil ağırlığı ve başlangıç son etüdü verileri göz önünde bulundurularak yapılan analizden elde edilen ve Tablo 17 ile Şekil 28'de verilen sonuçlara göre kaplama üstünde

en büyük basınç gerilmesine neden olan tekerlek, tek tekerlektir. Tek tekerlek diğer tekerleklere göre asfalt kaplama tabakası üstünde %30 daha fazla düşey basınç gerilmesi oluşturmaktadır. Jordan (1994) tarafından geliştirilen Eşitlik 18 göre yapılan hesaplamada, tekerlek izi hasarı açısından tek tekerlek diğer tekerleklere göre asfalt kaplama tabakası üstünde %30 daha fazla hasara neden olmaktadır. Diğer tekerlekler sırasıyla şöyledir: Dual tekerlek, geniş tek tekerlek ve yeni geniş tek tekerlektir. Kaplama altında ve diğer asfalt tabakalarında ise neden oldukları gerilme büyüklüklerine göre bu sıra şöyledir: Yeni geniş tek tekerlek, dual tekerlek, tek tekerlek ve geniş tek tekerlektir. Temel/alttemel tabakası altında veya doğal zemin üstünde yeni geniş tek tekerlek diğer tekerleklere göre %24 daha fazla düşey gerilme deformasyonu ve tekerlek izi hasarına neden olduğu hesaplanmıştır.



Şekil 28. Tekerlek tiplerine göre yol tabakalarında oluşan düşey gerilme değişimi (DAE)

Standart tek dingil yükü baz alınarak yapılan modellemede, bütün asfalt tabakalarında oluşan düşey basınç gerilmesi büyüklüğü bakımından en kritik tekerlekler: Tablo 18 ile Şekil 29'da görüldüğü üzere tek tekerlek, geniş tek tekerlek, yeni geniş tek tekerlek ve dual tekerlektir. Tek tekerlek diğer tekerleklere göre %41 daha fazla düşey basınç gerilmesi ve tekerlek izi hasarı oluşturduğu hesaplanmıştır. Fernandes vd. (2005) tarafından yapılan çalışmada, aynı yük altında düşey gerilme deformasyon değerleri bakımından dual tekerlek, geniş tek tekerlek ve tek tekerlekli aks tipleri üzerinde yapılan araştırmada, tek tekerlek ve geniş tek tekerleğin yük eşdeğerlik faktörü (zarar faktörü),

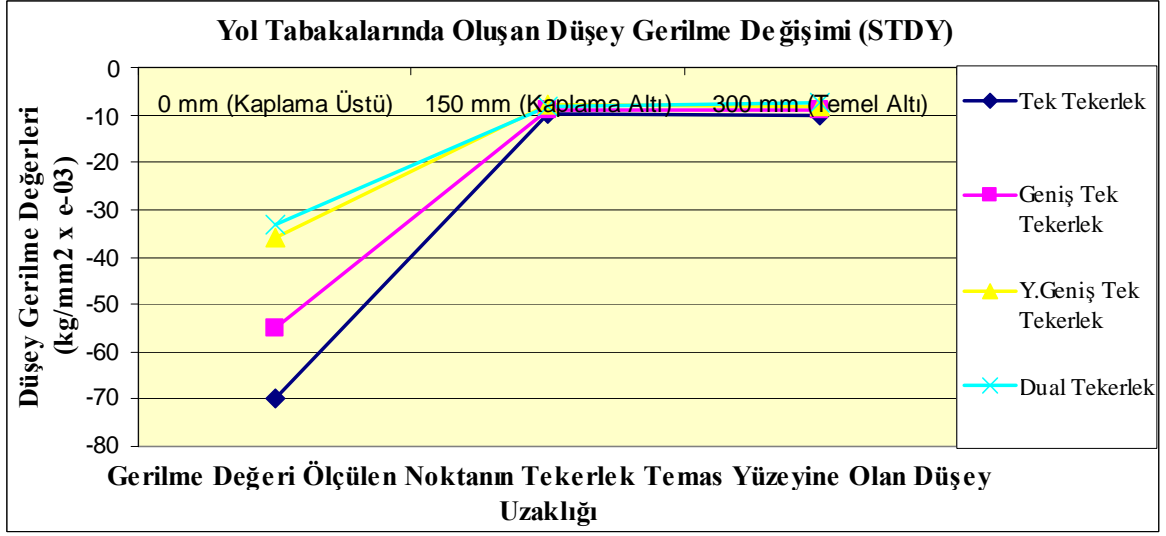
dual tekerlekli aks tiplerine göre birkaç kat daha fazla olduğu belirtilmiştir. Burada aynı aks tiplerinin farklı tekerlek konfigürasyonlarındaki etkileri araştırılmış ve bütün aks tiplerinde en güvenli tekerlek, dual tekerlek olarak bulunmuştur (Fernandes vd., 2005). Salgado ve Kim (2002) tarafından dual tekerlek ve geniş tek tekerlek (super single) üzerinde yapılan deneysel çalışmada, taban zemini üzerinde geniş tek tekerleğin bütün aks konfigürasyonları için dual tekerlekten daha büyük düşey basınç gerilme-deformasyonlarına neden olduğu belirtilmiştir. Kim vd. (2005) geniş tek tekerleğin (super single) dual tekerleğe göre asfalt kaplama tabakası ve taban zemini üzerinde daha büyük basınç gerilmesine neden olduğunu belirtmiş, dual tekerlek kullanılarak yorulma-hasar miktarının dörtte bir oranında azaltılabileceğini belirtmiştir. Al-Qadi vd. (2004) asfalt kaplama tabakası ve taban zemini üstünde oluşan düşey basınç gerilmesi ve tekerlek izi hasarı açısından en tehlikeli tekerleğin tek tekerlek, en güvenli tekerleğin ise dual tekerlek olduğunu bildirmiştir (Tablo 3 ve 4). Tablo 18'deki değerler ile Şekil 29'da ifade edilen bulgular, yukarıda anlatılan çalışmaları desteklemektedir.

Şekil 29 ve Tablo 18'de temel altında oluşan düşey basınç gerilme değerleri ile taban zemini üzerinde oluşan düşey basınç gerilme değerleri aynı olduğundan, taban zemini için düşey basınç gerilmeleri yazılmamıştır (Huang, 2004).

Tablo 18. Tekerlek tiplerine göre yol tabakalarında sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen sayısal düşey gerilme değerleri (STDY)

STDY Verileri Modeli Düşey Gerilme Değerleri ($\text{kg/mm}^2 \times 10^{-3}$)				
Gerilme Değeri Ölçülen Noktanın Tekerlek Merkezine Olan Düşey Uzaklığı	Tek Tekerlek	Geniş Tek Tekerlek	Y.Geniş Tek Tekerlek	Dual Tekerlek
0 cm (Kaplama Üstü)	-70	-55	-36	-33
15 cm (Kaplama Altı)	-9.8	-9	-7.9	-8.1
30 cm (Temel Altı)	-10.2	-8.8	-8	-7.5

(+) : Çekme, (-) : Basınç



Şekil 29. Tekerlek tiplerine göre yol tabakalarında oluşan düşey gerilme değişimi (STDY)

Walubita ve C van de Ven (2000) yaptıkları çalışmada, 200 mm kalınlığında asfalt kaplama tabakası üstünde meydana gelen düşey basınç gerilmesi değeri ile altında meydana gelen düşey basınç değeri arasında %75 azalma olduğunu bildirmiştir. Bu çalışmada ise 250 mm asfalt kaplama tabakası üstünde oluşan düşey basınç gerilmesi değerleri ile altında oluşan düşey basınç gerilmesi değeri arasında %75-86 oranında azalma olduğu tespit edilmiştir. Tablo 17 ile 18’de görüldüğü üzere tekerlek çeşitlerine göre asfalt tabakası üstünde ve altında farklı düşey basınç gerilme değerleri oluşmaktadır. Ayrıca bu çalışmada, Walubita ve C van de Ven’nin (2000) çalışmasına göre asfalt kaplama tabakası üstünde oluşan düşey basınç gerilmesi ile altında oluşan düşey basınç gerilmesi arasında daha büyük düşüş oranının sebebi bu iki çalışmada kullanılan asfalt kaplama tabakası kalınlıkları arasındaki farktır. Dikkat edilmesi gereken başka bir durum ise düşey basınç gerilmesi, asfalt kaplama tabakası kalınlığı ile hızla düşerken (Walubita ve C van de Ven, 2000) diğer yol tabakalarında gerilme değeri düşmeden devam etmekte ve hemen hemen asfalt kaplama tabakası altı ile taban zemini üstünde meydana gelen düşey basınç gerilmesi değerlerinin aynı olduğu Şekil 28 ile 29’da görülmektedir.

3.1.4. Kayma Gerilmesi

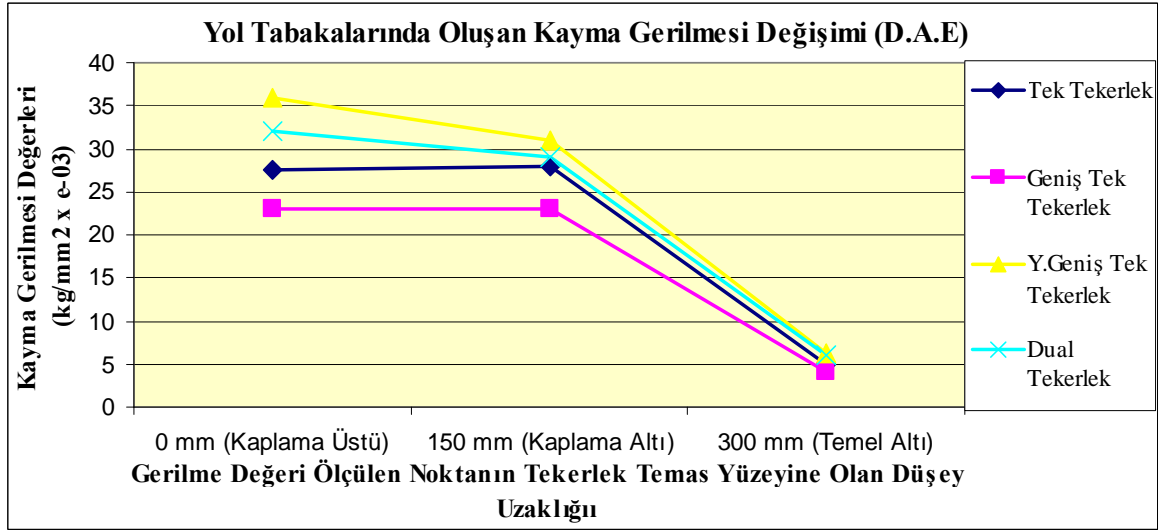
Dingil ağırlığı ve başlangıç son etüdü verileri modelinden elde edilen kayma gerilmesi değerleri bakımından en kritik tekerlekler Tablo 19 ile Şekil 30’da verildiği üzere

sırasıyla: Yeni geniş tek tekerlek, dual tekerlek, tek tekerlek ve geniş tek şeklindedir. Yeni geniş tek tekerlek diğer tekerleklere göre %24 daha fazla kayma gerilmesi ve tekerlek izi hasarı oluşturduğu Jordan (1994) tarafından geliştirilen Eşitlik 18 ile hesaplanmıştır.

Tablo 19. Tekerlek tiplerine göre yol tabakalarında sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen sayısal kayma gerilmesi değerleri (DAE)

DAE Verileri Modeli Kayma Gerilme Değerleri ($\text{kg}/\text{mm}^2 \times 10^{-3}$)				
Gerilme Değeri Ölçülen Noktanın Tekerlek Merkezine Olan Düşey Uzaklığı	Tek Tekerlek	Geniş Tek Tekerlek	Y.Geniş Tek Tekerlek	Dual Tekerlek
0 mm (Kaplama Üstü)	27.5	23	36	32
150 mm (Kaplama Altı)	28	23	31	29
300 mm (Temel Altı)	4.9	4.1	6.2	6

(+) : Çekme, (-) : Basınç



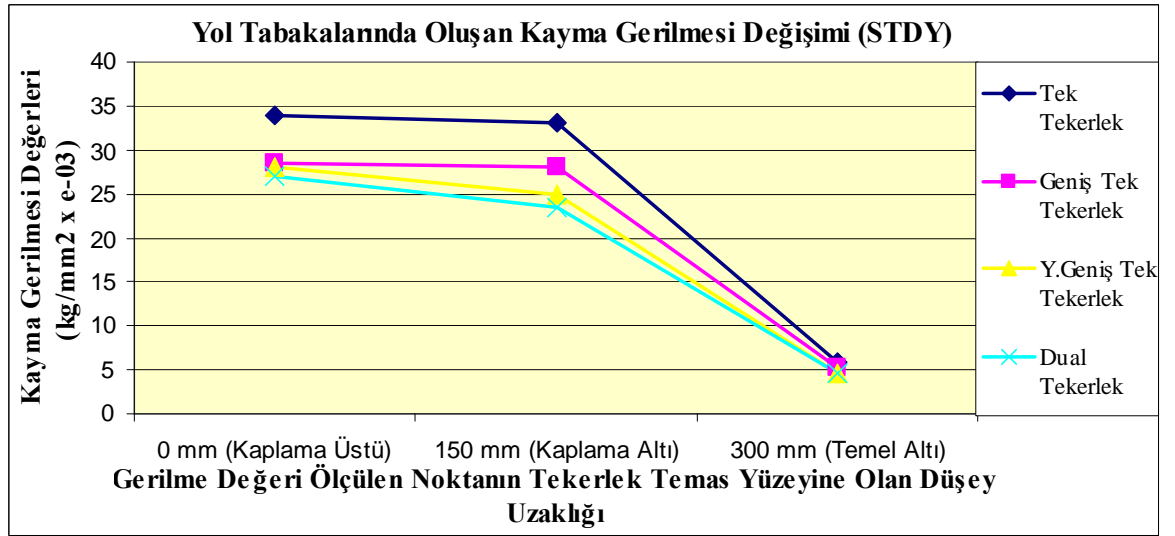
Şekil 30. Tekerlek tiplerine göre yol tabakalarında oluşan kayma gerilmesi değişimi (DAE)

Tablo 20 ile Şekil 31’de verilen ve STDY modelinde elde edilen kayma gerilmesi değerleri bakımından en büyük kayma gerilmesi oluşumuna neden olan tekerlekler sırasıyla şöyledir: Tek tekerlek, geniş tek tekerlek, yeni geniş tek tekerlek ve dual tekerlek. Tek tekerlek diğer tekerleklere göre %19 daha fazla kayma gerilmesi ve tekerlek izi hasarı oluşturmaktadır.

Tablo 20. Tekerlek tiplerine göre yol tabakalarında sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen sayısal kayma gerilmesi değerleri (STDY)

STDY Verileri Modeli Kayma Gerilme Değerleri ($\text{kg}/\text{mm}^2 \times 10^{-3}$)				
Gerilme Değeri Ölçülen Noktanın Tekerlek Merkezine Olan Düşey Uzaklığı	Tek Tekerlek	Geniş Tek Tekerlek	Y.Geniş Tek Tekerlek	Dual Tekerlek
0 cm (Kaplama Üstü)	34	28.5	28	27
15 cm (Kaplama Altı)	33	28	25	23.5
30 cm (Temel Altı)	5.9	5.2	4.7	4.7

(+) : Çekme, (-) : Basınç



Şekil 31. Tekerlek tiplerine göre yol tabakalarında oluşan kayma gerilmesi değişimi (STDY)

Kayma gerilmesinin yolda tekerlek izi ve yüzey çatlakları oluşumuna neden olduğu bilinmektedir (Su, vd., 2008). Şekil 30'da görüldüğü üzere trafikten alınan dingil ağırlığı etüdü (DAE) verileri sonlu elemanlar analizine göre yolda en büyük kayma gerilmeleri sırasıyla yeni geniş tek tekerlek (455), dual tekerlek, tek tekerlek ve geniş tek tekerlek (385) altında meydana gelmiştir. Fakat Şekil 31'de ise eşit şartlar ve verilerle modellenen tekerlekler arasında, yolda en büyük kayma gerilmesine neden olan tekerlekler: Tek tekerlek, geniş tek tekerlek (385), yeni geniş tek tekerlek (455) ve dual tekerlek şeklindedir.

Tablo 19 ile 20'de görüldüğü üzere yol tabakalarında meydana gelen kayma gerilmesi değerinin asfalt kaplama tabakası üstü ile altında hemen hemen aynı olduğu,

fakat temel/alttemel tabakasında %80-83 oranında düşüşe uğrayarak taban zeminine ulaştığı tespit edilmiştir.

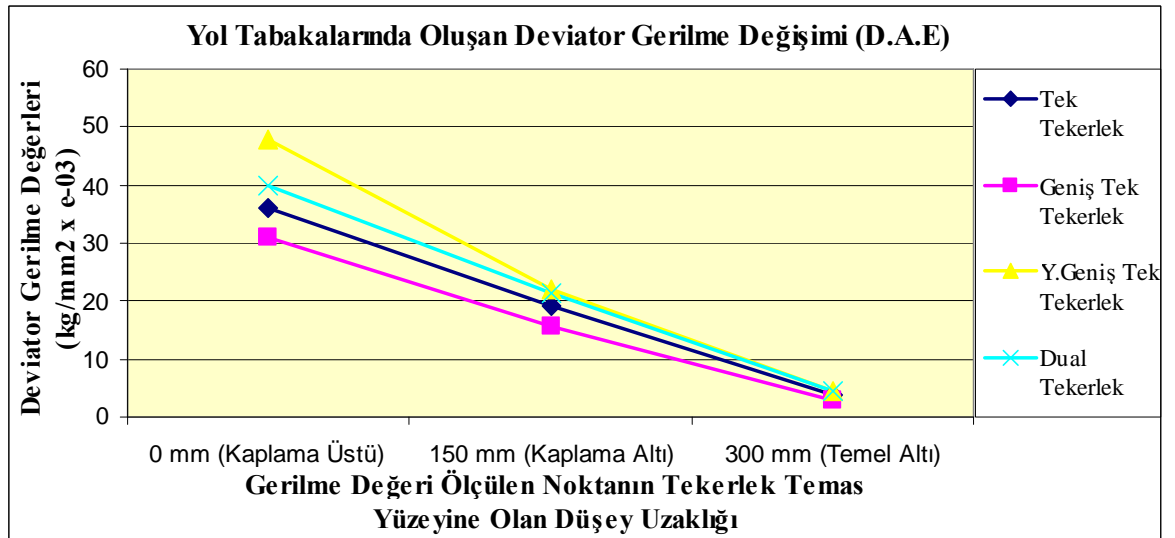
3.1.5. Deviator Gerilme

Tekerlek yükü altında, asfalt tabakalarında oluşan deviator gerilmenin dingil ağırlığı ve başlangıç son etüdü verilerinden elde edilen ve Tablo 21 ile Şekil 32’de verilen sonuçlarına göre en kritik tekerlekler sırasıyla şöyledir: Yeni geniş tek tekerlek, dual tekerlek, tek tekerlek ve geniş tek tekerlek. Bu sıralama, deviator gerilmesi açısından bütün asfalt tabakalarında aynıdır.

Tablo 21. Tekerlek tiplerine göre yol tabakalarında sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen sayısal deviator gerilme değerleri (DAE)

DAE Verileri Modeli Deviator Gerilme Değerleri ($\text{kg}/\text{mm}^2 \times 10^{-3}$)				
Gerilme Değeri Ölçülen Noktanın Tekerlek Merkezine Olan Düşey Uzaklığı	Tek Tekerlek	Geniş Tek Tekerlek	Y.Geniş Tek Tekerlek	Dual Tekerlek
0 mm (Kaplama Üstü)	36	31	48	40
150 mm (Kaplama Altı)	19	15.5	22	21.5
300 mm (Temel Altı)	3.8	2.8	4.4	4.5

(+) : Çekme, (-) : Basınç



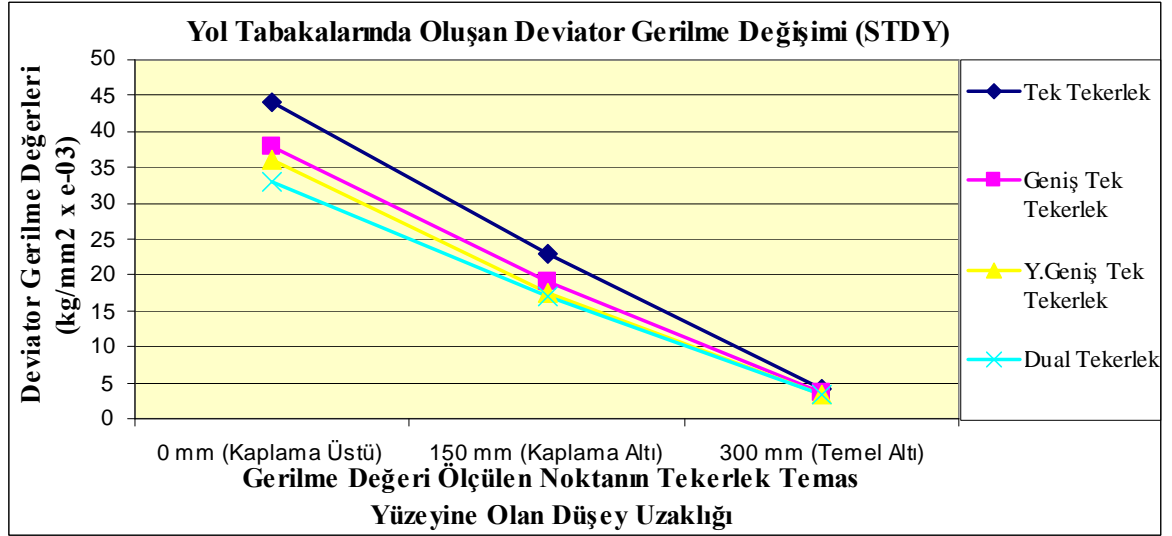
Şekil 32. Tekerlek tiplerine göre yol tabakalarında oluşan deviator gerilme değişimi (DAE)

Asfalt tabakalarında oluşan deviator gerilmesinin STDY modeli analizinden elde edilen sonuçlar Tablo 22 ile Şekil 33'te verilmiştir. En büyük deviator gerilme değeri sırasıyla; tek tekerlek, geniş tek tekerlek, yeni geniş tek tekerlek ve dual tekerlek altında meydana gelmektedir.

Tablo 22. Tekerlek tiplerine göre yol tabakalarında sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen sayısal deviator gerilme değerleri (STDY)

STDY Verileri Modeli Deviator Gerilme Değerleri ($\text{kg/mm}^2 \times 10^{-3}$)				
Gerilme Değeri Ölçülen Noktanın Tekerlek Merkezine Olan Düşey Uzaklığı	Tek Tekerlek	Geniş Tek Tekerlek	Y.Geniş Tek Tekerlek	Dual Tekerlek
0 cm (Kaplama Üstü)	44	38	36	33
15 cm (Kaplama Altı)	23	19	17,5	17
30 cm (Temel Altı)	4.1	3.5	3.25	3.4

(+) : Çekme, (-) : Basınç



Şekil 33. Tekerlek tiplerine göre yol tabakalarında oluşan deviator gerilme değişimi (STDY)

Yol tabakalarında meydana gelen deviator gerilme Tablo 21 ile 22'de görüldüğü üzere, asfalt kaplama tabakası üstü ile altı arasında %50 düşüğe uğramakta, temel/alttemel tabakasında üstü ile altı arasında ise % 82 oranında düşüş olduğu görülmektedir.

3.1.6. Kritik Çekme Deformasyonu

Asfalt tabakası (kaplama) altında oluşan kritik çekme deformasyonu, asfaltta oluşan yorulma çatlaklarını önlemek için tasarım kriteri olarak kullanılmaktadır (Huang, 2004). Tasarım kriteri olarak iki temel kritik çekme deformasyonu düşünülebilir. Bunlardan biri: Altı eksenli normal ve kesme gerilmelerine bağlı oluşan “Kapsamlı Asal Deformasyon” diğeri ise çok popüler olan ve KENLAYER programında kullanılan ve yatayda oluşan normal ve kesme gerilmelerine bağlı oluşan “Yatay Asal Deformasyon”dur (Huang, 2004). Kapsamlı temel deformasyon, yatay temel deformasyondan oldukça büyük olduğundan (Huang, 2004), güvenli tarafta kalmak amacıyla “Kapsamlı Asal Deformasyon” değerleri bu analizde kullanılmıştır.

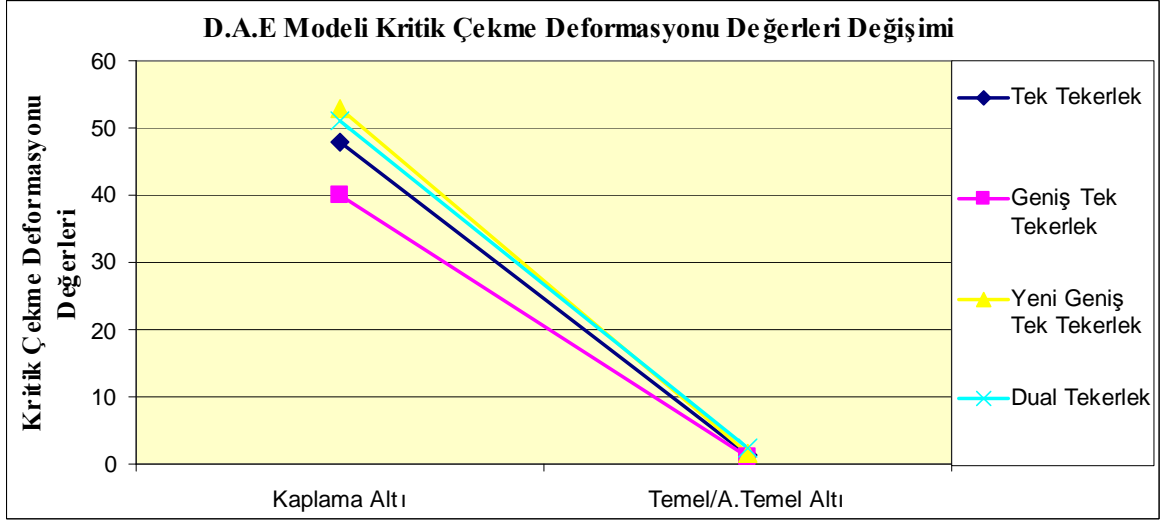
Tablo 23’te ve Şekil 34’te verilen dingil ağırlığı ve başlangıç son etüdü verileri modelinden elde edilen sonuçlara göre kaplama altında en büyük kritik çekme deformasyonuna neden olan tekerlek, yeni geniş tek tekerlektir. Bu tekerleği sırasıyla; dual tekerlek, tek tekerlek ve geniş tek tekerlek izlemektedir. Araziden alınan veriler ışığında, karayollarında en az kritik çekme deformasyonuna neden olan tekerlek geniş tek tekerlektir.

Tablo 23’te verilen değerlere bakıldığında yeni geniş tek tekerlek diğer tekerlek tiplerine göre ortalama %13 daha fazla kritik çekme deformasyonuna neden olmaktadır. Eşitlik 9’da verilen “Shell metod”una göre %13’lük kritik çekme deformasyonu oranı asfalt ömrü boyunca %64 daha fazla yorulma çatlama neden olmaktadır.

Tablo 23. Tekerlek tiplerine göre yol tabakalarında sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen sayısal kritik çekme deformasyonu değerleri (DAE)

DAE Verileri Modeli Kritik Çekme Deformasyonu Değerleri				
Yol Tabakaları	Tek Tekerlek	Geniş Tek Tekerlek	Y.Geniş Tek Tekerlek	Dual Tekerlek
Kaplama Altı	48	40	53	51
Temel Altı	1.19	1.07	1.65	2.4

(+) : Çekme, (-) : Basınç



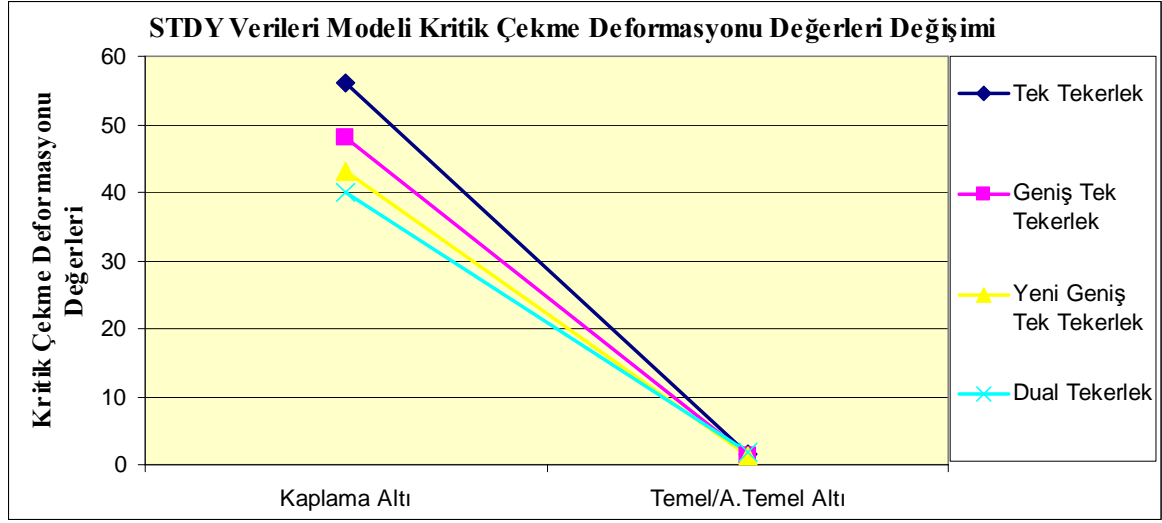
Şekil 34. Tekerlek tiplerine göre yol tabakalarında oluşan kritik çekme deformasyonu değişimi (DAE)

Aynı yükleme, tekerlek basıncı ve araç hızı koşullarını bulunduran STDY modelinden elde edilen sonuçlar, Tablo 24’te ve Şekil 35’te verildiği üzere en büyük kritik çekme deformasyonu değeri tek tekerlek altında, en küçük değer ise dual tekerlek altında olduğu görüldü. Kritik çekme deformasyonu açısından en tehlikeli tekerlekten en güvenli tekerleğe doğru sıralama tek tekerlek, geniş tek tekerlek, yeni geniş tek tekerlek ve dual tekerlek şeklindedir. Wang ve Al-Qadi (2008) eşit tekerlek yükü ve tekerlek iç basıncında, geniş tek tekerlek tipleri (425, 455) ile dual tekerlek üzerinde yaptığı çalışmada, asfalt kaplaması altında en büyük kritik çekme deformasyonunun geniş tek tekerlek (425) altında meydana geldiği ve en düşük kritik çekme deformasyonunun ise dual tekerlek altında meydana geldiği ifade edilmiştir. Şekil 35’te görüldüğü üzere eşit şartlarda modellenerek analiz edilen tekerleklerden elde edilen sonuçlar, yukarıda yapılan çalışmaya benzer olarak tek tekerlek, geniş tek tekerlek (super single) ve yeni geniş tek tekerleğe (455) göre dual tekerlek asfalt kaplama tabakası altında en düşük kritik çekme deformasyonuna neden olan tekerlek olduğu anlaşılmıştır (Kim, 2005). Şekil 35’te verilen bulgulara benzer olarak Al-Qadi vd. (2004) tarafından yapılan araştırmada kritik çekme deformasyonu ve yorulma çatlakları açısından en tehlikeli tekerleği; tek tekerlek, en güvenli tekerleği ise dual tekerlek olarak ifade etmiştir (Tablo 3 ve 4).

Tablo 24. Tekerlek tiplerine göre yol tabakalarında sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen sayısal kritik çekme deformasyonu değerleri (STDY)

STDY Verileri Modeli Kritik Çekme Deformasyonları Değerleri				
Yol Tabakaları	Tek Tekerlek	Geniş Tek Tekerlek	Y.Geniş Tek Tekerlek	Dual Tekerlek
Kaplama Altı	56	48	43	40
Temel Altı	1.45	1.3	1.25	1.75

(+) : Çekme, (-) : Basınç



Şekil 35. Tekerlek tiplerine göre yol tabakalarında oluşan kritik çekme deformasyonu değişimi (STDY)

Tablo 24'te verilen değerler incelendiğinde tek tekerleğin diğer tekerleklere göre asfalt kaplama tabakası altında ortalama %22 daha fazla kritik çekme deformasyonu oluşturmaktadır. Asfalt ömrü boyunca %22 kritik çekme deformasyonu asfalt kaplama tabakası altında, asfalt ömrü boyunca 2.5 (%250) kat daha fazla yorulma çatlama neden olabileceği Shell metod ile hesaplanmıştır.

3.2. Sonlu Elemanlar Analizi Sonucu Dingil Konfigürasyonu İçin Elde Edilen Bulgular

3.2.1. Düşey Gerilme

Şekil 32'ye bakıldığında aks tiplerine bağlı, yol tabakalarında meydana gelen düşey gerilmeler bakımından en tehlikeli aks tipleri, tek tekerlekli tek aks tipleridir. Düşey

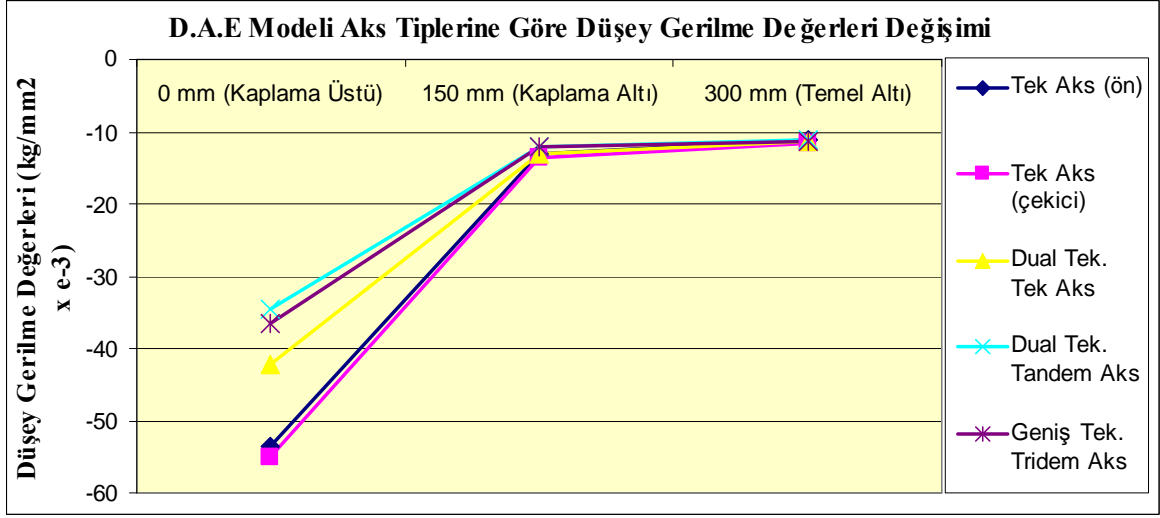
gerilmeler açısından en güvenli aks tipi dual tekerlekli tandem akstır. Fernandes vd.(2005) tarafından yapılan çalışmada, farklı yük ve tekerlek konfigürasyonlarında aksların neden oldukları düşey basınç gerilme-deformasyonlarına göre yük eşdeğerliği (zarar faktörü) açısından en güvenli aks tipleri sırasıyla tandem aks, tridem aks ve tek aks olduğu belirtilmiştir. Ayrıca aynı aks tiplerinin farklı tekerlek konfigürasyonlarındaki etkileri araştırılmış ve bütün aks tiplerinde en güvenli tekerlek, dual tekerlek olarak bulunmuştur (Fernandes vd., 2005). Şekil 36’da ve Tablo 25’te görüldüğü gibi tek aks tipleri içinde en az düşey gerilme değerlerine neden olan tek aks tipi, dual tekerlekli tek akstır. Tüm aks tipleri içinde ise yol tabakalarında en az düşey gerilmelere neden olan aks dual tekerlekli tandem akstır. Yukarıdaki bulgulara paralel olarak Al-Qadi vd. (2004) tarafından yapılan çalışmada yolda düşey basınç gerilmesinden dolayı oluşan tekerlek izi hasarı açısından en tehlikeli akslar sırasıyla tek tekerlekli akslar, geniş tekerlekli akslar ve dual tekerlekli akslardır.

Tablo 25. Aks tiplerine göre yol tabakalarında sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen sayısal düşey gerilme değerleri (DAE)

DAE Verileri Modeli Düşey Gerilme Değerleri ($\text{kg/mm}^2 \times 10^{-3}$)					
Yol Tabakaları ve Derinlikleri	Tek Aks (ön)	Tek Aks (çekici)	Dual Tek. Tek Aks	Dual Tek. Tandem Aks	Geniş Tek. Tridem Aks
0 mm (Kaplama Üstü)	-53.5	-55	-42.2	-34.5	-36.5
150 mm (Kaplama Altı)	-13	-13.5	-13	-12	-12.2
300 mm (Temel Altı)	-11	-11.5	-11.3	-11.2	-11.25

(+) : Çekme, (-) : Basınç

Çekici tek aks diğer akslara göre kaplama tabakası üstünde %25 daha fazla düşey basınç gerilmesi ve buna bağlı olarak tekerlek izi hasarı oluşturduğu hesaplanmıştır. Temel/alttemel tabakası altında veya doğal zemin üstünde ise bütün akslar birbirine yakın değerlerde basınç gerilmesi oluşturduğu Tablo 25’te görülmektedir.



Şekil 36. DAE verilerine göre aks tipleri altında oluşan düşey gerilme değişimi

3.2.2. Kritik Çekme Deformasyonu

Sonlu elemanlar analizinden elde edilen kritik çekme deformasyon grafikleri Şekil 37'de verilmektedir. Şekilde görüldüğü üzere, en büyük kritik çekme deformasyonuna neden olan aks tipi, tek aks tipleridir. Çekici tek aks üzerine, ön tek aks'a göre daha fazla yük bindiğinden, çekici tek aks yol açısından daha kritik hale gelmektedir.

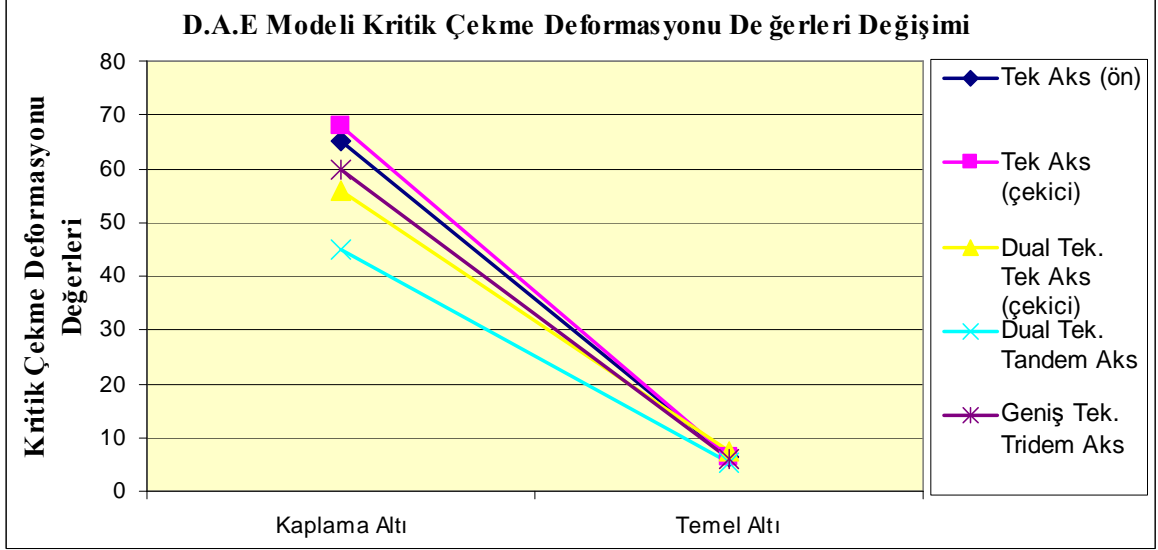
Tablo 26. Aks tiplerine göre yol tabakalarında sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen sayısal kritik çekme deformasyonu değerleri (DAE)

DAE Verileri Modeli Kritik Çekme Deformasyonu Değerleri					
Yol Tabakaları	Tek Aks (ön)	Tek Aks (çekici)	Dual Tek. Tek Aks (çekici)	Dual Tek. Tandem Aks	Geniş Tek. Tridem Aks
Kaplama Altı	65	68	56	45	60
Temel Altı	6.4	6.5	7.5	5.4	6.1

(+) : Çekme, (-) : Basınç

Düşey gerilmelerde olduğu gibi kritik çekme deformasyonları açısından da en güvenilir aks dual tekerlekli tandem aks olduğu Tablo 26'dan ve Şekil 37'den görülebilir. Özellikle kaplama altında oluşan kritik çekme deformasyonu açısından en güvenilir aks tiplerinin dual tekerlekli aks tipleri olduğu anlaşılmıştır (Fernandes vd., 2005). Al-Qadi vd. (2004) tarafından yapılan araştırmada, kritik çekme deformasyonundan dolayı oluşan yorulma çatlakları açısından en tehlikeli aksları tek tekerlekli akslar, geniş tek tekerlekli

akslar ve dual tekerlekli akslar şeklinde bildirilmiş olup yukarıdaki bulgular ile paralellik arz ettiği görülmektedir.



Şekil 37. DAE verilerine göre aks tipleri altında oluşan kritik çekme deformasyonu değişimi

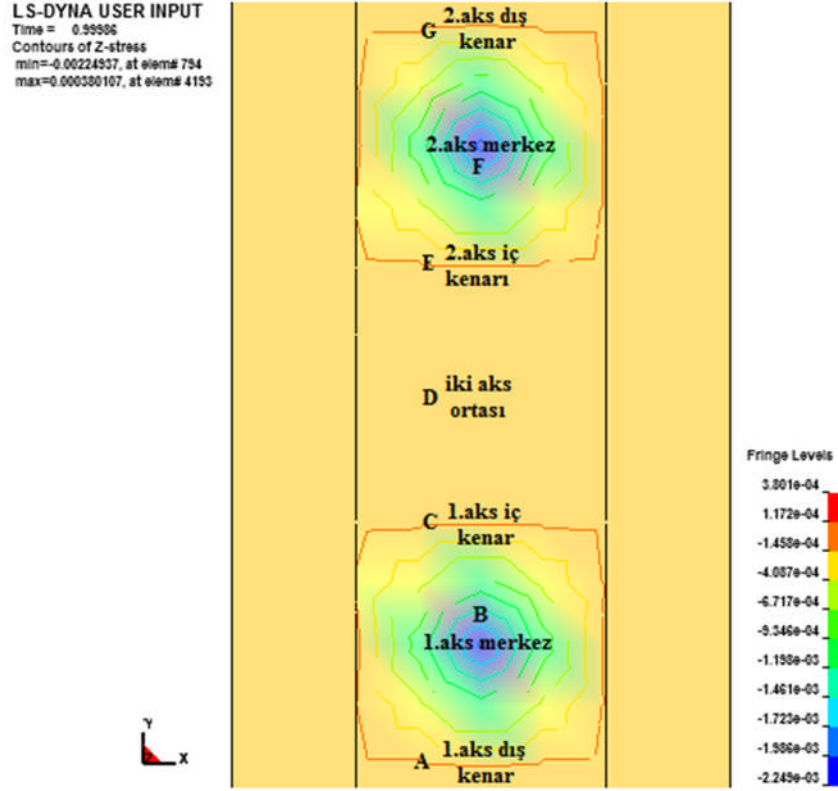
3.2.3. İki Aks Ara Mesafesinin Değişimine Bağlı Gerilme Deformasyon Analizi

İki aks ara mesafesinin artması veya azalması durumunda, yol tabakalarında meydana gelen düşey basınç gerilmesi ve kritik çekme deformasyonlarının neden oldukları hasarlar incelenmiştir.

3.2.3.1. Düşey Gerilme Değişimi

Şekil 38’de farklı iki aks ara mesafesinin artması veya azalması durumunda, yol tabakalarında meydana gelen düşey basınç gerilmesi değişimi görülmektedir. Eşit aks yükü ve tekerlek şişme basıncında, aks tekerlek kenarları ve merkezi altında, aks ara mesafesine bağlı değişim gözlemlenmemektedir. Fakat ara mesafenin değişmesi sonucu, iki aks ortasında meydana gelen düşey basınç gerilmesi değerlerinde değişim olmaktadır. Aks ara mesafelerine bağlı oluşan düşey basınç gerilmesi değerlerinde büyük farklılık olmadığından, Şekil 39’daki grafikten değişimler tam okunmasa da Tablo 27’de bu durum daha açık olarak görülebilir. Tablo 27’de aks ara mesafesi değişimine bağlı, iki aks

ortasında ve tekerlek temas yüzeylerinde meydana gelen düşey basınç gerilmesi değerlerine bakıldığında, en düşük düşey basınç gerilmesi “standart aks ara mesafesi” olan 1500 mm’de meydana geldiği görülmektedir. En büyük düşey basınç gerilmesi ise 1000 mm aks ara mesafesinde oluşmuştur.



Şekil 38. Aks ara mesafesi değişimi analizinde gerilme değeri ölçülen noktalar

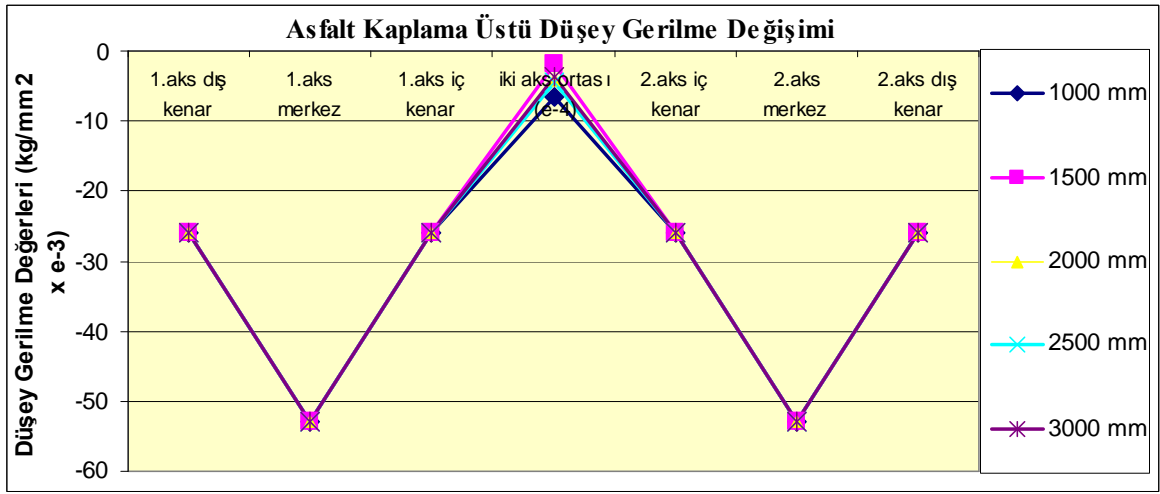
Tablo 27. Aks ara mesafesi değişimine bağlı asfalt kaplama tabakası üstünde sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen sayısal düşey basınç gerilmesi değerleri

Asfalt Kaplama Üstü Düşey Gerilme Değerleri ($\text{kg/mm}^2 \times 10^{-3}$)							
Aks Ara Mesafesi	1.aks dış kenar	1.aks merkez	1.aks iç kenar	iki aks ortası (e^4)	2.aks iç kenar	2.aks merkez	2.aks dış kenar
1000 mm	-26	-53	-26	-6.5	-26	-53	-26
1500 mm	-26	-53	-26	-1.9	-26	-53	-26
2000 mm	-26	-53	-26	-4.1	-26	-53	-26
2500 mm	-26	-53	-26	-4.4	-26	-53	-26
3000 mm	-26	-53	-26	-3.6	-26	-53	-26

(+) : Çekme, (-) : Basınç

Tablo 27’de verilen değerler incelendiğinde iki aks ara mesafesi değişimine bağlı aks tekerleği altında oluşan değerlerde artma veya azalma olmamaktadır. Fakat iki aks ortasında meydana gelen değerler 1000-1500 mm arasında %70 oranında azalmış, 1500 mm ile 2500 mm arasında % 57 artmış ve 2500-3000 mm arasında ise %18 oranında azalmıştır. Asfalt kaplama üstünde oluşan düşey basınç gerilmesi açısından en güvenli aks aralığının 1500 mm olduğu Tablo 27’de görülmektedir.

Genel itibariyle aks ara mesafesinin 1000 mm’den 3000 mm’ye çıkması durumunda düşey basınç gerilmesi ve tekerlek izi hasarının %45 oranında düştüğü hesaplanmıştır.



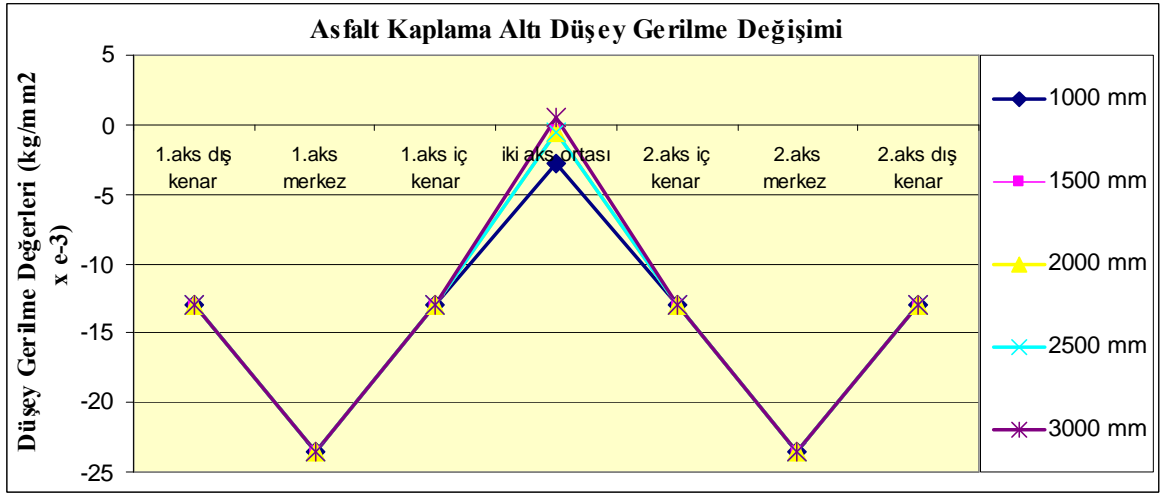
Şekil 39. Aks ara mesafesine bağlı asfalt kaplama tabakası üstünde meydana gelen düşey basınç gerilmesi değişimi

Asfalt kaplaması altında, farklı iki aks ara mesafesine bağlı meydana gelen düşey basınç gerilmesi değişimleri, kaplama üstünde olduğu gibi sadece iki aks ortasında meydana gelen düşey basınç gerilmesi değerlerinde farklılık olmaktadır. Kaplama altında da en düşük düşey basınç gerilmesi değeri 1500 mm aks ara mesafesinde oluşmakta, en büyük değer ise 1000 mm’de olduğu Şekil 40’ta görülmektedir. Tablo 28’de görüldüğü üzere 3000 mm aks ara mesafesinde düşey gerilme, basınç durumundan çekme durumuna geçmiştir.

Tablo 28. Aks ara mesafesi değişimine bağlı asfalt kaplama tabakası altında sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen sayısal dūşey basınç gerilmesi değerleri

Asfalt Kaplama Altı Dūşey Gerilme Deęerleri ($\text{kg/mm}^2 \times 10^{-3}$)							
Aks Ara Mesafesi	1.aks dış kenar	1.aks merkez	1.aks i kenar	iki aks ortası	2.aks i kenar	2.aks merkez	2.aks dış kenar
1000 mm	-13	-23.5	-13	-2.8	-13	-23.5	-13
1500 mm	-13	-23.5	-13	-0.38	-13	-23.5	-13
2000 mm	-13	-23.5	-13	-0.50	-13	-23.5	-13
2500 mm	-13	-23.5	-13	-0.55	-13	-23.5	-13
3000 mm	-13	-23.5	-13	0.47	-13	-23.5	-13

(+) : Çekme, (-) : Basınç



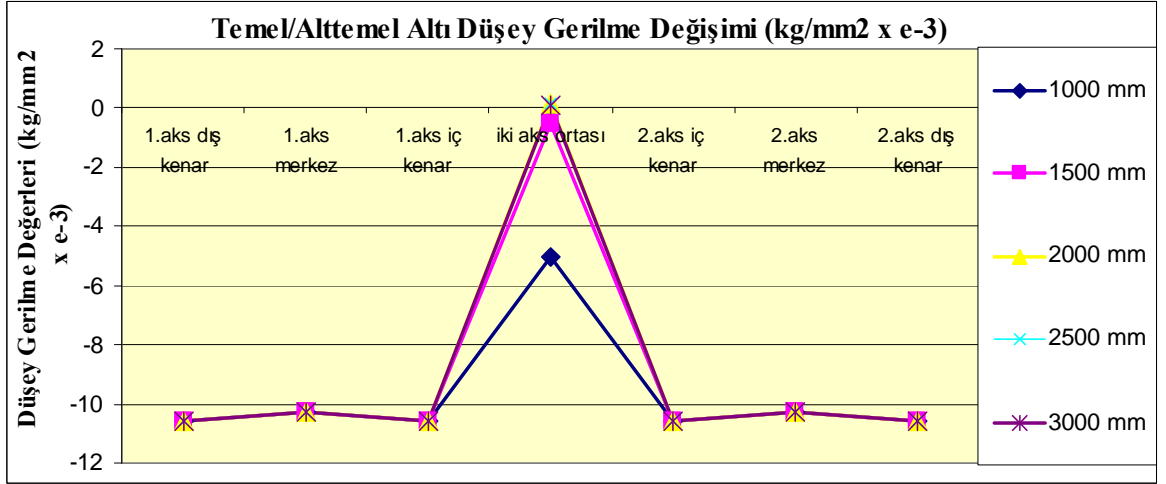
şekil 40. Aks ara mesafesine bağlı asfalt kaplama tabakası altında meydana gelen dūşey basınç gerilmesi değişimi

Temel/alttemel tabakası altında ve doğal zemin üstünde dūşey basınç gerilmesi değerleri büyüklüğü açısından iki aks ortasında meydana gelen en büyük değerin 1000 mm aks ara mesafesinde olduğu Tablo 29'da görülebilir. Yine Tablo 29'dan 1500 mm aks ara mesafesinde dūşey basınç gerilmesi meydana gelirken diğer aks aralıklarında dūşey basınç değerlerinin derinlikle çekme durumun geçtikleri tespit edilmiştir. Aks tekerlek merkezi ve kenarlarında meydana gelen dūşey basınç gerilmesi birbirine yakın değerdedir. İki aks ortasında meydana gelen dūşey çekme gerilmeleri ise sifıra yakın değerde oldukları şekil 41'den anlaşılmaktadır.

Tablo 29. Aks ara mesafesi değişimine bağlı temel/alttemel tabakası altında sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen sayısal dūşey basınç gerilmesi değerleri

Temel/Alttemel Altı Dūşey Gerilme Deęerleri ($\text{kg/mm}^2 \times 10^{-3}$)							
Aks Ara Mesafesi	1.aks dış kenar	1.aks merkez	1.aks i kenar	iki aks ortası	2.aks i kenar	2.aks merkez	2.aks dış kenar
1000 mm	-10.6	-10.3	-10.6	-5.00	-10.6	-10.3	-10.6
1500 mm	-10.6	-10.3	-10.6	-0.50	-10.6	-10.3	-10.6
2000 mm	-10.6	-10.3	-10.6	0.16	-10.6	-10.3	-10.6
2500 mm	-10.6	-10.3	-10.6	0.14	-10.6	-10.3	-10.6
3000 mm	-10.6	-10.3	-10.6	0.08	-10.6	-10.3	-10.6

(+) : Çekme, (-) : Basınç



şekil 41. Aks ara mesafesine bağlı temel/alttemel tabakası altında meydana gelen dūşey basınç gerilmesi değişimi

3.2.3.1. Kritik ekme Deformasyonu Değişimi

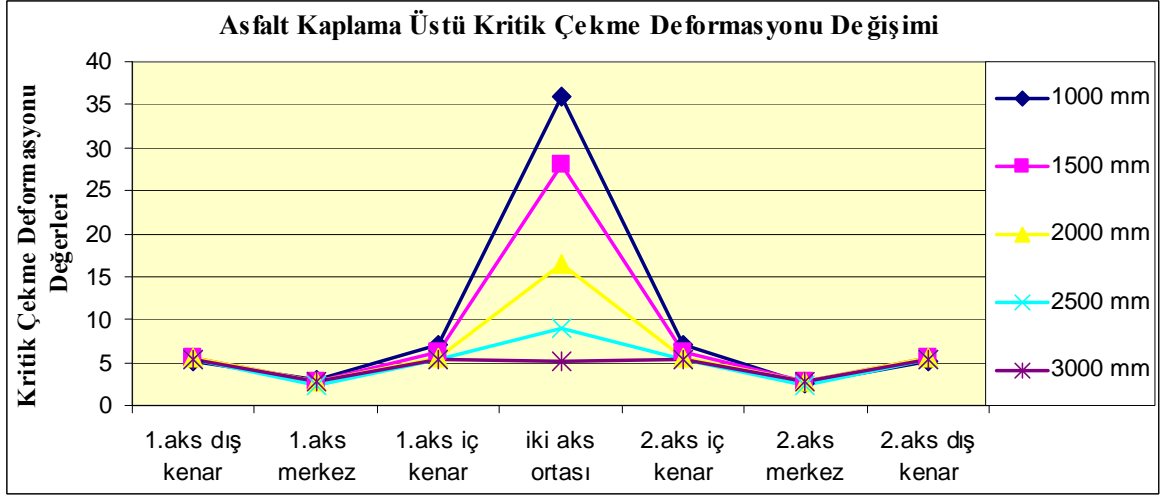
şekil 42’de görüldüğü üzere farklı iki aks ara mesafesinin artmasıyla asfalt kaplama tabakası üstünde ve iki aks ortasında meydana gelen kritik çekme deformasyonu düzgün olarak azalmaktadır. İki aks ara mesafesinin 1000 mm’den 3000 mm’ye çıkması durumunda, kritik çekme deformasyonu değerinde %86 oranında azalma meydana gelmektedir. “Shell metod”una göre kritik çekme deformasyonunda %86 oranında düşüş olmasıyla asfalt ömrünün altı kat (%600) arttığı hesaplanmıştır. Tablo 30 ve 31’de verildiği üzere özellikle aks tekerlek kenarı ve temas yüzeyi merkezinde birbirine yakın ve dūřük

kritik çekme deformasyonu değerleri meydana gelirken iki aks ortasında ise, asfalt kaplama tabakası altında ve aks merkezinde meydana gelen kritik çekme deformasyonundan sonra yol tabakalarındaki en büyük kritik çekme deformasyonu değerinin oluştuğu görülmüştür. Genel olarak en büyük kritik çekme deformasyonunun asfalt kaplama tabakası altında meydana geldiği bilinmektedir (Huang, 2004). Bu kritik çekme deformasyonlarına bağlı olarak asfalt kaplama tabakası altında yorulma çatlakları oluşmakta ve bu yorulma çatlakları zamanla asfalt kaplaması içinde yayılarak yukarı doğru çıkıp “tımsah sırtı” (aligator) olarak adlandırılan yorulma çatlaklarını oluşturmaktadır (Walubita ve C van de Ven, 2000). Asfalt kaplaması üstünde meydana gelen yorulma çatlaklarının nedeni ise, Wang ve Al-Qadi’ye (2008) göre kritik çekme deformasyonundan öte kesme gerilmesidir. Greene vd. (2009) göre ise kaplama üstünde en büyük çekme deformasyonu dual tekerlek arasında meydana gelmektedir. Dolayısıyla yüzey çatlaklarının başlıca nedeni dual tekerlek olarak gösterilmektedir. Tablo 30’da iki aks merkezi ara mesafesinin değişimi ve buna bağlı olarak meydana gelen kritik çekme deformasyonu değerlerinin büyüklüğüne bakıldığında, dual tekerlek davranışına benzer olarak iki aks arasında meydana gelen kritik çekme deformasyonunun yüzey çatlaklarına neden olduğu savunulabilir.

Tablo 30. Aks ara mesafesi değişimine bağlı asfalt kaplama tabakası üstünde sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen sayısal kritik çekme deformasyonu değerleri

Asfalt Kaplama Üstü Kritik Çekme Deformasyonu Değerleri							
Aks Ara Mesafesi	1.aks dış kenar	1.aks merkez	1.aks iç kenar	iki aks ortası	2.aks iç kenar	2.aks merkez	2.aks dış kenar
1000 mm	5.2	3.1	7.1	36	7.1	2.6	5.2
1500 mm	5.5	2.8	6.1	28	6.1	2.8	5.5
2000 mm	5.6	2.7	5.5	16.5	5.5	2.7	5.6
2500 mm	5.4	2.3	5.3	9	5.3	2.3	5.4
3000 mm	5.4	2.8	5.3	5.1	5.3	2.8	5.4

(+) : Çekme, (-) : Basınç



Şekil 42. Aks ara mesafesine bağlı asfalt kaplama tabakası üstünde meydana gelen kritik çekme deformasyonu değişimi

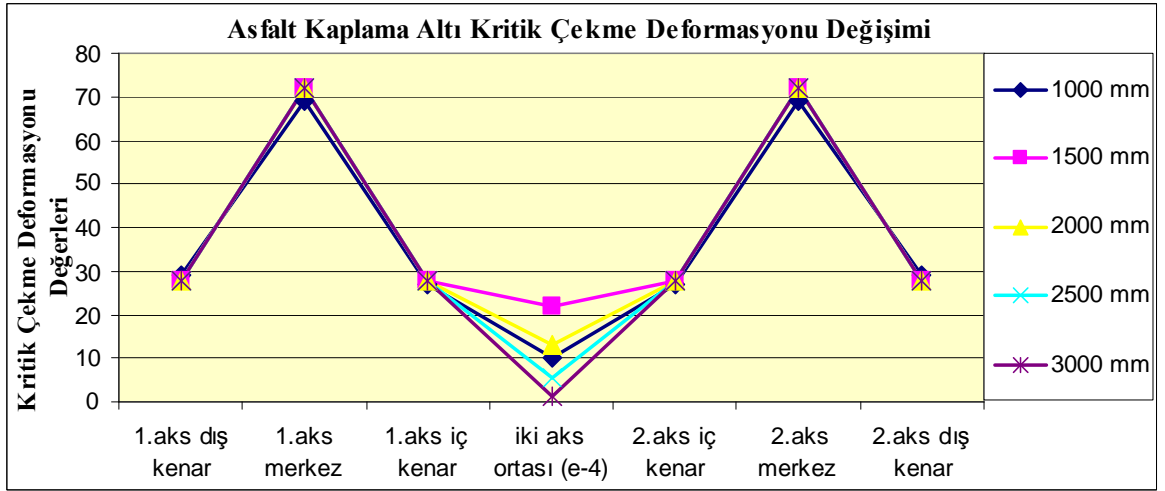
Yol tabakaları içinde en büyük kritik çekme deformasyonu değeri asfalt kaplama tabakası altında meydana gelmektedir (Huang, 2004). Şekil 43'te görüldüğü üzere asfalt kaplama tabakası altında en büyük kritik çekme deformasyonu tekerlek temas yüzeyi merkezinde oluşmaktadır. Asfalt kaplama tabakasında meydana gelen yorulma çatlaklarının tahmini yapılırken asfalt kaplama tabakası altında meydana gelen kritik çekme deformasyonu değeri alınmaktadır (Walubita ve C van de Ven, 2000; Huang, 2004). Kaplama tabakası altında meydana gelen kritik çekme deformasyonu büyüklüğü açısından en yüksek değer, Tablo 31'de verildiği üzere ağır taşıt trafiğinde "ortalama aks genişliği" olan 1500 mm'de, en düşük değer ise 3000 mm'de oluşmaktadır.

Aks ara mesafesi değişimine bağlı kaplama altında, sadece iki aks arasında oluşan kritik çekme deformasyonu değerlerinde değişiklik gözlemlenmiştir. 1000-1500 mm arasında kritik çekme deformasyonu %120 oranında artmıştır. 1500-2000 mm ile 2000-2500 mm arasında %60, 2500-3000 mm arasında ise %75 oranında düşmüştür. Genel itibariyle iki aks ara mesafesinin 1000 mm'den 3000 mm'ye çıkması durumunda, asfalt kaplama tabakası altında meydana gelen kritik çekme deformasyonu değerlerinde %86 oranında düşüş olmaktadır.

Tablo 31. Aks ara mesafesi değişimine bağlı asfalt kaplama tabakası altında sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen sayısal kritik çekme deformasyonu değerleri

Asfalt Kaplama Altı Kritik Çekme Deformasyonu Değerleri							
Aks Ara Mesafesi	1.aks dış kenar	1.aks merkez	1.aks i kenar	iki aks ortası (e-4)	2.aks i kenar	2.aks merkez	2.aks dış kenar
1000 mm	29	69	27	10	27	69	29
1500 mm	28	72	28	22	28	72	28
2000 mm	28	72	28	13	28	72	28
2500 mm	28	72	28	5.5	28	72	28
3000 mm	28	72	28	1.4	28	72	28

(+) : Çekme, (-) : Basınc



şekil 43. Aks ara mesafesine bağlı asfalt kaplama tabakası altında meydana gelen kritik çekme deformasyonu değişimi

İki aks merkezi ara mesafesi değişimleri göz önünde bulundurularak yapılan analiz sonucu temel/alttemel tabakası altında, kritik çekme deformasyonu değeri iki aks ortasında, kaplama tabakası altında ve iki aks ortasında oluşan değerlere benzer şekilde en büyük değer 1500 mm'de, en küçük değer ise 3000 mm oluşurken aks tekerlek merkezi ve kenarlarında ise aks ara mesafesinin artmasına bağlı olarak kritik çekme deformasyonu değerlerinde artma olduğu şekil 44'ten ve Tablo 32'den anlaşılmaktadır.

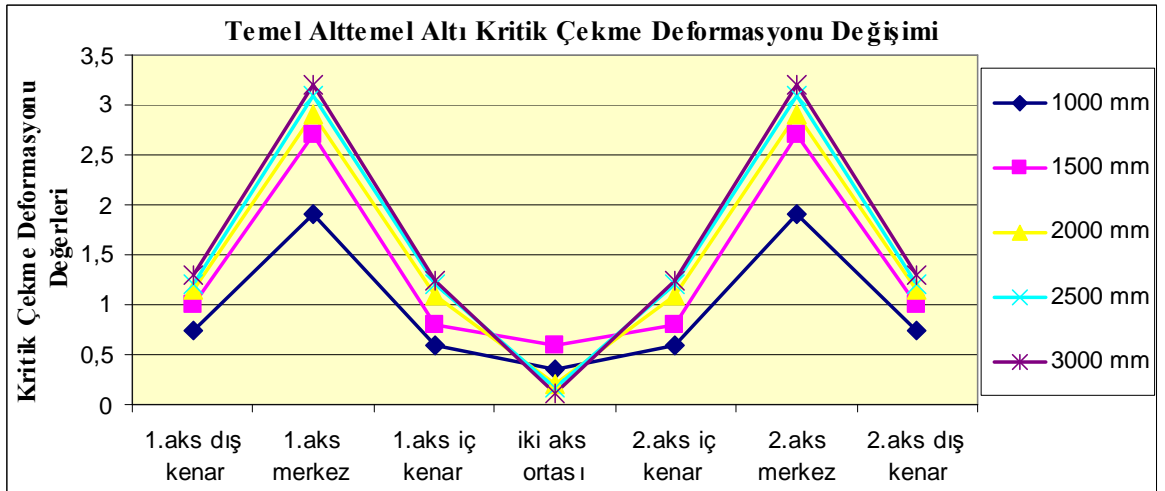
Tablo 32'de ki veriler incelendiğinde temel/alttemel tabakası altında oluşan kritik çekme deformasyonu değerleri, aks dış kenarı ile aks merkezinde mesafenin 1000 mm'den 3000 mm'ye çıkması durumunda kritik çekme değerini %70 oranında arttığı görülmüştür.

Aks iç kenarında ise yaklaşık %104 oranında artmıştır. Aks ortasında ise 1000 mm ile 1500 mm arasında kritik çekme değerinde %70 oranında artış, 1500 mm ile 3000 mm arasında ise %82 oranında düşüş gözlemlenmiştir.

Tablo 32. Aks ara mesafesi değişimine bağlı temel/alttemel tabakası altında sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen sayısal kritik çekme deformasyonu değerleri

Temel/Alttemel Altı Kritik Çekme Deformasyonu Değerleri							
Aks Ara Mesafesi	1.aks dış kenar	1.aks merkez	1.aks iç kenar	iki aks ortası	2.aks iç kenar	2.aks merkez	2.aks dış kenar
1000 mm	0.75	1.9	0.6	0.35	0.6	1.9	0.75
1500 mm	1	2.7	0.8	0.6	0.8	2.7	1
2000 mm	1.15	2.9	1.1	0.2	1.1	2.9	1.15
2500 mm	1.2	3.1	1.2	0.17	1.2	3.1	1.2
3000 mm	1.3	3.2	1.25	0.11	1.25	3.2	1.3

(+) : Çekme, (-) : Basınç



Şekil 44. Aks ara mesafesine bağlı temel/alttemel tabakası altında meydana gelen kritik çekme deformasyonu değişimi

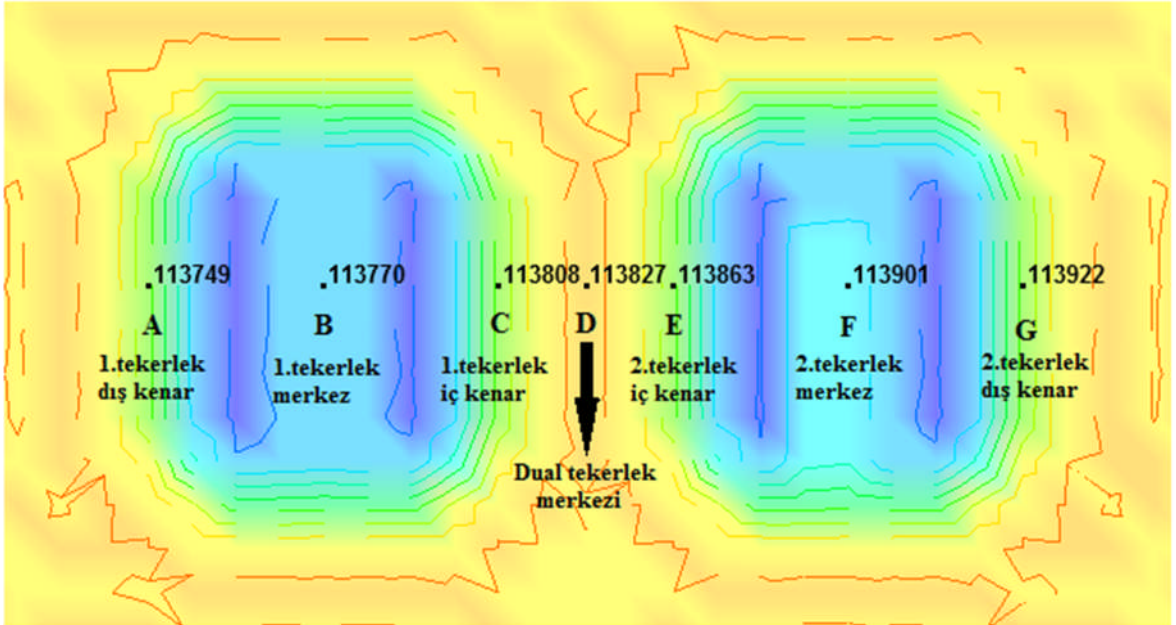
3.3. Dual Tekerlek Lastikleri Ara Mesafesi Değişimine Bağlı Gerilme-Deformasyon Analizi

Dual tekerlek yukarıda yapılan analizlerden (STDY) görüldüğü üzere eşit şartlarda diğer lastik konfigürasyonlarına göre, yol açısından en emniyetli lastiktir. Bundan dolayı

dual tekerleğin yol tabakaları üzerindeki etkilerini ayrıca incelemek istedik. Dual tekerlek lastikleri ara mesafesi değişimine bağlı olarak düşey gerilme-deformasyonu (tekerlek izi) ve kritik çekme deformasyonlarındaki (yorulma çatlakları) değişimler incelendi.

3.3.1. Düşey Gerilme Değişimi

Dual tekerlek ara mesafesine bağlı asfalt kaplama üstünde oluşan düşey gerilme değerleri Tablo 33'te verilmiştir. Dual tekerlek için gerilme değerleri ölçülen noktalar Şekil 45'te verilmiştir. Bu noktalar tekerlek kenarları (A, C, E, G) ve merkezleri (B, F) ile dual tekerlek merkezi (D) baz alınarak belirlenmiştir. Tablo 33'e ve Şekil 46'ya bakıldığında, kaplama üstünde 50 mm'lik ara mesafeye sahip dual tekerleğin altında oluşan temas alanının tümünde basınç gerilmesi meydana geldiği görülmektedir. Diğer dual tekerlek tiplerinde ise (100 mm, 150 mm, 200 mm), iki tekerlek ara mesafenin (C-E arası) artmasıyla D noktasında çekme gerilmesi meydana geldiği görülmektedir. En büyük çekme gerilmesi, standart dual tekerlek ara mesafesi olan 100 mm'de meydana geldi. Dual tekerlek ara mesafesinin artmasıyla bu değer düşüğü görüldü.



Şekil 45. Dual tekerlek analizinde yatay ve düşey mesafede değerleri ölçülen noktalar

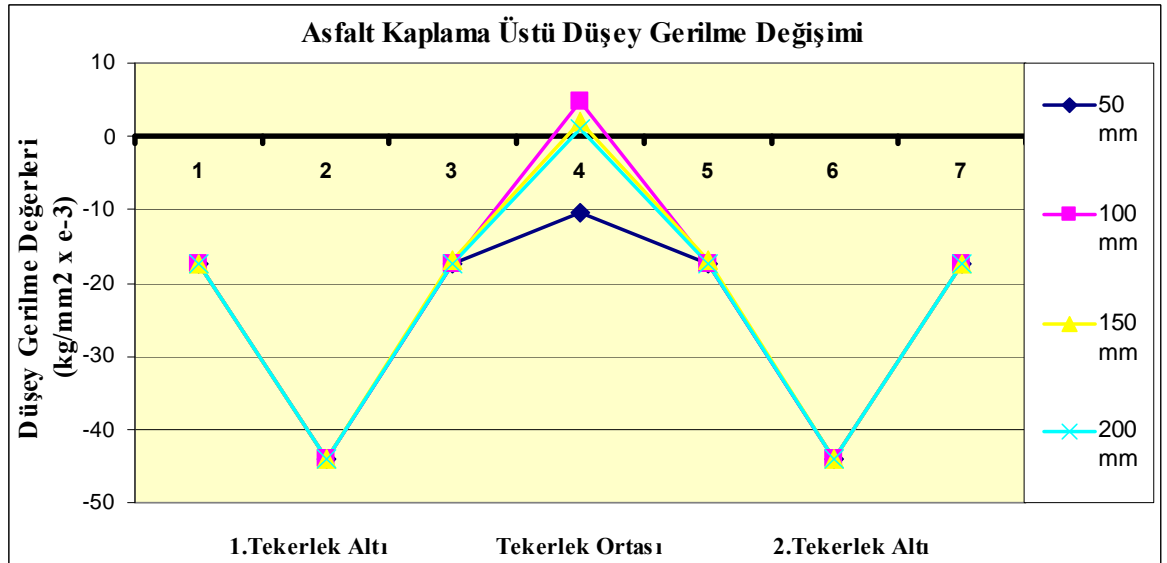
Tablo 33'te görüldüğü üzere dual tekerlek ara mesafesi değişimine bağlı olarak, dual tekerlek lastikleri merkez ve kenarları düşey gerilme değerlerinde değişim gözlenmemektedir. Fakat dual tekerlek merkezinde 50 mm'de düşey gerilme basınç iken, 100 mm'de çekme durumuna geçmiştir. 100-150 mm ve 150-200 mm arasında ise bu çekme değerinde ortalama %50 oranında düşüş görülmektedir.

Tablo 33. Dual tekerlek ara mesafesine bağlı asfalt kaplama tabakası üstünde sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen sayısal düşey gerilme değerleri

Asfalt Kaplama Tabakası Üstü Düşey Gerilme Değerleri ($\text{kg}/\text{mm}^2 \times 10^{-3}$)							
Lastik Ara Mesafesi	1.tekerlek dış kenarı	1.tekerlek merkezi	1.tekerlek iç kenarı	Dual tek. merkezi	2.tekerlek iç kenarı	2.tekerlek merkezi	2.tekerlek dış kenarı
50 mm	-17.5	-44	-17.5	-10.5	-17.5	-44	-17.5
100 mm	-17.5	-44	-17.5	4.8	-17.5	-44	-17.5
150 mm	-17.5	-44	-17	2	-17	-44	-17.5
200 mm	-17.5	-44	-17.5	1.1	-17.5	-44	-17.5

D noktasındaki değerler, diğer noktadaki değerlerden farklı olarak e-4 kuvvetinde alınmıştır.

(+) : Çekme, (-) : Basınç



(+) : Çekme, (-) : Basınç

Şekil 46. Dual tekerlek altında asfalt kaplama tabakası üstünde meydana gelen düşey gerilme değerleri değişimi

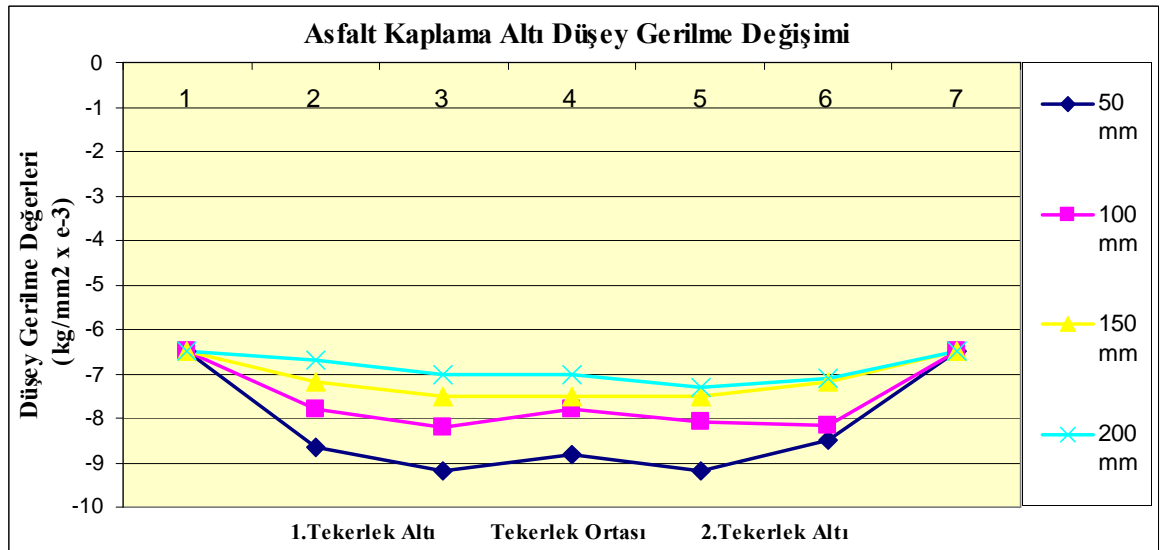
Asfalt kaplama tabakası altında meydana gelen düşey basınç gerilmesi, Şekil 47'de ve Tablo 34'te görüldüğü üzere dual tekerlek ara mesafesinin (C-E arası) artmasına bağlı olarak azalmıştır. Tekerlek merkezi, iç kenarı ve dual tekerlek merkezinde meydana gelen

düşey basınç gerilmesi, dual tekerlek ara mesafesinin 50 mm'den 200 mm'ye çıkmasıyla yaklaşık olarak %20-23 oranında düştüğü görülmüştür. Dual tekerlek ara mesafesinin artmasıyla tekerlek izi hasarı oluşumu da %20-23 oranında düştüğü hesaplanmıştır. Dual tekerlek ara mesafesinin artmasıyla düşey basınç gerilmesindeki azalma nedeni, tekerleklerin birbiri üzerindeki etki alanlarının tekerlek ara mesafesiyle düşmesidir (Huang, 2004). Kaplama altında meydana gelen düşey basınç gerilmesi ile temel/alttemel tabakası üstünde meydana gelen düşey basınç gerilmesi davranışları aynı olduğundan, ayrıca temel/alttemel tabakası üstü düşey basınç gerilmesi değerleri tablolatırılmadı. Taban zemini üstünde meydana gelen düşey basınç gerilmeleri ile temel/alttemel tabakası altında meydana gelen değerlerde aynı olduğundan, bu değerlerde tablolatırılmadı.

Tablo 34. Dual tekerlek ara mesafesine bağlı asfalt kaplama tabakası altında sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen sayısal düşey gerilme değerleri

Asfalt Kaplama Tabakası Altı Düşey Gerilme Değerleri ($\text{kg/mm}^2 \times 10^{-3}$)							
Lastik Ara Mesafesi	1.tekerlek dış kenarı	1.tekerlek merkezi	1.tekerlek iç kenarı	Dual tek. merkezi	2.tekerlek iç kenarı	2.tekerlek merkezi	2.tekerlek dış kenarı
50 mm	-6.5	-8.65	-9.2	-8.8	-9.2	-8.5	-6.5
100 mm	-6.5	-7.8	-8.2	-7.8	-8.1	-8.15	-6.5
150 mm	-6.5	-7.2	-7.5	-7.5	-7.5	-7.2	-6.5
200 mm	-6.5	-6.7	-7	-7	-7.3	-7.1	-6.5

(+) : Çekme, (-) : Basınç



(+) : Çekme, (-) : Basınç

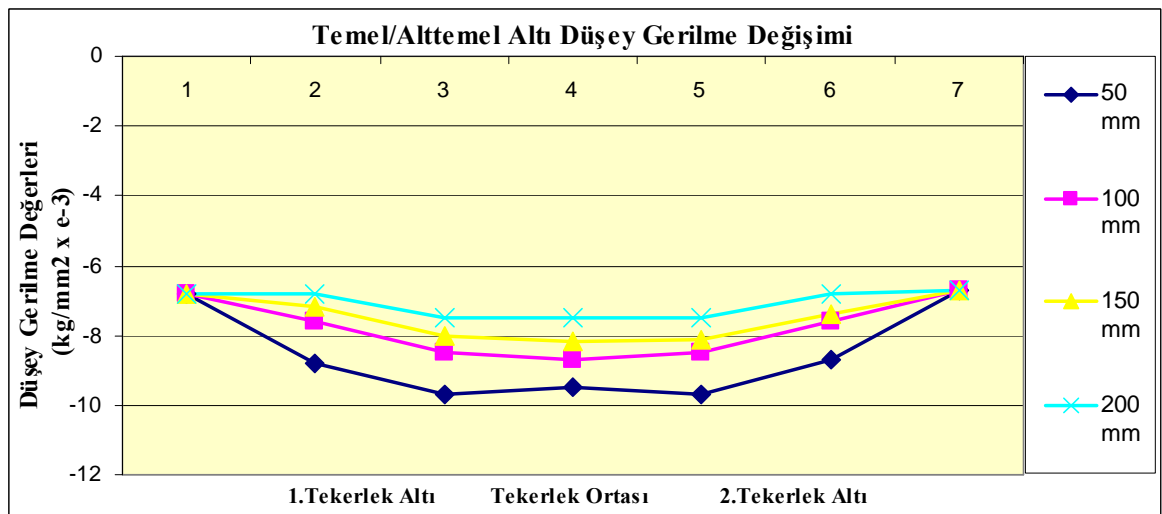
Şekil 47. Dual tekerlek yükünden dolayı asfalt kaplama tabakası altında meydana gelen düşey gerilme değerleri değişimi

Temel/alttemel tabakası altında meydana gelen düşey basınç değerleri, asfalt kaplama tabakası altında olduğu gibi dual tekerlek ara mesafesinin (C-E arası) artmasına bağlı olarak azalmıştır. Bu azalma asfalt kaplama tabakası altında olduğu gibi %20-23 oranındadır. Wu (2001) dual tekerlek üzerine yaptığı çalışmada dual tekerlek ara mesafesinin azalmasına bağlı yolda oluşan tekerlek izi hasarının da azaldığını savunmaktadır. Fakat yapılan bu çalışmada; Tablo 33, 34, 35'te ve Şekil 46, 47, 48'de verilen sonlu elemanlar analizi sonuçlarına göre, dual tekerlek ara mesafesinin artmasıyla, dual tekerlek merkezinde ve tekerlek merkezleri ile iç kenarlarda meydana gelen düşey basınç gerilmesinin azaldığı görülmektedir (Huang, 2004). Düşey basınç gerilmesinin düşmesine bağlı olarak yol tabakalarında meydana gelen tekerlek izi hasarı da azalacaktır.

Tablo 35. Dual tekerlek ara mesafesine bağlı temel/alttemel tabakası altında sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen sayısal düşey gerilme değerleri

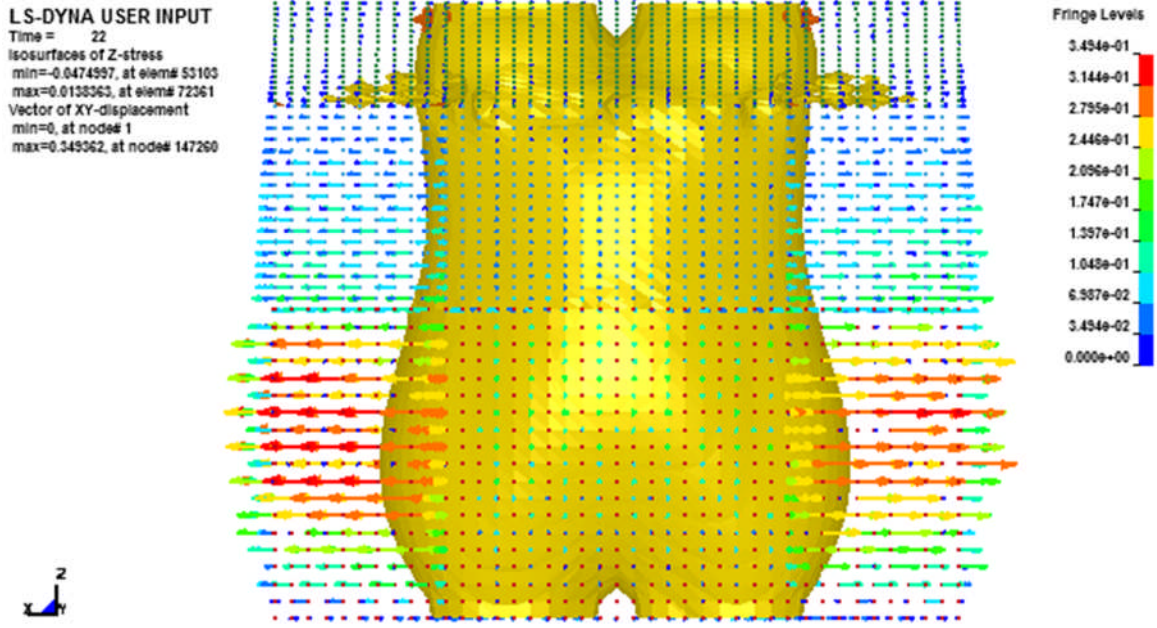
Temel/Alttemel Tabakası Altı Düşey Gerilme Değerleri ($\text{kg/mm}^2 \times 10^{-3}$)							
Lastik Ara Mesafesi	1.tekerlek dış kenarı	1.tekerlek merkezi	1.tekerlek iç kenarı	Dual tek. merkezi	2.tekerlek iç kenarı	2.tekerlek merkezi	2.tekerlek dış kenarı
50 mm	-6.8	-8.8	-9.7	-9.5	-9.7	-8.7	-6.7
100 mm	-6.8	-7.6	-8.5	-8.7	-8.5	-7.6	-6.7
150 mm	-6.8	-7.2	-8	-8.2	-8.1	-7.4	-6.7
200 mm	-6.8	-6.8	-7.5	-7.5	-7.5	-6.8	-6.7

(+) : Çekme, (-) : Basınç



(+) : Çekme, (-) : Basınç

Şekil 48. Dual tekerlek yükünden dolayı temel/alttemel tabakası altında meydana gelen düşey gerilme değerleri değişimi



Şekil 49. Düşey gerilmeler sonucu yol tabakalarında oluşan yanal deplasmanların yönü

Şekil 49’da düşey gerilmeler sonucu asfalt tabakalarında oluşan deplasmanların yönü görülmektedir. En yoğun yer değiştirmelerin görüldüğü tabaka taban zemindir. Çünkü taban zemini malzeme olarak diğer yol tabakalarına göre daha zayıftır.

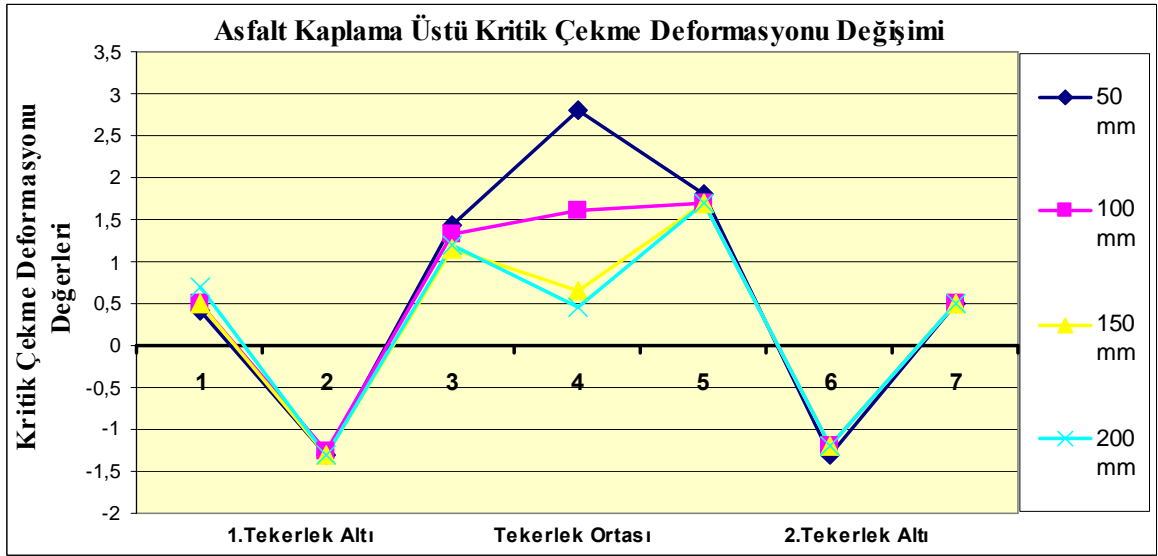
3.3.2. Kritik Çekme Deformasyonu Değişimi

Kaplama üstünde meydana gelen kritik çekme deformasyonu değerleri açısından en büyük değerlerler, Şekil 50’de verildiği üzere sırasıyla; 50 mm, 100 mm, 150 mm ve 200 mm’lik ara mesafeye sahip dual tekerlekler altında meydana geldiği tespit edilmiştir. Yani dual tekerlek ara mesafesi arttıkça kaplama üstünde yorulma çatlaklarına neden olan kritik çekme deformasyonları değerleri, Tablo 36’da görüldüğü üzere dual tekerlek lastikleri merkezinde ve tekerlek iç kenarlarında azalmaktadır. Dual tekerlek merkezinde, ara mesafenin 50 mm’den 200 mm’ye çıkmasıyla kritik çekme deformasyonu değerinde %84 oranında azalma olmaktadır.

Tablo 36. Asfalt kaplama tabakası üstünde sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen sayısal kritik çekme deformasyonu değerleri

Asfalt Kaplama Tabakası Üstü Kritik Çekme Deformasyonu Değerleri							
Lastik Ara Mesafesi	1.tekerlek dış kenarı	1.tekerlek merkezi	1.tekerlek iç kenarı	Dual tek. merkezi	2.tekerlek iç kenarı	2.tekerlek merkezi	2.tekerlek dış kenarı
50 mm	0.42	-1.3	1.43	2.8	1.8	-1.3	0.5
100 mm	0.5	-1.25	1.32	1.6	1.7	-1.2	0.5
150 mm	0.5	-1.3	1.15	0.66	1.7	-1.2	0.5
200 mm	0.7	-1.3	1.2	0.45	1.7	-1.2	0.5

(+) : Çekme, (-) : Basınç



Şekil 50. Dual tekerlek altında asfalt kaplama tabakası üstünde meydana gelen kritik çekme deformasyonu değişimi

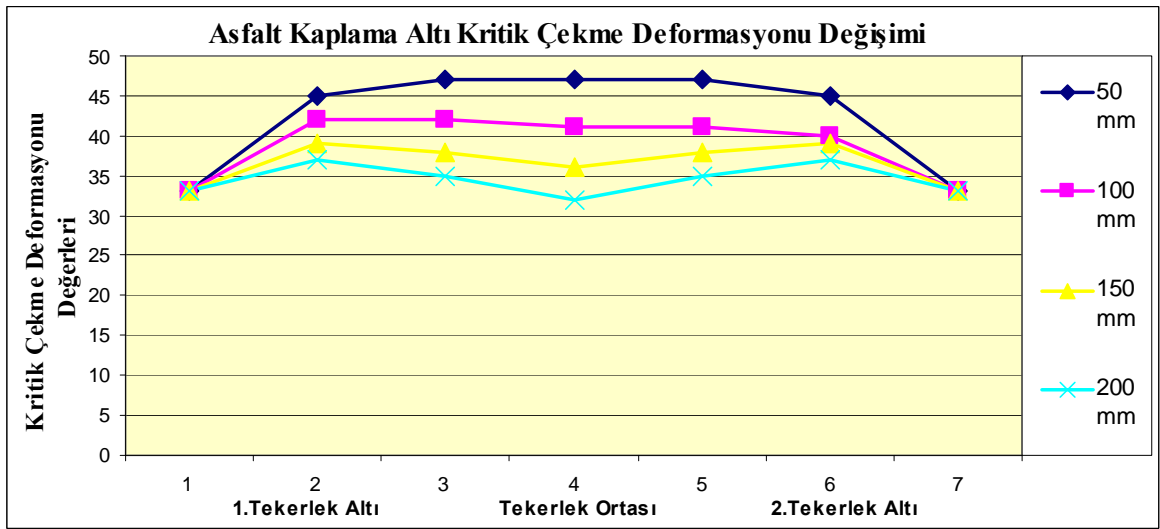
Kaplama altında oluşan kritik çekme deformasyonları değişimi, kaplama üstünde meydana gelen değişimlere benzerlik göstermektedir. Şekil 51'e ve Tablo 37'ye bakıldığında dual tekerlek ara mesafesinin artmasına bağlı kritik çekme deformasyonu değerleri azalmaktadır. Mesafenin artmasıyla dual tekerlek merkezinde meydana gelen kritik çekme deformasyonundaki azalma % 32 oranındadır. Bu durum temel/alttemel tabakası üstünde meydana gelen kritik çekme deformasyonları açısından da aynıdır.

Yol tabakaları içinde en büyük kritik çekme deformasyonu değerleri asfalt kaplama tabakası altında oluşmaktadır (Tablo 36, 37, 38). Asfalt kaplama tabakasında meydana gelen yorulma çatlaklarının temel sebebi, asfalt kaplama tabakası altında oluşan kritik çekme deformasyonudur (Huang, 2004).

Tablo 37. Asfalt kaplama tabakası altında sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen sayısal kritik çekme deformasyonu değerleri

Asfalt Kaplama Tabakası Altı Kritik Çekme Deformasyonu Değerleri							
Lastik Ara Mesafesi	1.tekerlek dış kenarı	1.tekerlek merkezi	1.tekerlek iç kenarı	Dual tek. merkezi	2.tekerlek iç kenarı	2.tekerlek merkezi	2.tekerlek dış kenarı
50 mm	33	45	47	47	47	45	33
100 mm	33	42	42	41	41	40	33
150 mm	33	39	38	36	38	39	33
200 mm	33	37	35	32	35	37	33

(+) : Çekme, (-) : Basınç



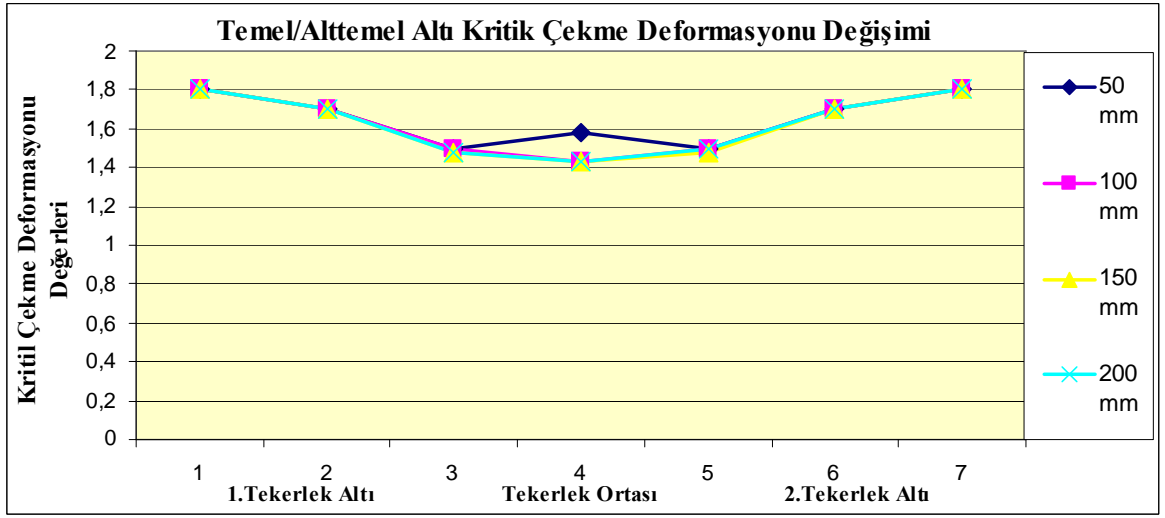
Şekil 51. Dual tekerlek yükünden dolayı asfalt kaplama tabakası altında meydana gelen kritik çekme deformasyonu değişimi

Şekil 52'de ve Tablo 38'de görüldüğü üzere temel/alttemel tabakası altında meydana gelen kritik çekme deformasyonları davranışı yönüyle 50 mm ara mesafeye sahip dual tekerlek hariç diğer 100 mm, 150 mm ve 200 mm ara mesafeye sahip dual tekerlekler aynı davranışları sergilemektedir. 50 mm ara mesafeye sahip dual tekerlek diğerlerine göre daha büyük çekme deformasyonlarına neden olmaktadır. Temel/alttemel tabakası altında meydana gelen kritik çekme deformasyonları değerleri yol için tehlike arz etmeyecek kadar küçüktür. Temel/alttemel tabakası altında oluşan kritik çekme deformasyonları değerleri ile taban zemini tabakası üzerinde meydana gelen kritik çekme deformasyonu değerleri aynıdır (Huang, 2004).

Tablo 38. Temel/alttemel tabakası altında sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen sayısal kritik çekme deformasyonu değerleri

Temel/Alttemel Tabakası Altı Kritik Çekme Deformasyonu Değerleri							
Lastik Ara Mesafesi	1.tekerlek dış kenarı	1.tekerlek merkezi	1.tekerlek iç kenarı	Dual tek. merkezi	2.tekerlek iç kenarı	2.tekerlek merkezi	2.tekerlek dış kenarı
50 mm	1.8	1.7	1.5	1.58	1.5	1.7	1.8
100 mm	1.8	1.7	1.5	1.43	1.5	1.7	1.8
150 mm	1.8	1.7	1.48	1.43	1.48	1.7	1.8
200 mm	1.8	1.7	1.48	1.43	1.5	1.7	1.8

(+) : Çekme, (-) : Basınç



Şekil 52. Dual tekerlek yükünden dolayı temel/alttemel tabakası altında oluşan kritik çekme deformasyonu değişimi

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada araziden alınan veriler ile AASHTO verilerinin sonlu elemanlar metodu ile analizinden elde edilen sonuçları aşağıda verilmiştir.

1. Arazi Tekerlek Konfigürasyon Değerlerine Göre:

- Tekerlek tipi ve temas alanına bağlı olarak yatay doğrultuda oluşan radyal ve teğetsel gerilmelerin büyüklükleri değişmektedir.
- Asfalt kaplama tabakası üstünde en büyük düşey basınç gerilmesi tek tekerlek altında meydana gelmekte ve diğer tekerlek tiplerine göre %30 daha fazla tekerlek izi hasarı oluşturmakta ve bu oranda yol ömrünü kısaltmaktadır.
- Yeni geniş tek tekerlek diğer tekerleklere göre ortalama %24 daha fazla kayma gerilmesi ve kayma gerilmesine bağlı tekerlek izi hasarı oluşturduğu hesaplanmıştır.
- Yeni geniş tek tekerlek diğer tekerlek tiplerine göre ortalama %13 daha fazla kritik çekme deformasyonuna neden olmakta ve buna bağlı olarak asfalt ömrü boyunca % 64 daha fazla yorulma çatlama nedeni olduğu ve bu oranda asfalt ömrünü kısalttığı hesaplanmıştır.

2. AASHTO Tek Dingil Yüğü Verileri Tekerlek Analizine Göre:

- Yatay doğrultuda oluşan gerilme büyüklükleri açısından, arazi verilerine benzer sonuçlar elde edilmiştir.
- Tek tekerlek diğer tekerleklere göre ortalama %41 daha fazla düşey basınç gerilmesi ve tekerlek izi hasarına neden olmakta ve buna bağlı olarak yol ömrünü aynı oranda kısaltmaktadır.
- Tek tekerlek diğer tekerleklere göre ortalama %19 daha fazla kayma gerilmesi ve kayma gerilmesine bağlı tekerlek izi hasarı oluşturduğu hesaplanmıştır.
- Tek tekerlek diğer tekerleklere göre asfalt kaplama tabakası altında ortalama %22 daha fazla kritik çekme deformasyonu oluşturmakta ve yol ömrü boyunca 2.5 kat (%250) daha fazla yorulma çatlama oluşumuna ve yol ömrünün kısılmasına neden olduğu hesaplanmıştır.

3. Arazi Dingil Verilerine Göre:

- Çekici tek dingil diğer dingillere göre yol tabakalarında ortalama %25 daha fazla düşey basınç gerilmesi ve tekerlek izi hasarı oluşturduğu hesaplanmıştır.
- Çekici tek dingil diğer dingillere göre asfalt kaplama tabakası altında ortalama %17 daha fazla kritik çekme deformasyonuna neden olmaktadır.

4. İki Aks Merkezi Ara Mesafesi Değişimine Bağlı Oluşan Gerilme-Deformasyon Analizine Göre:

- Aks ara mesafesinin 1000 mm'den 3000 mm'ye çıkması durumunda düşey basınç gerilmesi ve tekerlek izi hasarında %45 oranında azalma meydana geleceği hesaplanmıştır.
- Minimum düşey basınç gerilmeleri 1500 mm ara mesafesinde gerçekleştiği tespit edilmiştir.
- Asfalt kaplama tabakası üstünde ve altında aks merkezleri ara mesafesinin 1000 mm'den 3000 mm'ye çıkması sonucu, kritik çekme deformasyonunda %86 oranında azalma tespit edilmiştir.
- Asfalt üstünde dingiller arasında meydana gelen kritik çekme deformasyonu değeri asfalt kaplama tabakası üstünde yorulma çatlaklarına neden olan önemli bir faktördür.

5. Dual Tekerlek Lastikleri Ara Mesafesi Değişimine Bağlı Oluşan Gerilme-Deformasyon Analizine Göre:

- Asfalt kaplama tabakası üstünde meydana gelen düşey gerilme, 50 mm'de basınç iken 50-100 mm arasında çekme durumuna geçmektedir. 100 mm ile 200 mm'de mesafenin artmasıyla bu çekme değerinde %77 oranında düşme tespit edilmiştir.
- Dual tekerlek ara mesafesinin 50 mm'den 200 mm'ye çıkması durumunda asfalt kaplama tabakası üstünde oluşan kritik çekme deformasyonu değeri %84, asfalt kaplama tabakası altında oluşan kritik çekme deformasyonu değeri ise %32 oranında düşmektedir.

5. KAYNAKLAR

- AASHTO, 1972. AASHTO Interim Guide for Design of Pavements Structures, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC.
- AASHTO, 1986. AASHTO Guide for Design of Pavements Structures, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC.
- AASHTO, 1993. AASHTO Guide for Design of Pavement Structures. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.
- Akpınar, M.V., 2010. "Hızlandırılmış Yol Testi (Accelerated Pavement Testing)", Hazır Beton, THBB, 97, 63-65.
- Akpınar, M.V., 2008. Effects of Truck Load Position on Longitudinal Joint Deterioration", Indian Journal of Engineering Materials Science, IJEMS, 15, 41-50.
- Al-Qadi, I.L., and Wang, H., 2009. Evaluation of Pavement Damage Due to New Tire Designs. Research Report ICT-09-048, Illinois Center for Transportation, Illinois Center for Transportation Series No. 09-048, UILU-ENG-2009-2019, ISSN: 0197-9191, Urbana, USA.
- Al-Qadi, I.L., and Wang, H., 2008. Full-depth Flexible Pavement Fatigue Response under Various Tire and Axle Load Configurations. Center for Transportation, Illinois Center for Transportation, Conference Topic Selected: Modeling and analysis of pavement systems, ICT-R59, Urbana, USA.
- Al-Qadi, I. L., Elseifi, M., and Yoo, P. J., 2004. Pavement Damage Due To Different Tires And Vehicle Configurations. Final Report, Submitted To: Michelin Americas Research and Development Corporation, 515 Michelin Road, Po Box 1987, Greenville, Sc 29602-1987. Virginia Tech Transportation Institute, Blacksburg, USA.
- Ali, O., 2005. Evaluation of the Mechanistic Empirical Pavement Design Guide (NCHRP 1-37A). Report No: UR 3002.1, Contract No: Research Report 216, Program: Urban Infrastructure. National Research Council Canada.
- ARA, Inc., Eres Division, (2004), Development of the 2002 Guide for the Design of New and Rehabilitated Pavements, NCHRP 1-37A, Transportation Research Board, Washington, DC.
- Archilla, A.R., and Madanat, S., 2000. Development of a Pavement Rutting Model from Experimental Data, 79th Annual TRB Meeting – Preprint CD-ROM, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C.

- Brown, S.F., and Cooper, K.E., 1984. The Mechanical Properties of Bituminous Materials for Road Bases and Basecourses, *Asphalt Paving Technology, Proc., Association of Asphalt Paving Technologists, Volume 53.*
- Baburamani, P., 1999. Asphalt Fatigue Life Prediction Models – A Literature Review, ARRB Transport Research Ltd, Research Report ARR 334, Vermont South, Victoria.
- Carvalho, R.L., 2006. Mechanistic-Empirical Design of Flexible Pavements: A Sensitivity Study. Master of Science Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Maryland.
- Claussen, A. I. M., Edwards, J. M., Sommer, P., and Udge, P., 1977. "Asphalt Pavement Design - The Shell Method," *Proceedings of the 4th International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, 39-74.*
- Cleveland, G.S., Buton, J.W., and Lytton, R.L., 2002. Geosynthetics in Flexible and Rigid Pavement Overlay Systems to Reduce Reflection Cracking, Report No: FHWA/TX-02/1777-1, Texas Transportation Institute The Texas A&M University System College Station, Texas 77843-3135.
- Douglas, R.A., Alabaster, B., and Charters, N., 2008. Measured Tire/Road Contact Stresses Characterized by Tire Type, Wheel Load, and Inflation Pressure. Introducing Innovation into Pavement Design and Rehabilitation, 2008 Annual Conference of the Transportation Association of Ontario, Toronto, Canada.
- D.P.T., 1992. Karayolu Ulaştırması Özel İhtisas Komisyonu Raporu, Devlet Planlama Teşkilatı Yayın No, DPT : 2306 – Ö.İ.K : 413, Başbakanlık Basımevi, Ankara.
- FHWA, (2006). US Department of Transportation Federal Highways Administration Web Site, Office of Highway Policy Information, Highway Statistics, USA.
- Fernandes, J.L., Pais, J.C. and Pereira, P.A.A., 2005. Effects of traffic loading on Portuguese and Brazilian Pavements Performance. Paper Prepared for Presentation and Publication at The 85th Annual Meeting in January 22-26, 2006 of The T.R.B., Washington, D.C.
- Freeme, C.R. and Strauss, J.A., 1979. Towards The Structural Design of More Economical Pavement in South Africa. *Proceeding of The Third Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa, Durban, South Africa.*
- Gerritsen, A.H., and Koole, R.C., 1987. Seven Years' Experience with The Structural Aspect of The Shell Pavement Design Manual. *Proceedings Sixth International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements, Ann Arbor, Michigan, Vol. 1, pp. 94-106.*
- Greene, J., Toros, U., Kim, S., Byron, T., and Choubane, B., 2009. Impact of Wide Base Single Tires on Pavement Damage. Research Report, FL/DOT/SMO/09-528, Florida/USA.

- Heukelom, W. and Klomp, A.J.G., 1964. Road Design and Dynamic Loading. Proceeding and Association of Asphalt Paving Technologists, 92-123.
- Huang, Y.H., 2004. Pavement Analysis and Design, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 07632.
- Hughes, C.S., and Maupin Jr, G.W., 1987. Experimental Bituminous Mixes to Minimize Pavement Rutting, Asphalt Paving Technology, Proc. Association of Asphalt Paving Technologist, Volume 56.
- Jordaan, G.J., 1994. The South African Mechanistic Pavement Rehabilitation Design Method, Department of Transport, Research Report RR91/242, Pretoria, South Africa.
- Karayolları Genel Müdürlüğü, 2006;2010. Karayolları Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi, Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı, Üstyapı Şubesi Müdürlüğü, Ankara.
- Karayolları Genel Müdürlüğü, 2010. Otoyollar ve Devlet Yollarının Trafik Dilimlerine Göre Yıllık Ortalama Günlük Trafik Değerleri ve Ulaşım Bilgileri. Strateji Geliştirme Daire Başkanlığı Ulaşım Ve Maliyet Etütleri Şubesi Müdürlüğü, Ankara.
- Kim, D., Salgado, R., and Altschaeffi, A.G., 2005. Effects of Supersingle Tire Loadings on Pavements. Journal of Transportation Engineering, Vol. 131, No. 10, ©ASCE, ISSN 0733-947X/2005/10-732-743.
- Kim, S.M., Won, M.C. and McCullough, B.F., 2001. Transformed Field Domain Analysis of Pavements Subjected to Moving Dynamic Tandem-Axle Loads and Integrating Their Effects into The Crcp-10 Program, Report No: FHWA/TX-0-1831-5, Center for Transportation Research The University of Texas at Austin, 3208 Red River, Suite 200, Austin, TX 78705-2650, USA.
- Kim, Y.R., Little, D.N. and Benson, F.C., 1990. Chemical and Mechanical Evaluation on Healing Mechanism of Asphalt Concrete. Journal of The Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 59, pp. 240-75.
- Kim, Y.R., Whitmoyer, S.L. and Little, D.N., 1994. Healing in Asphalt Concrete Pavements: Is It Real? Transportation. Research Record 1454, pp. 89-96.
- Kingham, I.R. and Kallas, B.F., 1972. Laboratory Fatigue and Its Relationship to Pavement Performance. Proceeding of 3rd International Conference on The Structural Design of Asphalt Pavements, Vol I pp 849-865, London, United Kingdom.
- Kong Kam Wa, N., Theyse, H.L., Verhaeghe, B.M.J.A., and Knottenbelt, E.C., 1997. Stiffness and Fatigue Characteristics of Some Asphalt Wearing Courses Used in South Africa. Proceedings Eighth International Conference on Asphalt Pavements, Washington, USA, 951-68.

- Koole, R.C., Valkering, C.P., and Stapel, F.D.R., 1989. Development of Pavement Design Program for Use on Personal Computer. Proceeding Fifth Conference on Asphalt Pavement in Southern Africa (CAPSA 5), Manzini, Swaziland, pp. II-33-43.
- Korkiala, L., 2008. Calculation Method for Permanent Deformation of Unbound Pavement Materials. VTT Publications, 1235-0621 (soft back ed.), 1455-0849 (URL: <http://www.vtt.fi/publications/index.jsp>), VTT Technical Research Centre of Finland, P.O. Box 1000, FI-02044 VTT, Finland.
- LS-DYNA, 2006. Theoretical Manual. Livermore Software Technology Corporation, Livermore, CA, USA.
- Monismith, C.L. and Mclean, 1972. Design Considerations for Asphalt Pavements. Report no. TE71-8, Soil Mechanics and Bituminous Laboratory, Institute of Transportation and Traffic Engineering, University of California, Berkeley, United States.
- NAPA, January 2001. National Asphalt Pavement Association Web Page, News and Information FAQ, Available at <http://www.hotmix.org/>.
- NCHRP, 2004. Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures, National Cooperative Highway Research Program, NCHRP Project 1-37A, National Research Council, Washington, DC.
- OECD, 1998. Heavy Trucks, Climate and Pavement Damage, Prepared by an OECD Scientific Experts Group, Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris, France. OECD Publications and Information Centre [distributor], Washington, D.C.
- Paterson, W.D.O., 1987. Road Deterioration and Maintenance Effects: Model for Planning and Management, The Highway Design and Maintenance Standart Series, Published for the World Bank, The John Hopkins Press, Baltimore.
- Potter, D.W., and Youdale, G.P., 1998. Review and Recommendation of Improvements to Australian Heavy Duty Flexible Pavement Design Practices. Australian Asphalt Pavement Association, Kew, Victoria.
- Salgoda, R., and Kim, D., 2002. Effects of Heavier Truck Loadings and Super-Single Tires on Subgrades. Joint Transportation Research Program Project No: C-36-52R, File No: 6-20-17, SPR-2402. Final Report: FHWA/IN/JTRP-2002/20, Purdue University, West Lafayette, Indiana.
- Sarica, R. Z., Ulker, M. B. C., Rahman, M.S., and Mirmiran. A., 2004. Traffic Control Design for Portable Concrete Barriers. Department of Civil, Construction, and Environmental Engineering, NC State University, USA.
- Sert, T., Akpınar, M.V., 2011. Analysis of Geogrid Performance on Highway Subbase with Special Designed Pullout Test, *IMO Journal*, 22, 1.

- SHRP-A-415, 1994. Permanent Deformation Response of Asphalt Aggregate Mixes, Final Report, Strategic Highway Research Program, National Research Council.
- Shook, J. F., Finn, F. N., Witzczak, M. W., and Monismith, C. L., (1982). "Thickness Design of Asphalt Pavements - The Asphalt Institute Method," Proceedings of the 5th International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, pp. 17-44.
- Shoukry, S. N., William, G. W., and Riad, M., (2007). Application of LS-DYNA in Identifying Critical Stresses Around Dowel Bars. 8th International LS-DYNA Users Conference, West Virginia University, Morgantown, WV 26506-6103, USA.
- Shoukry, S. N., William, G. W., and Riad, M., (2008). Application of Dynamic Relaxation in Thermo-Elastic Structural Analysis of Highway Pavement Structures. 9th International LS-DYNA Users Conference, West Virginia University, Morgantown, WV 26506-6103, USA.
- Sousa, J.B., Craus, J., and Monismith, C.L., 1991. Summary Report on Permanent Deformation in Asphalt Concrete. Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, D.C., U.S.A.
- Su, K., Sun, L., Hachiya, Y., and Maekawa, R., 2008. Analysis Of Shear Stress In Asphalt Pavements Under Actual Measured Tire-Pavement Contact Pressure. 6th ICPT, Sapporo, Japan.
- Tayebali, A.A., Deacon, J.A., Coplantz, J.S., and Monismith, C.L., 1993. Modeling Fatigue Response of Asphalt-Aggregate Mixtures. Journal of The Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 63 pp. 385-421.
- Theyse, H.L., de Beer, M. and Rust, F.C., 1996. Overview of The South African Mechanistic Pavement Design Analysis Method, Divisional Publication, DP 96/005, Trasportek, CSIR, Pretoria, South Africa.
- Tunç, A., 2001. Yol Malzemeleri Ve Uygulamaları, Atlas Yayınevi, İstanbul.
- Tunç, A., 2004. Kaplama Mühendisliği ve Uygulamaları, Asil Yayın Dağıtım, ISBN: 975-8784-22-6, Ankara.
- Uddin, W., and Ricalde, L., 2006. Implementation of a User Material Routine in 3D-FE Codes for Viscoelastic Modeling and Simulation of Highway and Airport Pavements. Department of Civil Engineering, The University of Mississippi, Mississippi, USA.
- Uddin, W., 2001. Simulation of Falling Weight deflectometer for In-Situ Material Characterization of Highway and Airport Pavements. Department of Civil Engineering, The University of Mississippi, Mississippi 38677, USA.

- Uddin, W., 2002. Application of Finite Element Dynamic Analysis for In Situ Material Characterization of Pavement Systems. Fifth International Conference on The Bearing Capacity of Roads and Airfields. Department of Civil Engineering, The University of Mississippi, Mississippi 38677, USA.
- URL-1, http://epdfiles.engr.wisc.edu/pdf_web_files/tic/bulletins/Bltn_01.pdf, How Vehicle Loads Affect Pavement Performance, Wisconsin Transportation Bulletin, Transportation Information Center, UW-Medison, Department of Engineering Professional Development, 432 N. Lake Street, Medison, USA,14,06,2010.
- URL-2, <http://www.mevzuat.gov.tr/Metin.Aspx?MevzuatKod=7.5.8182&MevzuatIliski=0&sourceXmlSearch=Karayolları trafik yönetmeliği>, 02,10,2010.
- Walubita, L.F., and F C van de Ven, M., 17 – 20 July 2000. Stresses and Strains in Asphalt-Surfacing Pavements. South African Transport Conference, ‘Action in Transport for the New Millennium’, South Africa.
- Wu, Z., 2001. Finite Element Simulation of Rutting on Superpave Pavements, Thesis of Doctor of Philosophy, Kansas State University, Department of Civil engineering, Manhattan, Kansas.
- Xie, S., and Zheng, C., October, 2003. Effects of The Tire-Pavement Contact Pressure on Asphalt Pavement, Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol.4, China.
- Ziari, H. and Khabiri, M.M., 2007. Interface Condition Influence on Prediction of Flexible Pavement Life, Journal Of Civil Engineering And Management, Vol. XIII, No 1, 71–76.

6. EKLER

Ek Tablo 1. Dingil ağırlığı ve başlangıç-son etüdü, Form A (Van Karayolları 11.Bölge Müdürlüğü)

DİNGİL AĞIRLIĞI ve BAŞLANGIÇ - SON ETÜDÜ																
FORM A																
Etüt Adı ve İstasyon Tanımı : S011109											Tarih : 30/09/2009					
K.K.No ve Yön : 300 - 33 - Tatvan - Gevaş											Başlangıç Saati :					
Ekip :											Bitiş Saati :					
Kontrolör :											Hava Durumu : Açık					
Plaka No :	Taşıt Sınıfı	Model (yıl)	Marka	Taşıt Gövde Tipi	Boş Ağırlık (kg)	Araç Tescil Belgesine göre		Yük Cinsi	Taşıma Türü	Geldiği Yer	Gittiği Yer	Kullanılan Güzergah	Günlük Alınan Mesafe (km)	Seyahat Süresi (saat)	Giriş Yaptığı Sınır Kapısı	Çıkış Yaptığı Sınır Kapısı
						İstiap Haddi (kg/kişi)	Azami Yüklü Ağırlığı (kg)									
65 AH 433	KAMYON	2006	Ford	5	9000	25000		Yoğurt	1	Balıkesir	Van	Kütah-Afy-Kays	1790	30		
34 FM 0005	OTOBÜS	2007	Travego		16937	5472		30 Yolcu	1	Ankara	Van	Kayseri-Malaty	1234	20		
65 AB 177	OTOBÜS	2008	Travego		16937	5472		35 Yolcu	1	İstanbul	Van	Ank-Malt-Muş	1800	30		
65 NF 107	KAMYON	2006	Mercedes	2	10520	2500		Kum	1	Tatvan/Bitlis	Van	Reşadiye	140	2		
13 EA 291	KAMYON	2001	Ford	6	8000	17000		Çocuk Bezi	2	G.Antep	Van	Diyar-Bitlis	690	12		
35 AU 5849	TIR	2006	Scania	5	7150-6600	28900		Kola	1	Elazığ	Van	Bingöl-Muş	480	9		
35 AU5103	TIR	2006	Scania	5	7150-6600	28900		Kola	1	Elazığ	Van	Bingöl-Muş	480	9		
65 FA 046	KAMYON	2005	Ford	2	9500	2500		Tuğla	2	Batman	Van	Kozluk-Baykan	305	5		
65 EK 748	KAMYON	2004	Ford	2	9830	25000		Ağaç	2	Diyarbakır	Van	Silvan-Baykan	380	7		
65 FC 118	KAMYON	2005	Ford	2	9375	15625		Boş	2	Tatvan/Bitlis	Gevaş/Van	Reşadiye	146	3		
34 UL 6896	KAMYON	2006	Ford	2	9000	1600		Boş	2	Tatvan/Bitlis	Gevaş/Van	Reşadiye	146	3		
34 BD 0074	KAMYON	2008	Ford	5	9000	2500		Ayran	1	Balıkesir	Van	Afyon-Kayseri	1780	29		
72 AU 185	TIR	2009	Mercedes	4	7310-9500	32690		Yakıt	1	Batman	Van	Kozluk-Baykan	390	7		
75 DP 646	TIR	2008	Ford	4	6200-7310	28200		Yakıt	1	Batman	Van	Kozluk-Baykan	390	7		
01 VM 126	KAMYON	2008	Ford	5	12000	20000		Maya	1	Adana	Van	Antep-Diyar-Bitl	896	15		
34 US 3676	OTOBÜS	2009	Travego		16937	5472		20 Yolcu	1	Mersin	Van	Antep-Diyar-Bitl	1000	17		
49 AC 702	KAMYON	2009	Ford	1	9000	25000		Alçı	2	Batman	Van	Kozluk-Baykan	380	6		
65 EA 557	KAMYON	2005	BMC	1	9760		25000	Boş	2	Tatvan/Bitlis	Gevaş/Van	Reşadiye	147	3		
70 EH 117	KAMYON	2001	Mercedes	5	10400	2900		Bisküvi	1	Konya	Van	Kayseri-Malaty	1220	20		
41 R 3170	KAMYON	2005	Mercedes	6	7050	23100		Lastik	1	Kocaeli	Van	Ank-Malt-Muş	1490	25		
35 AU 5871	TIR	2006	Scania	6	6600	7150	28900	Lastik	1	İzmir	Van	Afy-Aks-Malat.	1762	30		
13 AZ 683	KAMYON	2006	Ford	1	10480	21520		Un	2	G.Antep	Van	Diyar-Bitlis	690	12		
13 AV 806	KAMYON	2007	Ford	1	9000	25000		Boş	2	Tatvan/Bitlis	Gevaş/Van	Reşadiye	145	3		
55 K 4102	TIR	2005	Mercedes	6	7800-6500	27700		Yatak	1	Kayseri	Başkale/Van	Malatya-Muş	1014	17		
01 GL 950	KAMYON	2006	Ford	1	9420	15580		Sebze	1	Adana	Van	Antep-Diyar-Bitl	900	15		
65 AU 665	OTOBÜS	2007	Travego		16937	5472		25 Yolcu	1	Ankara	Van	Kayseri-Malaty	1235	21		
06 FSA 51	KAMYON	2008	BMC	6	10480	32000		Kitap	1	Ankara	Van	Kayseri-Malaty	1233	20		
13 DA 161	KAMYON	2001	Ford	1	8480	16520		Sebze	1	Adana	Van	Antep-Diyar-Bitl	890	14		
06 EU 3944	KAMYON	2009	Ford	1	9650	25000		Boş	2	Tatvan/Bitlis	Gevaş/Van	Reşadiye	147	3		
34 YPP 89	OTOBÜS	2008	Setra		15400	5472		25 Yolcu	1	Kayseri	Van	Malatya-Muş	1000	17		
65 FA 050	KAMYON	2006	Ford	4	8480	16520		Su	2	Balaban/Van	Gevaş/Van	Gevaş	80	1		
30 AK 532	KAMYON	2003	Mercedes	1	7180	25000		Sebze	2	Adana	Hakkari	Antep-Diyar-Bitl	900	15		

Ek Tablo 1. Dingil ağırlığı ve başlangıç-son etüdü, Form A (Van Karayolları 11.Bölge Müdürlüğü) (devamı)

DİNGİL AĞIRLIĞI ve BAŞLANGIÇ - SON ETÜDÜ																
FORM A																
Etüt Adı ve İstasyon Tanımı : S011109										Tarih : 30/09/2009						
K.K.No ve Yön : 300 - 33 - Tatvan - Gevaş										Başlangıç Saati :						
Ekip :										Bitiş Saati :						
Kontrolör :										Hava Durumu : Açık						
Plaka No :	Taşıt Sınıfı	Model(yıl)	Marka	Taşıt Gövde Tipi	Boş Ağırlık (kg)	Araç Tescil Belgesine göre		Yük Cinsi	Taşıma Türü	Geldiği Yer	Gittiği Yer	Kullanılan Güzergah	Günlük Alman Mesafe (km)	Seyahat Süresi (saat)	Giriş Yaptığı Sınır Kapısı	Çıkış Yaptığı Sınır Kapısı
						İstiap Haddi kg/kişi	Azami Yüklü Ağırlığı (kg)									
34 CSL 48	TIR	2004	Renault	1	7800-7800	32000		Araba	1	Bursa	Van	Eskiş-Ank-Malt	1605	27		
11 DR 916	TIR	2006	DAF	6	7100-7426	25000		Peçete	1	Eskişehir	Van	Ank-Malt-Muş	1456	25		
35 DNL 94	KAMYON	2006	Ford	1	9270	15750		Mobilya	2	Malatya	Van	Elazığ-Muş	600	11		
65 EU 373	KAMYON	2005	Ford	1	8980	25000		Lastik	2	İstanbul	Van	Ank-Kays-Malt	1680	29		
16 CCG 65	KAMYON	2004	BMC	1	8980	17020		Gıda	2	Adana	Van	Antep-Diyar-Bitl	900	17		
34 FC 1313	OTOBÜS	2006	Travego		16937	5472		20 Yolcu	1	İzmir	Van	Afy-Aks-Malat.	1800	30		
35 SDM 48	KAMYON	2008	BMC	5	14000	32000		Süt	1	Adana	Van	Antep-Diyar-Bitl	890	16		
63 LL 777	KAMYON	2005	Ford	6	8500	25000		Sigara	2	G.Antep	Van	Diyar-Bitlis	700	12		
65 AB 323	KAMYON	2006	Mercedes	6	12000	32000		Mobilya	2	Kayseri	Van	Malatya-Bingöl	1000	18		
45 U 3838	TIR	2007	BMC	1	6710-6200	33500		Fayans	1	Kütahya	Van	Ankara-Kayseri	1550	27		
34 FM 001	OTOBÜS	2008	Travego		16937	5472		30 Yolcu	1	Aydın	Van	Ispah-Kon-Kays	1800	30		
63 VT 280	KAMYON	1990	Ford	1	8000	22000		Güneş Enerji	2	Urfa	Van	Diyar-Silvan	580	10		
34 UL 6896	KAMYON	2005	Ford	1	9000	16000		Boş	2	Balaban/Van	Gevaş/Van	Gevaş	80	1		
49 EA 716	KAMYON	2006	Ford	1	8950	25000		Tüp	2	Muş	Van	Tatvan	250	5		
30 YA 151	KAMYON	1997	Ford	1	8012	17488		Makarna	2	G.Antep	Y.ova/Hakkari	Diyar-Bitl-Van	693	12		
13 DA 837	KAMYON	1989	Ford	1	6800	15200		Tandır	2	Bitlis	Van	Tatvan-Reşadiye	170	3		
65 AS 522	KAMYON	2006	Ford	1	9100	25000		Tuğla	2	Bitlis	Van	Tatvan-Reşadiye	170	3		
34 DZ 5311	OTOBÜS	2008	Travego		16937	5472		30 Yolcu	1	İstanbul	Van	Ank-Kays-Malt	1680	28		
65 DL 683	KAMYON	2005	Ford	1	8980	16020		Elma	2	Tatvan/Bitlis	Van	Reşadiye	145	3		
35 AU 5855	TIR	2006	Scania	1	7150-6600	28900		Kola	1	Elazığ	Van	Bingöl-Muş	480	8		
13 AK 913	KAMYON	2007	Ford	2	11000	21000		Profil	2	İskenderun	Van	Antep-Diyar-Bitl	890	15		
64 DV 604	TIR	2006	Mercedes	1	6610-8135	34135		Fayans	1	Uşak	Van	Konya-Elazığ	1550	26		
64 AS 478	TIR	2008	Mercedes	1	6610-8135	34135		Fayans	1	Uşak	Van	Konya-Elazığ	1550	27		
34 TF 9743	OTOBÜS	2009	Travego		16937	5472		15 Yolcu	1	Bodrum	Van	Deniz-Kays-Muş	1800	30		
34 YN 4030	KAMYON	2006	Ford	1	8980	16020		Kereste	2	Bitlis	Van	Tatvan-Reşadiye	180	3		
72 DR 885	KAMYON	2006	Scania	1	11300	32000		Sebze	2	Bitlis	Van	Tatvan-Gevaş	180	3		
23 FU 381	KAMYON	1998	Ford	1	7350	17650		Beyaz Eşya	2	Elazığ	Van	Bingöl-Muş	475	8		
65 AZ 842	KAMYON	2006	Ford	1	10480	21520		Demir	2	İskenderun	Van	Antep-Diyar-Bitl	900	16		
65 EZ 710	KAMYON	2005	Ford	1	8980	16020		Kepçe	2	Tatvan/Bitlis	Van	Reşadiye-Gevaş	145	3		
65 NF 443	KAMYON	2008	Ford	3	13000	32000		Mazot	1	Batman	Van	Kozluk-Baykan	310	6		

Not: Otobüsler için yolcu kapasitesi (kolluk sayısı) istiap haddi sütununa, yolcu sayısı yük cinsi sütununa yazılacaktır. 1/02/2008 tarihinden itibaren kullanılan yeni Araç Tescil Belgeleri de İstiap Haddi yerine Azami Yüklü Ağırlık Bilgisi yer almaktadır.

Ek Tablo 2. Dingil ağırlığı ve başlangıç-son etüdü, Form B (Van Karayolları 11.Bölge Müdürlüğü)

DİNGİL AĞIRLIĞI ve BAŞLANGIÇ - SON ETÜDÜ FORM B									
Etüt Adı ve İstasyon Tanımı : S011109							Tarih : 30/09/2009		
K.K.No ve Yön : 300 - 33 - Tatvan - Gevaş							Başlangıç Saati :		
Ekip :							Bitiş Saati :		
Kontrolör :							Hava Durumu : Açık		
Plaka No :	Dingil Tipi	1.Dingil Ağırlığı(kg)	2.Dingil Ağırlığı(kg)	3.Dingil Ağırlığı(kg)	4.Dingil Ağırlığı(kg)	5.Dingil Ağırlığı(kg)	6.Dingil Ağırlığı(kg)	7.Dingil Ağırlığı(kg)	Açıklamalar
65 AH 433	1.22	6660	9520	6200					
34 FM 0005	1.21	/--	/--	/--					
65 AB 177	1.21	/--	/--	/--					
65 NF 107	1.22	6240	13820	13000					
13 EA 291	1.22	4960	6460	4740					
35 AU 5849	1.2+111	6140	11060	6880	6880	7380			
35 AU5103	1.2+111	7300	11440	7560	7200	7440			
65 FA 046	1.22	7020	13960	1080					
65 EK 748	1.1+22	6600	6700	13440	10440				
65 FC 118	1.22	5040	4660	2780					
34 UL 6896	1.22	3820	8240						
34 BD 0074	1.22	4140	5900	5600					
72 AU 185	1.2+111	6420	10500	6860	6940	6600			
75 DP 646	1.2+111	6500	11420	7520	7200	5900			
01 VM 126	1.1+22	6620	4900	6300	4820				
34 US 3676	1.21	/--	/--	/--					
49 AC 702	1.22	7500	12680	10260					
65 EA 557	1.22	4040	8020	/--					
70 EH 117	1.22	5680	9780	7240					
41 R 3170	1.22	5000	5360	4420					
35 AU 5871	1.2+111	7500	13180	7000	6740	6640			
13 AZ 683	1.1+22	5680	9220	12260	7440				
13 AV 806	1.22	4060	7520	/--					
55 K 4102	1.2+111	5380	5820	/--	4060	3820			
01 GL 950	1.22	4380	7340	5600					
65 AU 665	1.21	/--	/--	/--					
06 FSA 51	1.1+22	6840	/--	9640	6540				
13 DA 161	1.22	5420	6820	4480					
06 EU 3944	1.22	3540	6840	/--					
34 YPP 89	1.21	/--	/--	/--					
65 FA 050	1.22	5660	8780	10240					
30 AK 532	1.22	6440	9180	8220					
34 CSL 48	1.2+111	6720	10720	3420	3120				
11 DR 916	1.2+111	5940	5920	3220	3200	3240			
35 DNL 94	1.22	5520	7440	5280					
65 EU 373	1.22	3220	10240	/--					
16 CCG 65	1.22	6600	7060	3820					
34 FC 1313	1.21	/--	/--	/--					
35 SDM 48	1.1+22	8380	/--	6840	3420				
63 LL 777	1.22	4320	8200	/--					
65 AB 323	1.1+22	6120	/--	8520	6540				
45 U 3838	1.2+111	6380	10600	8060	7920	8420			
34 FM 001	1.21	/--	/--	/--					
63 VT 280	1.22	4240	6660	4900					
34 UL 6896	1.22	3820	7580	/--					
49 EA 716	1.22	5740	7700	5680					
30 YA 151	1.22	5600	10060	8120					
13 DA 837	1.21	3060	7440	1360					
65 AS 522	1.22	5700	18400	5700					
34 DZ 5311	1.21	/--	/--	/--					
65 DL 683	1.22	7260	10180	7580					
35 AU 5855	1.2+111	8200	13500	6880	6780	6940			
13 AK 913	1.1+22	8020	6480	10240	8700				
64 DV 604	1.2+111	7360	10300	7320	7600	7660			
64 AS 478	1.2+111	6680	12160	7060	7080	6780			
34 TF 9743	1.21	/--	/--	/--					
34 YN 4030	1.22	5620	7760	7500					
72 DR 885	1.1+22	4340	6360	8080	6440				
23 FU 381	1.22	4260	4800	2560					
65 AZ 842	1.1+22	4000	6460	13380	9200				
65 EZ 710	1.22	4920	8820	6360					
65 NF 443	1.1+22	4720	7920	11920	8680				

Ek Tablo 3. Tekerlek şişme basıncı ve yüküne bağlı geniş tek tekerlek temas alanları (Korkiala)

Geniş Tek Tekerlek Temas Alanı Analizi (Yol Testi)						
Tekerlek Basıncı	Tekerlek Yüğü	Genişlik	Uzunluk	Temas Alanı	Temas Basıncı	Temas Alanı
kPa	kN	cm	cm	cm ²	kPa	m ²
500	31,01	24,40	30,90	652,40	475,32	0,06524
500	40,34	29,60	31,00	814,40	495,33	0,08144
500	50,79	34,50	31,20	941,40	539,52	0,09414
500	61,16	37,20	31,40	1064,30	574,65	0,10643
500	70,90	38,00	31,40	1141,10	621,33	0,11411
600	31,00	23,00	30,60	594,90	521,10	0,05949
600	40,44	27,50	31,00	730,60	553,52	0,07306
600	51,01	32,30	31,20	855,70	596,12	0,08557
600	61,19	34,00	31,40	954,30	641,20	0,09543
600	71,31	36,90	31,60	1073,40	664,34	0,10734
600	80,00	38,80	31,70	1171,60	682,83	0,11716
700	31,01	21,70	30,00	543,40	570,67	0,05434
700	39,90	25,40	30,90	667,40	597,84	0,06674
700	51,17	28,50	31,10	778,20	657,54	0,07782
700	60,94	31,80	31,30	883,30	689,91	0,08833
700	71,15	33,70	31,40	977,50	727,88	0,09775
700	81,80	36,30	31,60	1081,10	756,64	0,10811
800	31,01	20,70	29,30	520,30	596,00	0,05203
800	40,08	23,80	29,60	625,90	640,36	0,06259
800	49,99	25,40	31,00	707,60	706,47	0,07076
800	60,85	28,70	31,40	825,10	737,49	0,08251
800	70,91	30,00	31,40	889,10	797,55	0,08891
800	82,10	34,00	31,60	1019,50	805,30	0,10195
900	30,98	20,30	30,30	511,20	606,03	0,05112
900	39,88	22,10	30,60	581,20	686,17	0,05812
900	50,79	25,10	31,00	715,30	710,05	0,07153
900	60,90	28,00	31,20	809,20	752,60	0,08092
900	71,12	29,00	31,20	869,20	818,22	0,08692
900	82,00	32,00	31,60	990,60	827,78	0,09906

1 kPa = 0,000102 kg/mm², 1 kN = 101 Kg

Ek Tablo 4. Tekerlek şişme basıncı ve yüküne bağlı dual tekerlek temas alanları (Korkiala)

Dual Tekerlek Temas Alanı Analizi (Yol Testi)												
Tekerlek Basıncı	Tekerlek Yüğü	1. Tekerlek			2. Tekerlek			Tekerlekler Arası Mesafe	Toplam Temas Alanı	Temas Basıncı	Ortalama Genişlik	Ortalama Uzunluk
		Genişlik	Uzunluk	Temas Alanı	Genişlik	Uzunluk	Temas Alanı					
kPa	kN	cm	cm	cm ²	cm	cm	cm ²	cm	m ²	kPa	cm	cm
500	30,20	22,10	19,20	386,50	22,20	19,90	381,00	10,50	0,07675	393,50	22,15	19,55
500	40,10	22,50	22,50	458,50	22,30	22,50	443,00	10,30	0,09015	444,80	22,40	22,50
500	50,59	22,70	25,30	530,00	22,60	25,40	536,70	10,20	0,10667	474,30	22,65	25,35
500	60,88	22,60	27,70	581,10	22,60	27,60	595,90	10,20	0,11770	517,20	22,60	27,65
500	70,97	22,60	29,80	637,70	22,60	29,90	644,80	10,30	0,12825	553,40	22,60	29,85
500	81,90	22,70	34,80	730,90	22,70	34,40	714,80	10,10	0,14457	566,50	22,70	34,60
600	30,33	22,10	18,90	347,30	22,30	20,10	389,50	10,40	0,07368	411,60	22,20	19,50
600	40,47	22,20	20,50	392,50	22,40	21,00	423,50	10,25	0,08160	496,00	22,30	20,75
600	50,92	22,60	22,30	460,00	22,70	23,30	509,40	10,10	0,09694	525,30	22,65	22,80
600	60,15	22,60	25,20	523,50	22,70	26,20	553,70	10,20	0,10772	558,40	22,65	25,70
600	71,05	22,70	27,60	574,70	22,80	28,30	602,10	10,10	0,11768	603,80	22,75	27,95
600	82,00	22,80	30,90	644,00	22,70	32,40	678,30	10,10	0,13223	620,10	22,75	31,65
700	30,25	21,40	17,10	309,50	21,60	17,00	317,60	11,00	0,06271	482,40	21,50	17,05
700	40,59	22,00	19,30	377,50	22,00	19,40	386,00	10,60	0,07635	531,60	22,00	19,35
700	50,41	22,30	21,20	429,50	22,40	21,80	443,60	10,40	0,08731	577,40	22,35	21,50
700	61,19	22,70	23,90	503,80	22,70	23,60	509,30	10,30	0,10131	604,00	22,70	23,75
700	70,94	22,70	26,30	556,50	22,70	26,00	568,90	10,20	0,11254	630,40	22,70	26,15
700	81,20	23,00	29,00	630,10	22,90	29,40	637,30	10,10	0,12674	640,70	22,95	29,20

Ek Tablo 4. Tekerlek şişme basıncı ve yüküne bağlı dual tekerlek temas alanları (Korkiala)(devamı)

Dual Tekerlek Temas Alanı Analizi (Yol Testi)												
Tekerlek Basıncı	Tekerlek Yükü	1. Tekerlek			2. Tekerlek			Tekerlekler Arası Mesafe	Toplam Temas Alanı	Temas Basıncı	Ortalama Genişlik	Ortalama Uzunluk
		Genişlik	Uzunluk	Temas Alanı	Genişlik	Uzunluk	Temas Alanı					
kPa	kN	cm	cm	cm ²	cm	cm	cm ²	cm	m ²	kPa	cm	cm
800	30,26	21,20	16,20	290,40	21,00	17,20	303,60	11,50	0,05940	509,40	21,10	16,70
800	40,15	22,20	18,80	363,40	22,30	18,70	374,20	10,30	0,07376	544,30	22,25	18,75
800	50,93	22,50	21,10	419,40	22,60	21,00	430,20	10,20	0,08496	599,50	22,55	21,05
800	60,15	22,70	22,70	477,20	22,90	22,50	484,20	10,10	0,09614	625,70	22,80	22,60
800	70,56	22,80	24,30	520,00	22,60	24,60	529,80	10,10	0,10498	672,10	22,70	24,45
800	80,00	22,90	27,70	601,40	22,90	28,30	605,80	10,00	0,12072	662,70	22,90	28,00
850*	70,82	22,85	24,05	517,00	22,75	24,40	528,30	10,10	0,10453	677,60	22,58	24,33
900	30,26	21,10	16,60	296,40	21,60	17,30	308,70	11,10	0,06051	500,10	21,35	16,95
900	40,30	22,30	19,00	367,00	22,00	19,10	367,60	10,50	0,07346	548,60	22,15	19,05
900	50,73	22,70	20,40	421,10	22,60	21,50	440,30	10,10	0,08614	588,90	22,65	20,95
900	60,86	22,80	22,30	468,40	22,70	23,90	488,90	10,10	0,09573	635,70	22,75	23,10
900	71,08	22,90	23,80	513,90	22,90	24,20	526,70	10,10	0,10406	683,10	22,90	24,00
900	80,00	23,00	26,50	572,80	23,10	27,10	593,20	10,00	0,11660	686,10	23,05	26,80

1 kPa = 0,000102 kg/mm², 1 kN = 101 Kg

Ek Tablo 5. Tekerlek konfigürasyonuna göre yol tabakalarında meydana gelen radyal gerilme değerleri (DAE)

DAE VERİLERİ MODELİ RADYAL GERİLME DEĞERLERİ (kg/mm ² x 10 ³)						
Tekerlek Tipi	Yol Tabakaları	Tekerlek Merkezi σ_r (A)	Tekerlek Kenarı σ_r (B)	0,25 m (Teker Merkez) σ_r (C)	0,50 m (Teker Merkez) σ_r (D)	
Tek Tekerlek	Ac Üstü	-118	-80	-29	-1,1	
	Ac Altı	47	37			
	Temel/A.Temel Üstü	47	37			
	Temel/A.Temel Altı	1,13	1,28			
	Taban Zemini Üstü	1,13	1,28			
Geniş Tek Tekerlek	Ac Üstü	-96	-64	-26	-0,98	
	Ac Altı	39	27			
	Temel/A.Temel Üstü	39	27			
	Temel/A.Temel Altı	1,1	1,03			
	Taban Zemini Üstü	1,1	1,03			
Yeni Geniş Tek Tekerlek	Ac Üstü	-113	-68	-42	-1,6	
	Ac Altı	51	34			
	Temel/A.Temel Üstü	51	34			
	Temel/A.Temel Altı	1,85	1,6			
	Taban Zemini Üstü	1,85	1,6			
Dual Tekerlek	Ac Üstü	İki Teker Arası	Teker Merkezi	İç Kenar	Dış Kenar	-2,75
		-88	-114	-102	-70	
	Ac Altı	48	48	50		
	Temel/A.Temel Üstü	48	48	50		
	Temel/A.Temel Altı	1,8	2,25	1,8		
Taban Zemini Üstü	1,8	2,25	1,8			

(+): Çekme Gerilmesi, (-): Basınç Gerilmesi

Ek Tablo 6. Tekerlek konfigürasyonuna göre yol tabakalarında meydana gelen teğetsel gerilme değerleri (DAE)

DAE VERİLERİ MODELİ TEĞETSEL GERİLME DEĞERLERİ (kg/mm ² x 10 ⁻³)						
Tekerlek Tipi	Yol Tabakaları	Tekerlek Merkezi σ_t (A)	Tekerlek Kenarı σ_t (B)	0,25 m (Teker Merkez) σ_t (C)	0,50 m (Teker Merkez) σ_t (D)	
Tek Tekerlek	Ac Üstü	-120	-72	-19	-0,46	
	Ac Altı	48	33			
	Temel/A.Temel Üstü	48	33			
	Temel/A.Temel Altı	1,18	0,88			
	Taban Zemini Üstü	1,18	0,88			
Geniş Tek Tekerlek	Ac Üstü	-95	-53	-16,5	-0,41	
	Ac Altı	38	23			
	Temel/A.Temel Üstü	38	23			
	Temel/A.Temel Altı	0,98	0,63			
	Taban Zemini Üstü	0,98	0,63			
Yeni Geniş Tek Tekerlek	Ac Üstü	-110	-58	-30	-0,81	
	Ac Altı	50	27			
	Temel/A.Temel Üstü	50	27			
	Temel/A.Temel Altı	1,5	0,8			
	Taban Zemini Üstü	1,5	0,8			
Dual Tekerlek	Ac Üstü	İki Teker Arası	Teker Merkezi	İç Kenar	Dış Kenar	-2,2
		-60	-108	-80	-68	
	Ac Altı	33	44	37		
	Temel/A.Temel Üstü	33	44	37		
	Temel/A.Temel Altı	1,38	1,05	1,32		
Taban Zemini Üstü	1,38	1,05	1,32			

(+): Çekme Gerilmesi, (-): Basınç Gerilmesi

Ek Tablo 7. Tekerlek konfigürasyonuna göre yol tabakalarında meydana gelen düşey gerilme değerleri (DAE)

DAE VERİLERİ MODELİ DÜŞEY GERİLME DEĞERLERİ (kg/mm ² x 10 ⁻³)						
Tekerlek Tipi	Yol Tabakaları	Tekerlek Merkezi σ_z (A)	Tekerlek Kenarı σ_z (B)	0,25 m (Teker Merkez) σ_z (C)	0,50 m (Teker Merkez) σ_z (D)	
Tek Tekerlek	Ac Üstü	-66	-26	0,027	-0,28	
	Ac Altı	-9	-7,2			
	Temel/A.Temel Üstü	-9	-7,2			
	Temel/A.Temel Altı	-8,5	-7,6			
	Taban Zemini Üstü	-8,5	-7,6			
Geniş Tek Tekerlek	Ac Üstü	-48,3	-18	-0,05	-0,38	
	Ac Altı	-7	-5,6			
	Temel/A.Temel Üstü	-7	-5,6			
	Temel/A.Temel Altı	-7	-6,1			
	Taban Zemini Üstü	-7	-6,1			
Yeni Geniş Tek Tekerlek	Ac Üstü	-40	-11,5	-0,06	-0,54	
	Ac Altı	-10,5	-7			
	Temel/A.Temel Üstü	-10,5	-7			
	Temel/A.Temel Altı	-11	-8			
	Taban Zemini Üstü	-11	-8			
Dual Tekerlek	Ac Üstü	İki Teker Arası	Teker Merkezi	İç Kenar	Dış Kenar	-0,85
		0,52	-50	-20	-20	
	Ac Altı	-10,2	-9,6	-9,6		
	Temel/A.Temel Üstü	-10,2	-9,6	-9,6		
	Temel/A.Temel Altı	-10,5	-9,5	-10,5		
Taban Zemini Üstü	-10,5	-9,5	-10,5			

(+): Çekme Gerilmesi, (-): Basınç Gerilmesi

Ek Tablo 8. Tekerlek konfigürasyonuna göre yol tabakalarında meydana gelen kayma gerilmesi değerleri (DAE)

DAE VERİLERİ MODELİ KAYMA GERİLMESİ DEĞERLERİ (kg/mm ² x 10 ⁻³)						
Tekerlek Tipi	Yol Tabakaları	Tekerlek Merkezi τ (A)	Tekerlek Kenarı τ (B)	0,25 m (Teker Merkz) τ (C)	0,50 m (Teker Merkz) τ (D)	
Tek Tekerlek	Ac Üstü	27,5	28	15	1,41	
	Ac Altı	28	22,5			
	Temel/A.Temel Üstü	28	22,5			
	Temel/A.Temel Altı	4,9	4,5			
	Taban Zemini Üstü	4,9	4,5			
Geniş Tek Tekerlek	Ac Üstü	23	22	12,5	1,21	
	Ac Altı	23	17			
	Temel/A.Temel Üstü	23	17			
	Temel/A.Temel Altı	4,1	3,6			
	Taban Zemini Üstü	4,1	3,6			
Yeni Geniş Tek Tekerlek	Ac Üstü	36	28	21	2,5	
	Ac Altı	31	21			
	Temel/A.Temel Üstü	31	21			
	Temel/A.Temel Altı	6,2	5,1			
	Taban Zemini Üstü	6,2	5,1			
Dual Tekerlek	Ac Üstü	İki Teker Arası	Teker Merkezi	İç Kenar	Dış Kenar	2,75
		44	32	41	26	
	Ac Altı	29	29	30		
	Temel/A.Temel Üstü	29	29	30		
	Temel/A.Temel Altı	6,6	6	6,6		
Taban Zemini Üstü	6,6	6	6,6			

(+): Çekme Gerilmesi, (-): Basınç Gerilmesi

Ek Tablo 9. Tekerlek konfigürasyonuna göre yol tabakalarında meydana gelen deviator gerilme değerleri (DAE)

DAE VERİLERİ MODELİ DEVIATOR GERİLME DEĞERLERİ ($\text{kg/mm}^2 \times 10^{-3}$)							
Tekerlek Tipi	Yol Tabakaları	Tekerlek Merkezi σ_d (A)		Tekerlek Kenarı σ_d (B)		0,25 m (Teker Merkez) σ_d (C)	0,50 m (Teker Merkez) σ_d (D)
Tek Tekerlek	Ac Üstü	36		34		16	1,3
	Ac Altı	19		16			
	Temel/A.Temel Üstü	19		16			
	Temel/A.Temel Altı	3,8		3,5			
	Taban Zemini Üstü	3,8		3,5			
Geniş Tek Tekerlek	Ac Üstü	31		27		13,5	1,18
	Ac Altı	15,5		13,2			
	Temel/A.Temel Üstü	15,5		13,2			
	Temel/A.Temel Altı	2,8		2,7			
	Taban Zemini Üstü	2,8		2,7			
Yeni Geniş Tek Tekerlek	Ac Üstü	48		34		24	2,5
	Ac Altı	22		17			
	Temel/A.Temel Üstü	22		17			
	Temel/A.Temel Altı	4,4		3,8			
	Taban Zemini Üstü	4,4		3,8			
Dual Tekerlek	Ac Üstü	İki Teker Arası	Teker Merkezi	İç Kenar	Dış Kenar		2,5
		49	40	46	33		
	Ac Altı	25	21,5	24			
	Temel/A.Temel Üstü	25	21,5	24			
	Temel/A.Temel Altı	4,5	4,5	4,6			
Taban Zemini Üstü	4,5	4,5	4,6				

(+): Çekme Gerilmesi, (-): Basınç Gerilmesi

Ek Tablo 10. Tekerlek konfigürasyonuna göre yol tabakalarında meydana gelen radyal gerilme değerleri (STDY)

STANDART TEK DİNGİL YÜKÜ MODELİ RADYAL GERİLME DEĞERLERİ (kg/mm ² x 10 ⁻³)						
Tekerlek Tipi	Yol Tabakaları	Tekerlek Merkezi σ_r (A)	Tekerlek Kenarı σ_r (B)	0,25 m (Teker Merkez) σ_r (C)	0,50 m (Teker Merkez) σ_r (D)	
Tek Tekerlek	Ac Üstü	-135	-93	-35	-1,3	
	Ac Altı	55	44			
	Temel/A.Temel Üstü	55	44			
	Temel/A.Temel Altı	1,5	1,4			
	Taban Zemini Üstü	1,5	1,4			
Geniş Tek Tekerlek	Ac Üstü	-112	-75	-32	-1,2	
	Ac Altı	46	35			
	Temel/A.Temel Üstü	46	35			
	Temel/A.Temel Altı	1,38	1,27			
	Taban Zemini Üstü	1,38	1,27			
Yeni Geniş Tek Tekerlek	Ac Üstü	-94	-55	-33	-1,28	
	Ac Altı	42	27			
	Temel/A.Temel Üstü	42	27			
	Temel/A.Temel Altı	1,19	1,48			
	Taban Zemini Üstü	1,19	1,48			
Dual Tekerlek	Ac Üstü	İki Teker Arası	Teker Merkezi	İç Kenar	Dış Kenar	-1,8
		-70	-86	-81	-58	
	Ac Altı	39	38	39		
	Temel/A.Temel Üstü	39	38	39		
	Temel/A.Temel Altı	1,4	1,75	1,45		
Taban Zemini Üstü	1,4	1,75	1,45			

(+): Çekme Gerilmesi, (-): Basınç Gerilmesi

Ek Tablo 11. Tekerlek konfigürasyonuna göre yol tabakalarında meydana gelen teğetsel gerilme değerleri (STDY)

STANDART TEK DİNGİL YÜKÜ MODELİ TEĞETSEL GERİLME DEĞERLERİ (kg/mm ² x 10 ⁻³)						
Tekerlek Tipi	Yol Tabakaları	Tekerlek Merkezi σ_t (A)	Tekerlek Kenarı σ_t (B)	0,25 m (Teker Merkez) σ_t (C)	0,50 m (Teker Merkez) σ_t (D)	
Tek Tekerlek	Ac Üstü	-140	-88	-23	-0,55	
	Ac Altı	57	39			
	Temel/A.Temel Üstü	57	39			
	Temel/A.Temel Altı	1,45	1,3			
	Taban Zemini Üstü	1,45	1,3			
Geniş Tek Tekerlek	Ac Üstü	-113	-66	-21	-0,51	
	Ac Altı	47	29			
	Temel/A.Temel Üstü	47	29			
	Temel/A.Temel Altı	1,28	0,8			
	Taban Zemini Üstü	1,28	0,8			
Yeni Geniş Tek Tekerlek	Ac Üstü	-90	-46	-23	-0,66	
	Ac Altı	39	21			
	Temel/A.Temel Üstü	39	21			
	Temel/A.Temel Altı	1,1	0,6			
	Taban Zemini Üstü	1,1	0,6			
Dual Tekerlek	Ac Üstü	İki Teker Arası	Teker Merkezi	İç Kenar	Dış Kenar	-1,4
		-50	-80	-66	-55	
	Ac Altı	28	34,5	30		
	Temel/A.Temel Üstü	28	34,5	30		
	Temel/A.Temel Altı	1,1	0,97	1,09		
Taban Zemini Üstü	1,1	0,97	1,09			

(+): Çekme Gerilmesi, (-): Basınç Gerilmesi

Ek Tablo 12. Tekerlek konfigürasyonuna göre yol tabakalarında meydana gelen düşey gerilme değerleri (STDY)

STANDART TEK DİNGİL YÜKÜ MODELİ DÜŞEY GERİLME DEĞERLERİ (kg/mm ² x 10 ⁻³)						
Tekerlek Tipi	Yol Tabakaları	Tekerlek Merkezi σ_z (A)	Tekerlek Kenarı σ_z (B)	0,25 m (Teker Merkez) σ_z (C)	0,50 m (Teker Merkez) σ_z (D)	
Tek Tekerlek	Ac Üstü	-70	-28	0,03	-0,35	
	Ac Altı	-9,8	-8,8			
	Temel/A.Temel Üstü	-9,8	-8,8			
	Temel/A.Temel Altı	-10,2	-9			
	Taban Zemini Üstü	-10,2	-9			
Geniş Tek Tekerlek	Ac Üstü	-55	-22	-0,065	-0,45	
	Ac Altı	-9	-7			
	Temel/A.Temel Üstü	-9	-7			
	Temel/A.Temel Altı	-8,8	-7,6			
	Taban Zemini Üstü	-8,8	-7,6			
Yeni Geniş Tek Tekerlek	Ac Üstü	-36	-10,1	-0,055	-0,4	
	Ac Altı	-7,9	-5,6			
	Temel/A.Temel Üstü	-7,9	-5,6			
	Temel/A.Temel Altı	-8	-6			
	Taban Zemini Üstü	-8	-6			
Dual Tekerlek	Ac Üstü	İki Teker Arası	Teker Merkezi	İç Kenar	Dış Kenar	-0,47
		0,48	-33	-17,5	-17,5	
	Ac Altı	-7,7	-8,1	-8		
	Temel/A.Temel Üstü	-7,7	-8,1	-8		
	Temel/A.Temel Altı	-8,6	-7,5	-8,5		
Taban Zemini Üstü	-8,6	-7,5	-8,5			

(+): Çekme Gerilmesi, (-): Basınç Gerilmesi

Ek Tablo 13. Tekerlek konfigürasyonuna göre yol tabakalarında meydana gelen kayma gerilmesi değerleri (STDY)

STANDART TEK DİNGİL YÜKÜ MODELİ KAYMA GERİLMESİ DEĞERLERİ (kg/mm ² x 10 ⁻³)						
Tekerlek Tipi	Yol Tabakaları	Tekerlek Merkezi τ (A)	Tekerlek Kenarı τ (B)	0,25 m (Teker Merkz) τ (C)	0,50 m (Teker Merkz) τ (D)	
Tek Tekerlek	Ac Üstü	34	33	17,5	2,2	
	Ac Altı	33	27			
	Temel/A.Temel Üstü	33	27			
	Temel/A.Temel Altı	5,9	5,5			
	Taban Zemini Üstü	5,9	5,5			
Geniş Tek Tekerlek	Ac Üstü	28,5	24,5	16	1,98	
	Ac Altı	28	22			
	Temel/A.Temel Üstü	28	22			
	Temel/A.Temel Altı	5,2	4,5			
	Taban Zemini Üstü	5,2	4,5			
Yeni Geniş Tek Tekerlek	Ac Üstü	28	22,5	17	1,9	
	Ac Altı	25	17			
	Temel/A.Temel Üstü	25	17			
	Temel/A.Temel Altı	4,7	3,8			
	Taban Zemini Üstü	4,7	3,8			
Dual Tekerlek	Ac Üstü	İki Teker Arası	Teker Merk-ezi	İç Kenar	Dış Kenar	2,1
		35	27	32	21	
	Ac Altı	23	23,5	23		
	Temel/A.Temel Üstü	23	23,5	23		
	Temel/A.Temel Altı	5	4,7	5		
Taban Zemini Üstü	5	4,7	5			

(+): Çekme Gerilmesi, (-): Basınç Gerilmesi

Ek Tablo 14. Tekerlek konfigürasyonuna göre yol tabakalarında meydana gelen deviator gerilme değerleri (STDY)

STANDART TEK DİNGİL YÜKÜ MODELİ DEVIATOR GERİLME DEĞERLERİ ($\text{kg/mm}^2 \times 10^{-3}$)						
Tekerlek Tipi	Yol Tabakaları	Tekerlek Merkezi σ_d (A)	Tekerlek Kenarı σ_d (B)	0,25 m (Teker Merkez) σ_d (C)	0,50 m (Teker Merkez) σ_d (D)	
Tek Tekerlek	Ac Üstü	44	42	19	2,2	
	Ac Altı	23	20			
	Temel/A.Temel Üstü	23	20			
	Temel/A.Temel Altı	4,1	3,9			
	Taban Zemini Üstü	4,1	3,9			
Geniş Tek Tekerlek	Ac Üstü	38	33	17	1,9	
	Ac Altı	19	16,5			
	Temel/A.Temel Üstü	19	16,5			
	Temel/A.Temel Altı	3,5	3,4			
	Taban Zemini Üstü	3,5	3,4			
Yeni Geniş Tek Tekerlek	Ac Üstü	36	27	18	1,9	
	Ac Altı	17,5	14			
	Temel/A.Temel Üstü	17,5	14			
	Temel/A.Temel Altı	3,25	2,8			
	Taban Zemini Üstü	3,25	2,8			
Dual Tekerlek	Ac Üstü	İki Teker Arası	Teker Merkezi	İç Kenar	Dış Kenar	1,8
		40	33	37	26	
	Ac Altı	19,5	17	19		
	Temel/A.Temel Üstü	19,5	17	19		
	Temel/A.Temel Altı	3,5	3,4	3,5		
Taban Zemini Üstü	3,5	3,4	3,5			

(+): Çekme Gerilmesi, (-): Basınç Gerilmesi

Ek Tablo 15. Aks konfigürasyonuna göre yol tabakalarında meydana gelen kritik çekme deformasyonu değerleri (DEA)

D.A.E VERİLERİ MODELİ KRİTİK ÇEKME DEFORMASYONLARI DEĞERLERİ					
Tekerlek Tipi	Yol Tabakaları	Tekerlek Merkezi ϵ_p (A)		Tekerlek Kenarı ϵ_p (B)	
Tek Tekerlekli Tek Aks (ön)	Kaplama Üstü	0,5		6	
	Kaplama Altı	65		25	
	Temel/A.Temel Üstü	65		25	
	Temel/A.Temel Altı	6,4		2,2	
	Taban Zemini Üstü	6,4		2,2	
Tek Tekerlekli Tek Aks (çekiç)	Kaplama Üstü	0,6		7	
	Kaplama Altı	68		26	
	Temel/A.Temel Üstü	68		26	
	Temel/A.Temel Altı	6,5		2,25	
	Taban Zemini Üstü	6,5		2,25	
Dual Tekerlekli Tek Aks (çekiç)	Kaplama Üstü	İki Teker Arası	Teker Merkezi	İç Kenar	Dış Kenar
		5,2	0,85	3	1,5
	Kaplama Altı	56	33	28	20,5
	Temel/A.Temel Üstü	56	33	28	20,5
	Temel/A.Temel Altı	7,5	3,1	3,3	1,8
	Taban Zemini Üstü	7,5	3,1	3,3	1,8
Dual Tekerlekli Tandem Aks	Kaplama Üstü	İki Teker Arası	Teker Merkezi	İç Kenar	Dış Kenar
		4,6	0,8	2,4	2,25
	Kaplama Altı	45	25	22,5	20
	Temel/A.Temel Üstü	45	25	22,5	20
	Temel/A.Temel Altı	5,4	2,25	2,4	2,2
	Taban Zemini Üstü	5,4	2,25	2,4	2,2
Geniş Tekerlekli Tandem Aks	Kaplama Üstü	0,9		2,5	
	Kaplama Altı	60		23	
	Temel/A.Temel Üstü	60		23	
	Temel/A.Temel Altı	6,1		2,1	
	Taban Zemini Üstü	6,1		2,1	

(+): Çekme Gerilmesi, (-): Basınç Gerilmesi

Ek Tablo 16. Aks konfigürasyonuna göre yol tabakalarında meydana gelen düşey gerilme değerleri (DEA)

D.A.E VERİLERİ MODELİ DÜŞEY GERİLME DEĞERLERİ (kg/mm² x 10⁻³)					
Tekerlek Tipi	Yol Tabakaları	Tekerlek Merkezi ϵ_p (A)		Tekerlek Kenarı ϵ_p (B)	
Tek Tekerlekli Tek Aks (ön)	Kaplama Üstü	-53,5		-26	
	Kaplama Altı	-13		-13,5	
	Temel/A.Temel Üstü	-13		-13,5	
	Temel/A.Temel Altı	-11		-14	
	Taban Zemini Üstü	-11		-14	
Tek Tekerlekli Tek Aks (çekiç)	Kaplama Üstü	-55		-27	
	Kaplama Altı	-13,5		-14	
	Temel/A.Temel Üstü	-13,5		-14	
	Temel/A.Temel Altı	-11,5		-14,5	
	Taban Zemini Üstü	-11,5		-14,5	
Dual Tekerlekli Tek Aks (çekiç)	Kaplama Üstü	İki Teker Arası	Teker Merkezi	İç Kenar	Dış Kenar
		-3,3	-42,2	-20	-22
	Kaplama Altı	-7,5	-13	-11,5	-8
		Temel/A.Temel Üstü	-7,5	-13	-11,5
	Temel/A.Temel Altı	-12,7	-11,3	-12	-9,7
Taban Zemini Üstü	-12,7	-11,3	-12	-9,7	
Dual Tekerlekli Tandem Aks	Kaplama Üstü	İki Teker Arası	Teker Merkezi	İç Kenar	Dış Kenar
		-2,5	-34,5	-16	-18
	Kaplama Altı	-6	-12	-10	-9,8
		Temel/A.Temel Üstü	-6	-12	-10
	Temel/A.Temel Altı	-9,3	-11,2	-11,5	-11
Taban Zemini Üstü	-9,3	-11,2	-11,5	-11	
Geniş Tekerlekli Tridem Aks	Kaplama Üstü	-36,5		-18	
	Kaplama Altı	-12,2		-13,3	
	Temel/A.Temel Üstü	-12,2		-13,3	
	Temel/A.Temel Altı	-11,25		-13	
	Taban Zemini Üstü	-11,25		-13	

(+): Çekme Gerilmesi, (-): Basınç Gerilmesi

ÖZGEÇMİŞ

Hakkari'nin Yüksekova ilçesi, Beşpınar köyünde doğdu. İlköğrenimini Yüksekova'da, orta ve lise öğrenimini Uşak-Eşme İmam Hatip Lisesinde tamamladı. 2001-2002 öğretim döneminde girmiş olduğu Sakarya Üniversitesi Yapı Eğitimi bölümünden 2005 yılında mezun oldu. 2007 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Bölümünde Yüksek Lisans öğrenimine başladı. Özel sektörde çeşitli inşaat firmalarında çalıştı, 2010 yılında girdiği Leka İnşaat firmasında Hakediş ve Planlama Sorumlusu olarak görev yapmakta olup, çok iyi derecede İngilizce ve Arapça bilmektedir.