



**ESNEK ÜSTYAPILARIN SERVİS ÖMRÜNE ETKİ EDEN
PARAMETRELERİN BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MERVE BOŞNAK

**MERSİN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

**MERSİN
MART-2023**

**ESNEK ÜSTYAPILARIN SERVİS ÖMRÜNE ETKİ EDEN
PARAMETRELERİN BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MERVE BOŞNAK
ORCID ID: 0000-0003-2766-8994

MERSİN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

DANIŞMAN
DR. ÖĞR. ÜYESİ MURAT VERGİ TACİROĞLU
ORCID ID: 0000-0002-0672-1672

MERSİN
MART-2023

ÖZET

ESNEK ÜSTYAPILARIN SERVİS ÖMRÜNE ETKİ EDEN PARAMETRELERİN BELİRLENMESİ

Bu çalışmada esnek üstyapıların servis ömrü boyunca hasarsız ya da en az hasarla hizmet verebilmesi için yolun deformasyonuna etki eden parametrelerin en iyi şekilde belirlenmesi için analizler yapılması amaçlanmıştır. Yük, yükleme alanı, yükleme koşulları, çevresel koşullar ve tabaka malzemelerinin tanımlanması gibi üst yapı tasarımında önemli yeri olan ve sonuçları doğrudan etkileyen parametrelerin değişimine karşı uyumlu ve son zamanlarda oldukça sık kullanılan bir üst yapı tasarım yöntemi olan mekanistik-ampirik tasarım yöntemi kullanılmıştır. Mekanistik-ampirik (M-A) tasarım yöntemlerinde tekerlek yükü, çevresel etkiler ve malzeme özellikleri gibi parametreler, temel malzeme mekaniği kullanılarak gerilme ve birim şekil değiştirme hesabında kullanılmakta ve elde edilen bu mekanik tepki değerleriyle yolun ömrü tahmin edilmektedir. M-A tasarım yönteminde yük altındaki kaplamanın mekanik tepkilerini belirlemek amacıyla Yang H. Huang tarafından geliştirilen KENPAVE yazılımı kullanılmıştır. Üstyapılarda en çok meydana gelen bozulma ve deformasyonlar arasında tekerlek izinde oturma ve asfalt tabakası altındaki yorulma çatlakları sayılmaktadır. Çalışmada üstyapı performansıyla doğrudan ilgili olan dingil yükü, elastisite modülü, tabaka kalınlığı ve üstyapı kesintindeki farklılıkların yol bozulmalarına olan etkisi incelenmiştir. Bunun için ise farklı tabaka yapısına sahip üç farklı üstyapı kesiti kullanılmıştır. Tekerelek yükü, elastisite modülü ve tabaka kalınlığı değerlerinin değiştirilmesi ile farklı kombinasyonlar oluşturularak KENPAVE programı yardımıyla analizler yapılmıştır. Yapılan analizler sonucunda elastisite modülü artışının yol ömrünü büyük ölçüde etkilediği ve bu etkiye en çok katkıyı tabakalar arasından temel tabakasının sağladığı anlaşılmıştır. Tüm tabakalara uygulanan artışlar yol ömrü artışına sebep olurken, alt temel tabakasındaki bazı artışlar yol ömründe azalmaya sebep olmuştur. Dingil yükü artışıyla yol ömründe benzer oranlarda azalmalar görülmüştür. Yol ömrüne en çok etki kaplama tabakasının tabaka kalınlığının artırılmasıyla sağlanmıştır. Alt temel tabakasının elastisite modülünün artırılmasının yol ömrü artışına kayda değer bir etkisi olmamıştır.

Anahtar Kelimeler: KENPAVE, Mekanistik-Ampirik, Esnek Üstyapı Dizaynı, Tekerelek İzi, Yorulma.

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Murat Vergi Taciroğlu, Mersin Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Mersin.

ABSTRACT

DETERMINATION OF THE INFLUENCING PARAMETERS THAT THE SERVICE LIFE OF FLEXIBLE PAVEMENTS

In this study, it is aimed to make analyzes to determine the parameters that affect the deformation of the road in the best way so that the flexible pavements can serve without damage or with the least damage throughout their service life. The mechanistic-empirical design method, which is compatible with the change of parameters that have an important place in the pavement design and directly affects the results, such as load, loading area, loading conditions, environmental conditions and the definition of layer materials, and which is a frequently used pavement design method recently, has been used. In mechanistic-empirical (M-A) design methods, parameters such as tire load, environmental effects and material properties are used in the stress and strain calculations using basic material mechanics, and the life of the road is estimated with these mechanical response values. In the M-A design method, KENPAVE software developed by Yang H. Huang was used to determine the mechanical responses of the pavement under load. The most common deteriorations and deformations in pavements include rutting and fatigue cracks under the asphalt layer. In the study, the effects of differences in axle load, modulus of elasticity, layer thickness and pavement interruption, which are directly related to pavement performance, on road deterioration were investigated. For this, three different pavement sections with different layer structures were used. By changing the wheel load, elasticity modulus and layer thickness values, different combinations were created and analyzes were made with the help of the KENPAVE program. As a result of the analyzes made, it was understood that the increase in the elasticity modulus greatly affected the road life and the base layer among the layers contributed the most to this effect. While the increases applied to all layers caused an increase in the life of the road, some increases in the sub-base layer caused a decrease in the life of the road. With the increase in axle load, similar reductions in road life were observed. The greatest effect on road life was achieved by increasing the layer thickness of the pavement layer. Increasing the modulus of elasticity of the sub-base layer did not have a significant effect on the increase in road life.

Keywords: KENPAVE, Mechanistic-Empirical, Flexible Pavement Design, Rutting, Fatigue.

Advisor: Lecturer Dr. Murat Vergi Taciroğlu, Department of Civil Engineering, Mersin University, Mersin.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmada danıőmanlıęımı üstlenen, tezin konusunun belirlenmesi, araőtırılması ve yazımı süresince bilgi, tecrübe ve zamanımı esirgemeyerek katkıda bulunan değerli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Murat Vergi TACİROĞLU'na teőekkürü borç bilirim.

Katkılarından dolayı saygıdeğer jüri üyeleri Doç. Dr. Talas Fikret KURNAZ ve Doç. Dr. Cahit GÜRER'e teőekkürlerimi sunarım.

Hayatımın her alanında desteklerini esirgemeyen eőim, ailem ve kardeőim őeyma KARACA'ya sonsuz teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇ KAPAK	i
ONAY	ii
ETİK BEYAN	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
TABLOLAR DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR	xiii
1. GİRİŞ	1
1.1. Konunun Önemi	1
1.2. Karayolunda Üstyapı	1
1.2.1. Esnek Üstyapı	3
1.2.2. Üstyapı Tasarımı	5
1.2.2.1. Üstyapı Tasarım Yöntemleri	5
1.2.3. Tabakalı Sistemler	8
1.2.3.1. İki Tabakalı Sistemler	9
1.2.3.2. Üç Tabakalı Sistemler	9
1.2.4. Üstyapıda Meydana Gelen Bozulmalar	10
2. KAYNAK ARAŞTIRMALARI	12
2.1. Literatür Özetleri	12
2.2. KENPAVE Bilgisayar Programı Tanımı	18
3. MATERYAL ve YÖNTEM	19
3.1. KENPAVE Bilgisayar Programı	21
3.1.1. Ana sayfa Komut Düğmeleri İşlevleri	21
3.1.2. Program Adımları	23
3.2. Üstyapı Modelleri	38
3.2.1. Birinci Model	38
3.2.2. İkinci Model	40
3.2.3. Üçüncü Model	41
4. KENPAVE'DE VERİ ANALİZİ	43
4.1. Birinci Model İçin Analiz Sonuçları	43
4.1.1. Basınç ve Çekme Şekil Değiştirilmesi Hesabı	43
4.1.2. İzin Verilen Yük Tekrar Sayısı Hesabı	46
4.1.3. Yol Ömrü Hesabı	55
4.1.3.1. Yükleme ve Elastisite Modülü Değerlerinin Değiştirilmesi ile Hesap Yapılması	55
4.2. İkinci Model İçin Analiz Sonuçları	58
4.2.1. Basınç ve Çekme Şekil Değiştirilmesi Hesabı	58
4.2.2. İzin Verilen Yük Tekrar Sayısı Hesabı	63
4.2.3. Yol Ömrü Hesabı	72
4.2.3.1. Yükleme ve Elastisite Modülü Değerlerinin Değiştirilmesi ile Hesap Yapılması	72
4.3. Üçüncü Model İçin Analiz Sonuçları	74
4.3.1. Basınç ve Çekme Şekil Değiştirilmesi Hesabı	74
4.3.2. İzin Verilen Yük Tekrar Sayısı Hesabı	80
4.3.3. Yol Ömrü Hesabı	90
4.3.3.1. Yükleme ve Elastisite Modülü Değerlerinin Değiştirilmesi ile Hesap Yapılması	90
4.4. Tabaka Kalınlıklarının Değiştirilmesi ile Hesap Yapılması	93
5. SONUÇLAR	97
KAYNAKLAR	103
ÖZGEÇMİŞ	111

TABLolar DİZİNİ

	Sayfa
Tablo 3.1. Tabaka kalınlıkları ve elastik malzeme özellikleri	19
Tablo 3.2. Tabaka katsayıları	19
Tablo 3.3. Birim Sistemi	26
Tablo 4.1. Farklı kuruluşlar için bozulma modeli katsayıları	46



ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1.1. Esnek ve rijit üstyapı kesiti	2
Şekil 1.2. Tipik bir üstyapı en kesiti	4
Şekil 1.3. Dairesel bir yüke maruz kalan n tabakalı sistem	9
Şekil 1.4. Tek ve çift tekerlek yüklerine maruz kalan üç tabakalı sistemler	10
Şekil 1.5. Timsah sırtı çatlak	10
Şekil 1.6. Tekerlek izinde oturma	11
Şekil 3.1. BSK için izafi mukavemet katsayısı-esneklik modülü dönüşüm grafiği	20
Şekil 3.2. Program ana sayfası	21
Şekil 3.3. LAYERINP'deki çeşitli ekranlardaki giriş parametrelerinin konumu	22
Şekil 3.4 KENPAVE yazılımının ana ekranı için ayrıntılar	23
Şekil 3.5 LAYERINP ana menüsü	23
Şekil 3.6 Ana menüdeki 'Data File'	24
Şekil 3.7 'General' ekranı	25
Şekil 3.8 'Z Coordinates' ekranı	27
Şekil 3.9 'Layer' ekranı	28
Şekil 3.10 'Layer Modulus' ekranı	29
Şekil 3.11 'Layer Moduli Period' ekranı	30
Şekil 3.12 'Load' ekranı	31
Şekil 3.13 'Tekerlek ve dingil dizilimleri'	32
Şekil 3.14 x ve y koordinatlarındaki noktaların sayısı (NPT) için yardımcı form	32
Şekil 3.15 Radyal koordinat sayısı (NR) için yardımcı form	33
Şekil 3.16 'Nonlinear' ekranı	33
Şekil 3.17 Dört alt temel türü için Esneklik modül-sapma-gerilme ilişkisi	34
Şekil 3.18 Veri girişi tamamlandıktan sonra etikette değişiklik	34
Şekil 3.19 'Viscoelastic' ekranı	35
Şekil 3.20 'Damage' ekranı	36
Şekil 3.21 Tandem-dingil yüklerinin hasar analizi	37
Şekil 3.22 Tridem-dingil yüklerinin hasar analizi	38
Şekil 3.23. Birinci modelde kullanılan üstyapı kesiti	39
Şekil 3.24. İkinci modelde kullanılan üstyapı kesiti	40
Şekil 3.25. Üçüncü modelde kullanılan üstyapı kesiti	41
Şekil 4.1. Kaplama tabakasının elastisite modülü değişimine göre basınç şekil değiştirmesi (1. Model)	43
Şekil 4.2. Kaplama tabakasının elastisite modülü değişimine göre çekme şekil değiştirmesi (1.Model)	44
Şekil 4.3. Temel tabakasının elastisite modülü değişimine göre basınç şekil değiştirmesi (1.Model)	44
Şekil 4.4. Temel tabakasının elastisite modülü değişimine göre çekme şekil değiştirmesi (1.Model)	45
Şekil 4.5. Taban zemininin elastisite modülü değişimine göre basınç şekil değiştirmesi (1.Model)	45
Şekil 4.6. Taban zemininin elastisite modülü değişimine göre çekme şekil değiştirmesi (1.Model)	46
Şekil 4.7. Kaplama tabakasının elastisite modülü değişimine göre tekerlek izi oturma için izin verilen yük tekrar sayısı (1.Model)	47
Şekil 4.8. Kaplama tabakasının elastisite modülü değişimine göre yorulma çatlama oluşması için izin verilen yük tekrar sayısı (1.Model)	47
Şekil 4.9. Kaplama tabakasının elastisite modülü değişimine göre 80 kN dingil yükü altında izin verilen yük tekrar sayısının farklı kuruluşlara göre değişimi (%) (1.Model)	48
Şekil 4.10. Kaplama tabakasının elastisite modülü değişimine göre 80 kN dingil yükü altında izin verilen yük tekrar sayısının farklı kuruluşlara göre değişimi (%) (1.Model)	49

	Sayfa
Şekil 4.11. Temel tabakasının elastisite modülü değişimine göre tekerlek izi oturması için izin verilen yük tekrar sayısı (1.Model)	50
Şekil 4.12. Temel tabakasının elastisite modülü değişimine göre yorulma çatlamaşının oluşması için izin verilen yük tekrar sayısı (1.Model)	50
Şekil 4.13. Temel tabakasının elastisite modülü değişimine göre 80 kN dingil yükü altında izin verilen yük tekrar sayısının farklı kuruluşlara göre değişimi (%) (1.Model)	51
Şekil 4.14. Temel tabakasının elastisite modülü değişimine göre 80 kN dingil yükü altında izin verilen yük tekrar sayısının farklı kuruluşlara göre değişimi (%) (1.Model)	51
Şekil 4.15. Taban zemininin elastisite modülü değişimine göre tekerlek izi oturması için izin verilen yük tekrar sayısı (1.Model)	52
Şekil 4.16. Taban zemininin elastisite modülü değişimine göre yorulma çatlamaşının oluşması için izin verilen yük tekrar sayısı (1.Model)	53
Şekil 4.17. Taban zemininin elastisite modülü değişimine göre 80 kN dingil yükü altında izin verilen yük tekrar sayısının farklı kuruluşlara göre değişimi (%) (1.Model)	53
Şekil 4.18. Taban zemininin elastisite modülü değişimine göre 80 kN dingil yükü altında izin verilen yük tekrar sayısının farklı kuruluşlara göre değişimi (%) (1.Model)	54
Şekil 4.19. KENPAVE programı analiz çıktısı	55
Şekil 4.20. Kaplama tabakasının elastisite modülü değişimine göre yol ömrünün değişimi (1.Model)	56
Şekil 4.21. Temel tabakasının elastisite modülü değişimine göre yol ömrünün değişimi (1.Model)	57
Şekil 4.22. Taban zemininin elastisite modülü değişimine göre yol ömrünün değişimi (1.Model)	57
Şekil 4.23. Kaplama tabakasının elastisite modülü değişimine göre basınç şekil değiştirmesi (2.Model)	58
Şekil 4.24. Kaplama tabakasının elastisite modülü değişimine göre çekme şekil değiştirmesi (2.Model)	59
Şekil 4.25. Temel tabakasının elastisite modülü değişimine göre basınç şekil değiştirmesi (2.Model)	59
Şekil 4.26. Temel tabakasının elastisite modülü değişimine göre çekme şekil değiştirmesi (2.Model)	60
Şekil 4.27. Alt temel tabakasının elastisite modülü değişimine göre basınç şekil değiştirmesi (2.Model)	60
Şekil 4.28. Alt temel tabakasının elastisite modülü değişimine göre çekme şekil değiştirmesi (2.Model)	61
Şekil 4.29. Taban zemininin elastisite modülü değişimine göre basınç şekil değiştirmesi (2.Model)	61
Şekil 4.30. Taban zemininin elastisite modülü değişimine göre çekme şekil değiştirmesi (2.Model)	62
Şekil 4.31. Kaplama tabakasının elastisite modülü değişimine göre tekerlek izi oturması için izin verilen yük tekrar sayısı (2.Model)	63
Şekil 4.32. Kaplama tabakasının elastisite modülü değişimine göre yorulma çatlamaşının oluşması için izin verilen yük tekrar sayısı (2.Model)	63
Şekil 4.33. Kaplama tabakasının elastisite modülü değişimine göre 80 kN dingil yükü altında izin verilen yük tekrar sayısının farklı kuruluşlara göre değişimi (%) (2.Model)	64
Şekil 4.34. Kaplama tabakasının elastisite modülü değişimine göre 80 kN dingil yükü altında izin verilen yük tekrar sayısının farklı kuruluşlara göre değişimi (%) (2.Model)	64
Şekil 4.35. Temel tabakasının elastisite modülü değişimine göre tekerlek izi oturması için izin verilen yük tekrar sayısı (2.Model)	65
Şekil 4.36. Temel tabakasının elastisite modülü değişimine göre yorulma çatlamaşının oluşması için izin verilen yük tekrar sayısı (2.Model)	66
Şekil 4.37. Temel tabakasının elastisite modülü değişimine göre 80 kN dingil yükü altında izin verilen yük tekrar sayısının farklı kuruluşlara göre değişimi (%) (2.Model)	66

	Sayfa
Şekil 4.38. Temel tabakasının elastisite modülü değişimine göre 80 kN dingil yükü altında izin verilen yük tekrar sayısının farklı kuruluşlara göre değişimi (%) (2.Model)	67
Şekil 4.39. Alt temel tabakasının elastisite modülü değişimine göre tekerlek izi oturması için izin verilen yük tekrar sayısı (2.Model)	67
Şekil 4.40. Alt temel tabakasının elastisite modülü değişimine göre yorulma çatlama oluşması için izin verilen yük tekrar sayısı (2.Model)	68
Şekil 4.41. Alt temel tabakasının elastisite modülü değişimine göre 80 kN dingil yükü altında izin verilen yük tekrar sayısının farklı kuruluşlara göre değişimi (%) (2.Model)	69
Şekil 4.42. Alt temel tabakasının elastisite modülü değişimine göre 80 kN dingil yükü altında izin verilen yük tekrar sayısının farklı kuruluşlara göre değişimi (%) (2.Model)	69
Şekil 4.43. Taban zemininin elastisite modülü değişimine göre tekerlek izi oturması için izin verilen yük tekrar sayısı (2.Model)	70
Şekil 4.44. Taban zemininin elastisite modülü değişimine göre yorulma çatlama oluşması için izin verilen yük tekrar sayısı (2.Model)	70
Şekil 4.45. Taban zemininin elastisite modülü değişimine göre 80 kN dingil yükü altında izin verilen yük tekrar sayısının farklı kuruluşlara göre değişimi (%) (2.Model)	71
Şekil 4.46. Taban zemininin elastisite modülü değişimine göre 80 kN dingil yükü altında izin verilen yük tekrar sayısının farklı kuruluşlara göre değişimi (%) (2.Model)	71
Şekil 4.47. Kaplama tabakasının elastisite modülü değişimine göre yol ömrünün değişimi (2.Model)	72
Şekil 4.48. Temel tabakasının elastisite modülü değişimine göre yol ömrünün değişimi (2.Model)	73
Şekil 4.49. Alt temel tabakasının elastisite modülü değişimine göre yol ömrünün değişimi (2.Model)	73
Şekil 4.50. Taban zemininin elastisite modülü değişimine göre yol ömrünün değişimi (2.Model)	74
Şekil 4.51. Aşınma tabakasının elastisite modülü değişimine göre basınç şekil değiştirmesi (3.Model)	75
Şekil 4.52. Aşınma tabakasının elastisite modülü değişimine göre çekme şekil değiştirmesi (3.Model)	75
Şekil 4.53. Binder tabakasının elastisite modülü değişimine göre basınç şekil değiştirmesi (3.Model)	76
Şekil 4.54. Binder tabakasının elastisite modülü değişimine göre çekme şekil değiştirmesi (3.Model)	76
Şekil 4.55. Temel tabakasının elastisite modülü değişimine göre basınç şekil değiştirmesi (3.Model)	77
Şekil 4.56. Temel tabakasının elastisite modülü değişimine göre çekme şekil değiştirmesi (3.Model)	77
Şekil 4.57. Alt temel tabakasının elastisite modülü değişimine göre basınç şekil değiştirmesi (3.Model)	78
Şekil 4.58. Alt temel tabakasının elastisite modülü değişimine göre çekme şekil değiştirmesi (3.Model)	78
Şekil 4.59. Taban zemininin elastisite modülü değişimine göre basınç şekil değiştirmesi (3.Model)	79
Şekil 4.60. Taban zemininin elastisite modülü değişimine göre çekme şekil değiştirmesi (3.Model)	79
Şekil 4.61. Aşınma tabakasının elastisite modülü değişimine göre tekerlek izi oturması için izin verilen yük tekrar sayısı (3.Model)	80
Şekil 4.62. Aşınma tabakasının elastisite modülü değişimine göre yorulma çatlama oluşması için izin verilen yük tekrar sayısı (3.Model)	80
Şekil 4.63. Aşınma tabakasının elastisite modülü değişimine göre 80 kN dingil yükü altında izin verilen yük tekrar sayısının farklı kuruluşlara göre değişimi (%) (3.Model)	81
Şekil 4.64. Aşınma tabakasının elastisite modülü değişimine göre 80 kN dingil yükü altında izin verilen yük tekrar sayısının farklı kuruluşlara göre değişimi (%) (3.Model)	81

	Sayfa
Şekil 4.65. Binder tabakasının elastisite modülü değişimine göre tekerlek izi oturması için izin verilen yük tekrar sayısı (3.Model)	82
Şekil 4.66. Binder tabakasının elastisite modülü değişimine göre yorulma çatlamaşının oluşması için izin verilen yük tekrar sayısı (3.Model)	82
Şekil 4.67. Binder tabakasının elastisite modülü değişimine göre 80 kN dingil yükü altında izin verilen yük tekrar sayısının farklı kuruluşlara göre değişimi (%) (3.Model)	83
Şekil 4.68. Binder tabakasının elastisite modülü değişimine göre 80 kN dingil yükü altında izin verilen yük tekrar sayısının farklı kuruluşlara göre değişimi (%) (3.Model)	83
Şekil 4.69. Temel tabakasının elastisite modülü değişimine göre tekerlek izi oturması için izin verilen yük tekrar sayısı (3.Model)	84
Şekil 4.70. Temel tabakasının elastisite modülü değişimine göre yorulma çatlamaşının oluşması için izin verilen yük tekrar sayısı (3.Model)	84
Şekil 4.71. Temel tabakasının elastisite modülü değişimine göre 80 kN dingil yükü altında izin verilen yük tekrar sayısının farklı kuruluşlara göre değişimi (%) (3.Model)	85
Şekil 4.72. Temel tabakasının elastisite modülü değişimine göre 80 kN dingil yükü altında izin verilen yük tekrar sayısının farklı kuruluşlara göre değişimi (%) (3.Model)	85
Şekil 4.73. Alt temel tabakasının elastisite modülü değişimine göre tekerlek izi oturması için izin verilen yük tekrar sayısı (3.Model)	86
Şekil 4.74. Alt temel tabakasının elastisite modülü değişimine göre yorulma çatlamaşının oluşması için izin verilen yük tekrar sayısı (3.Model)	87
Şekil 4.75. Alt temel tabakasının elastisite modülü değişimine göre 80 kN dingil yükü altında izin verilen yük tekrar sayısının farklı kuruluşlara göre değişimi (%) (3.Model)	87
Şekil 4.76. Alt temel tabakasının elastisite modülü değişimine göre 80 kN dingil yükü altında izin verilen yük tekrar sayısının farklı kuruluşlara göre değişimi (%) (3.Model)	88
Şekil 4.77. Taban zemininin elastisite modülü değişimine göre tekerlek izi oturması için izin verilen yük tekrar sayısı (3.Model)	88
Şekil 4.78. Taban zemininin elastisite modülü değişimine göre yorulma çatlamaşının oluşması için izin verilen yük tekrar sayısı (3.Model)	89
Şekil 4.79. Taban zemininin elastisite modülü değişimine göre 80 kN dingil yükü altında izin verilen yük tekrar sayısının farklı kuruluşlara göre değişimi (%) (3.Model)	89
Şekil 4.80. Taban zemininin elastisite modülü değişimine göre 80 kN dingil yükü altında izin verilen yük tekrar sayısının farklı kuruluşlara göre değişimi (%) (3.Model)	90
Şekil 4.81. Aşınma tabakasının elastisite modülü değişimine göre yol ömrünün değişimi (3.Model)	91
Şekil 4.82. Binder tabakasının elastisite modülü değişimine göre yol ömrünün değişimi (3.Model)	91
Şekil 4.83. Temel tabakasının elastisite modülü değişimine göre yol ömrünün değişimi (3.Model)	92
Şekil 4.84. Alt temel tabakasının elastisite modülü değişimine göre yol ömrünün değişimi (3.Model)	92
Şekil 4.85. Taban zemininin elastisite modülü değişimine göre yol ömrünün değişimi (3.Model)	93
Şekil 4.86. Kaplama tabakası kalınlıklarının değişimine göre yol ömrünün değişimi	94
Şekil 4.87. Temel tabakası kalınlıklarının değişimine göre yol ömrünün değişimi	94
Şekil 4.88. Alt temel tabakası kalınlıklarının değişimine göre yol ömrünün değişimi	95
Şekil 4.89. Tabaka kalınlıklarının değişimine göre yol ömrünün değişimi	96

SİMGELER VE KISALTMALAR

Kısaltma/Simge	Tanım
AC	Asfalt Beton
HPCC	Yüksek Performanslı Çimento Beton
CC	Konvansiyonel Beton
SFC	Silika Dumanlı Beton
HVFAC	Yüksek Hacimli Uçucu Kül Beton
FRC	Fiber Betonarme
FRHVFAC	Fiber Takviyeli Yüksek Hacimli Uçucu Kül Beton
BSK	Bitümlü Sıcak Karışım
M-A	Mekanistik-Ampirik
FEM	Sonlu Elemanlar Yöntemi
IRC	Hindistan Yollar Kongresi
MR	Esneklik Modülü
EÜPR	Esnek Üst Yapılar Projelendirme Rehberi
ai	İzafi Mukavemet Katsayısı
ν	Poisson Oranı
E	Elastisite Modülü
TÜİK	Türkiye İstatistik Kurumu
AASHTO	Amerikan Devlet Karayolları ve Ulaştırma Görevlileri Birliği
KGM	Karayolları Genel Müdürlüğü
CBR	Kaliforniya Taşıma Oranı
q	Basınç
H	Tabaka Kalınlığı

1. GİRİŞ

1.1. Konunun Önemi

Bir ülkenin sosyal, kültürel ve ekonomik gelişimi esas olarak karayolu yapısının performansına bağlıdır (Al-Ghafri ve Javid, 2018). Karayolu taşımacılığı, topoğrafyanın çeşitli önkoşulları altında en uyarlanabilir ulaşım şeklidir. Bu nedenle, büyük sermaye yatırımları tahsis edilerek tüm dünyada karayolu taşımacılığının geliştirilmesine öncelik verilmektedir (Teja vd., 2019). Bilindiği üzere Türkiye’de karayolu ulaşımı, hem yolcu hem de yük taşımacılığında tercih edilen ulaşım türleri arasında ilk sırada yer almaktadır. Ayrıca karayolunun ulaştırma sektöründeki payı giderek artan bir eğilim göstermektedir (Avcı, 2009) 2021 Ekim ayı sonu TÜİK verilerine göre son 10 yılda taşıt sayısı %54 oranında artmıştır. Artan taşıt sayısı beraberinde karayolu ihtiyacını getirmektedir. Karayoluna talep arttıkça trafik yükü de artmaktadır. Bu hızlı gelişmelerle birlikte bir taraftan yol kaplamaları daha fazla trafik yüküne maruz kalırken, diğer taraftan da mevcut yol ağlarında yetersizlikler meydana gelmektedir (Tanyıldızı ve Geçkil, 2019).

Ülkemizde izin verilen tek dingil yükü ağırlığı Karayolu Trafik Yönetmeliği’ne göre 10 ton olmasına rağmen karayolundaki araçların dingil yükü ağırlığının 20 ton olmasıyla birlikte, üstyapıya verilen zarar 16 kata kadar artmaktadır. Yol deformasyonlarıyla dingil yükü ağırlıklarının doğrudan ilişkili olduğunu söyleyebiliriz. Yönetmeliği aşan yüklemeler sadece hasara yol açmakla kalmayıp yol emniyetini de etkilemektedir (Everett, 2015).

Trafik yükü yol üstyapılarında yorulma ve tekerlek izi gibi deformasyonlara sebebiyet vermektedir. Bununla birlikte yolun servis ömrüyle ilgili bazı sıkıntılar meydana gelmektedir.

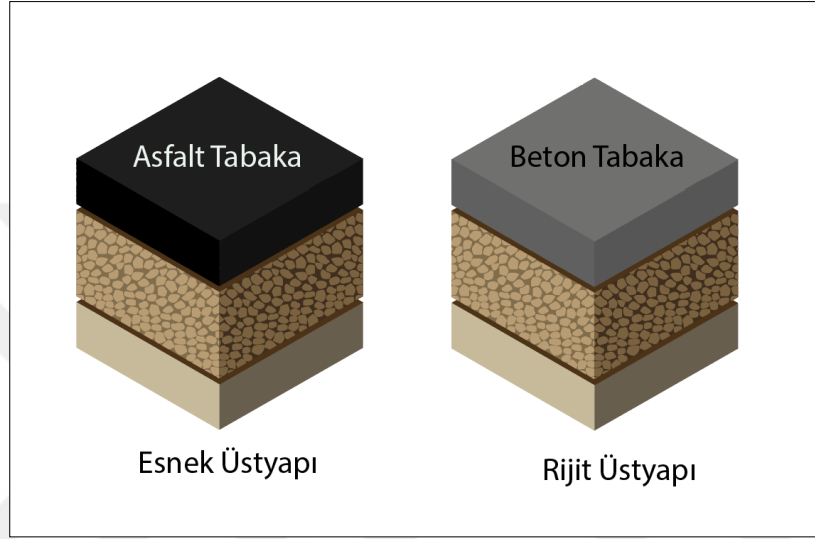
Karayolu alt ve üstyapı olarak iki kısımda incelenebilmektedir. Altyapı dolgu ve yarmalardan oluşmakla birlikte, yol güzergahının belirlenmesi, araziye uygulanması ve arazinin belirlenen geometrik değerlere göre şekillendirilmesidir (Avcı, 2009). Üstyapı ise trafik yükünü taşımak amacıyla kaplama, temel, alt temel gibi tabakaların taban zemini üzerine yerleştirilmesiyle oluşan ve trafik yüklerini altyapıya ileten bir yapıdır (Birinci vd., 2003).

1.2. Karayolunda Üstyapı

Karayolu proje ömrü boyunca bozulmadan ya da en az deformasyonla, her türlü iklim koşulunda ve emniyetli şekilde hizmet verebilmeli ve üzerinden çok sayıda aracın geçmesini sağlayacak koşulları yerine getirebilmelidir (Özgan vd., 2010; Birinci vd., 2003). Proje süresi yolun trafiğe açılışından takviye tabaka ekleninceye kadar geçen yıl ya da iki takviye tabaka arası geçen süreyi ifade etmektedir (Sağlık ve Güngör, 2008). Yolun emniyetli olup olmamasıyla ilgili bilgiyi, yolda belirli bir hızda hareket eden aracın lastiği ile yolun yüzeyi arasında meydana gelen kayma sürtünme katsayısının seviyesi verir (Yamanlar, 2012). Aynı zamanda bir karayolunu kullanıma açarken ki amaç, işletme maliyetinin

düşürülmesi ve yeterli konforda hizmet vermesidir. Ekonomik olarak kazanç sağlanabilmesi için, üstyapı proje süresi boyunca araçlara hasar vermemeli ve araçların işletme maliyetlerini en aza indirmelidir. Konfor ise üstyapının geometrik özellikleri ve kaplama tabakasının özellikleri ile doğrudan ilgilidir (Tığdemir, 1999).

Karayolu üstyapıları, kullanılan malzeme özellikleri ve yapım metodlarına göre esnek üstyapılar ve rijit üstyapılar olarak sınıflandırılabilir. İkisinin bir arada kullanılmasıyla birlikte kompozit kaplamalar meydana gelmektedir (Yamanlar, 2012).



Şekil 1.1. Esnek ve rijit üstyapı kesiti.

Esnek ve rijit üstyapıların farklılık gösterdikleri noktalardan biri trafik yükünü taban zeminine iletme şeklidir. Esnek üstyapılar, alt temel, temel ve kaplama tabakalarından oluşurken, üzerine binen tekerlek yükleriyle birlikte deforme olmakta ve her tabaka, üzerine gelen yükü bir alt tabakaya biraz daha yayarak iletmektedir. Böylelikle taban zeminine ulaşan yük nispeten büyük bir alana yayılmış olmaktadır.

Rijit üstyapılar ise temel tabakanın üzerine inşa edilen beton plaktan meydana gelmektedir. Beton plağın elastisite modülü, taban zemininkinden oldukça büyüktür. Bu açıdan beton yol, trafik yüklerini bu esasa göre, esnek üstyapıya göre daha genişçe bir alana yayıp taban zeminine iletmektedir (Carey ve Irick, 1962).

Kaplama türlerinin her ikisi de ilk inşa edildiklerinde konforlu ve güvenli bir ulaşım sunmaktadır. Rijit üstyapılar açık renkli olmalarından dolayı, gece sürüşünde kolay şekilde görünerek güvenli ulaşım sağlarken, siyah asfalt betondan oluşan esnek üstyapılı yollarda böyle bir durum olmamaktadır (Peterson, 1987). İlk yapım maliyeti beton yolların daha yüksektir fakat asfalt yolların yapımında kullanılan petrol ithal edilirken, beton yolların yapımında kullanılan çimento üretiminde Türkiye önde gelmektedir (Sulten, 2001).

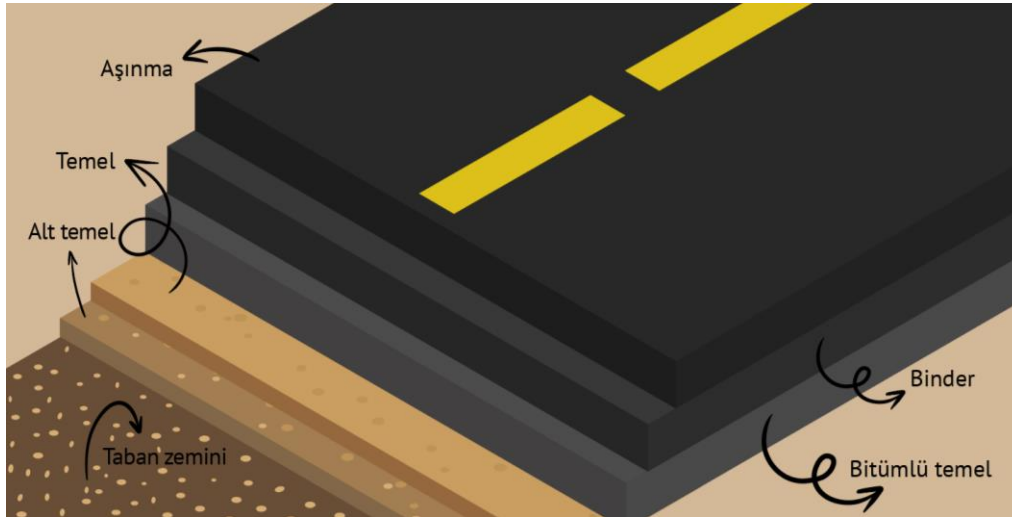
1.2.1. Esnek Üstyapı

Üzerindeki trafik yüklerini bulundurduğu çeşitli tabakalardan aktarır altyapının taşıyabileceği değerlere indirerek, en alt tabakadan en üst tabakaya doğru taşıyıcılık ve nitelik açısından daha iyi performansa sahip malzemelerden yapılan (alt temel, temel ve kaplama), bağlayıcı olarak bitüm kullanılan ve oldukça düzgün yuvarlanma yüzeyi olan tabakalı yol yapısı esnek üstyapıdır (Yağtu, 2019). Esnek üstyapı, birbirleri ile temasta bulunan ve farklı özelliklere sahip olan tabakalardan olduğundan oldukça karmaşık bir sistemdir. Bu nedenle modellenmesinde farklılıklardan kaynaklanan zorluklarla karşılaşmaktadır (Graczyk vd., 2016) Esnek üst yapılar; sıkıştırılmış doğal zeminden oluşan, yapısal yönden en önemli ve üstyapı yükünün en son iletildiği tabaka olan taban zemini üzerine karayolu vasıtalarının güvenliğinin ve konforunun sağlanması, çevresel koşullar ve trafik yüklerine karşı direnç gösterilebilmesi gibi amaçlarla yapılmaktadır (Tunç, 2007; Karaşahin vd., 1993). Taban zemini yarı-sonsuz uzay, bütün tabakalar yatay doğrultuda sonsuz olarak kabul edilmekte ve tabakaların ara yüzeylerinin ise sürekli ve düzgün olduğu düşünülmektedir. Yükleme ise, dairesel alan üzerinde üniform yayılı düşey temas basıncı olarak yapılır (Inoue and Matsui 1990). Viskoelastik davranış sergileyen bitümlü tabakanın da modelleme zorluğundan ötürü lineer elastik davranış sergilediği kabul edilir (Huang, 2004).

- Kaplama tabakası, yüksek standartlı yollarda aşınma ve binder olmak üzere bitümlü iki tabaka, düşük standartlı yollardaysa tek kat ya da çift kat sathi kaplama şeklinde yapılabilmektedir (Bakış, 2018). Sathi kaplamaların imal edilmesinde, asfalt bağlayıcı malzeme olarak asfalt yüzeye püskürtülmektedir ve ardından agrega serilerek ve sıkıştırılmaktadır (Baykara, 2022).
- Aşınma tabakası, trafik için konforlu ve güvenli bir geçiş, emniyet için gerekli kayma dayanımı ve trafiğin düzenini bozmayacak düzgünlükte bir yüzey sağlar. Trafikte dayanımının haricinde sürtünme oluşturmaktan ve su geçirimsizliğini sağlamaktan sorumludur. Ayrıca taşıtlardan su sıçratmaması ve yol yüzeyindeki su birikimlerinin meydana gelmemesi için drenaj özelliği olmalıdır. Direkt olarak trafik yüküyle karşı karşıya kalmakta olan bir tabaka olduğundan çok kaliteli inşa edilmelidir. Kalınlığı en az 4 cm olmalıdır (Birinci vd., 2003; Yamanlar, 2012).
- Binder tabakası, iki durumda inşa edilir. İlki, yüzey tabakasının çok kalın olmasıyla sıkıştırma zorlukları yaşandığında, bunu önlemek amacıyla iki tabaka halinde yapılır. İkincisi ise, daha büyük boyuta sahip agregalardan olduğundan daha az asfalt harcanır ve yüzey tabakasında olduğu gibi yüksek kalite gerektirmediğinden ekonomiktir. Binder tabakası 7,6 cm'den daha derinse, iki tabaka halinde yapılır. En az 4 cm olmalıdır (Birinci vd., 2003).
- Temel tabakası, kaplama tabakasının alt kısmında bulunan ve üstyapının bulunduğu doğal zemini koruyan, görevi üzerine gelen yükleri taşıma gücü sınırları doğrultusunda yaymak olan daneli tabakadır. Alt temel ve tabana gelen basınç gerilmelerini makul seviyeye düşürmeyi ve esneklik sağlayarak kaplamanın kırılmasını engellemeyi amaçlar. Bu nedenle iyi kaliteli malzemeden inşa edilmelidir (Birinci vd., 2003; Yamanlar, 2012).

- Alt temel tabakası, temel tabakasının altında yer alan, başlıca görevi üzerine yapılacak olan tabakaların inşası için uygulama sahası oluşturmak olan, taban yüzeyiyle temel tabakası arasındaki sıkıştırılmış daneli malzeme tabakasıdır. Bu tabakada kullanılan malzemeler kaplama ve temel tabakasına göre daha düşük kalitededir. Alt temel sadece don bölgesindeki, taşıma gücü yeterli olmayan taban zeminleri veya dona hassas taban zeminlerinin üzerine inşa edilir. Aksi halde yapılmaz. Alt temel tabanda meydana gelecek don etkisinin üstyapıya ulaşmasını ve taban zemininin taşıma gücünü aşabilecek yüksek gerilmeleri engelleyecek özelliklerde olmalıdır. Temel ve alt temel ekonomik nedenlerden ötürü ayrı inşa edilir. Alt temelde kullanılan ucuz malzemeyle ekonomi sağlamak amacıyla, temel tabakasını tek yapıp pahalı malzeme kullanmaktansa, alt temelle birlikte temel tabakası inşa edilir. Minimum alt temel kalınlığı 20 cm olmalıdır (Birinci vd., 2003; Yamanlar, 2012).
- Taban zeminini, üst kısmında en az 15cm iyi sıkıştırılmış olan doğal zemininden meydana gelmektedir (Birinci vd., 2003).

Esnek üstyapı, altyapı zemininin yüzeyi olan tesviye yüzeyiyle sağlam temas sağlayan ve trafik yüklerini taban zeminine dağıtan üstyapı şeklidir. Esnek üstyapının dayanıklılığı danelerin birbirine sürtünmesine, kohezyona ve agrega kenetlenmesine bağlıdır (Birinci vd., 2003). Genel olarak, daha az ön maliyet, pürüzsüz sürüş yüzeyi ve uygun bakım koşulları nedeniyle esnek üstyapılar rijit üstyapılara tercih edilir (Teja vd., 2019). Esnek üstyapılar tamamlandıktan birkaç saat sonra kullanıma açılabilirler. İmalatları ve bakım uygulamaları kolaydır ama daha sık bakıma ihtiyaç duyarlar (Umar ve Ağar, 1991).



Şekil 1.2. Tipik bir üstyapı en kesiti.

Proje ömrü genel olarak 20 yıl olan esnek üstyapıların bakım ve onarım ömrü rijit üstyapılara göre farklıdır. Esnek üstyapılardaki bozuklukların her kıs sonunda bakımı yapılmalıdır. İlk 5 yıldan sonra küçük bir onarım ve kaplama gerekebilmektedir. 10. Yılda ise, yol yüzeyinde yenilenme ve pürüzlendirme gerekebilmektedir. Ardından bir 5 yıl daha hizmet verdikten sonra, ilk 5. Yılda yapılan

işlemler gibi onarım gerekmektedir. 20. yıl sonunda zorunlu olarak yeni üstyapı takviyesi yapılmalıdır. Çünkü tasarım ömrünün sonuna gelinmiş olur. Ayrıca temel ve alt temelde de bakım ve onarım yapılması gerekebilmektedir (Vqyeux, 2001).

Tabakalarda kullanılan malzemeler farklı olduğundan gösterdikleri davranışlarda farklıdır. Temel ve alt temelde kullanılan malzemeler non-lineer elastik davranış gösterirken, aşınma tabakasında visko-elastik davranış gösteren bitümlü karışımlar kullanılmaktadır (Avcı, 2009). Sıcaklık etkisi, malzeme ve yükleme özellikleri ve yapısal modeller esnek kaplama tasarımı için dikkat edilen temel parametrelerdir (Alzaim, 2019).

1.2.2. Üstyapı Tasarımı

Üstyapı tasarımı, kaplamada meydana gelen tepkilerin belirli bir sınır değeri aşmaması amacıyla üstyapı kesitinin ve ideal tabaka kalınlıklarının tespit edilmesi olarak tanımlanabilmektedir (Chen, 2009). Karayolları üst yapılarının yapım maliyetlerinin fazla olmasından dolayı, karayolu bütçelerinin verimli kullanılması için en iyi tasarım yönteminin uygulanması gerekmektedir. Yeni inşa edilecek ya da takviye tabakası yapılacak üst yapıların tasarımındaki yenilik ve gelişme, üstyapı bakım masraflarını azaltmak için önemli imkanlar sağlamıştır. Üstyapı tipi seçimi, birçok ölçüte dayandırılması gereken oldukça geniş bir konudur (Yoder ve Witczak, 1975).

Bunları sağlamak amacıyla ideal üstyapı tabaka kalınlıkları belirlenerek üstyapı tasarımı yapılmaktadır (Özgan vd., 2010). İlgili tasarım yönteminin ve en uygun üstyapı tipinin seçilmesi, hizmet ömrü ile üstyapı performansının iyileştirilmesi ve başlangıç ile bakım maliyetinin azaltılması için oldukça önemlidir. Hizmet ömrü boyunca üstyapının maruz kaldığı birçok sıkıntı, iklim koşullarının, malzeme özelliklerinin ve trafik yüklemesinin çeşitliliğinden kaynaklanmıştır (Al-Ghafri ve Javid, 2018). Yollar diğer mühendislik yapılarından ayrı olarak sonsuz yapılar olmalarından dolayı farklı kesitlerde çeşitli tepkiler göstermektedir. Ayrıca üstyapı tabakalarının her biri de farklı tepkiler göstermektedir. Bu da üstyapı tasarımını oldukça zorlaştırmaktadır (Umar ve Ağar, 1991).

1.2.2.1. Üstyapı Tasarım Yöntemleri

Karayolları Genel Müdürlüğünün (KGM) ilk üstyapı projelendirme rehberi 1969 yılında yayımlanan, Karayolları esnek üstyapı projelendirmesine ait şartnamedir. 1984'te ise, AASHTO 72 projelendirme kriterlerini esas alan, "Karayolları Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi" hazırlanmıştır. Rehberde genel olarak, asfalt betonu kaplamalı yollarla sathi kaplamalı yolların projelendirmesi birbirinden ayrılmıştır. Ayrıca projelendirmede standart tek dingil yükü tekerrür sayısı kullanılmaya başlanmıştır. 1984-2002 yılları arasında ise taşıt eşdeğerlik faktörleri, uygulama kaynaklı aksaklıklar ve takviye projelendirmesi eksiklikleri düzenlenmiştir (Özcanan ve Akpınar, 2014).

Geçmiş yıllara bakıldığında üstyapı durumunu belirlemede kullanılan yöntemin araziden numune alıp test etmek koşuluyla, laboratuvarlarda gerçekleştiğini görebiliriz. Bu yöntem karayollarında tahribata sebebiyet vermekteydi. Gelişen teknolojiyle birlikte test aletleri de gelişmiş ve tahribatsız şekilde üstyapı durumu tespiti yapmak oldukça kolaylaşmıştır (Alexander, 1990). Özellikle son yıllarda ilgili kurumların bu konularda gelişme kaydettiğini görmekteyiz. Karayolunda üstyapı durum tespitinde tahribatsız metodlar gibi en etkili ve ekonomik metodlar seçilmelidir. (Zhou vd., 1992).

Üstyapı tasarımında kullanılan birçok yöntem sayabiliriz. Bunlardan bazılarını sıralayacak olursak:

- Deplasman sınır yöntemi: Kaplamaların kalınlığını belirlemek için kullanılır, böylece düşey defleksiyon izin verilen sınırı aşmaz. Kansas Eyalet Karayolu Komisyonu (1947), Boussinesq denklemini (Boussinesq, 1885) değiştirdi ve alt temelin defleksiyonunu 2,54 mm ile sınırladı. ABD Donanması (1953), Burmister'in iki tabakalı teorisini (Burmister, 1943) uyguladı ve yüzey sapsmasını 6,35 mm ile sınırladı. Defleksiyonun bir tasarım kriteri olarak kullanılması, sahada kolayca ölçülebilmesi gibi belirgin bir avantaja sahiptir. Ne yazık ki, kaplama bozulmalarına defleksiyon yerine aşırı gerilme ve birim şekil değiştirme neden olmaktadır (Huang, 2004).
- Ampirik yöntem: Günümüzde yol dizaynı için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemle, yol malzemesinin özellikleri, iklimsel koşulları ve trafik yükü dikkate alınarak yolun belirli gerilme-deformasyon değeri için oluşacak deformasyonlara göre yolun davranışı ve performansı tahmin edilebilir (Ali, 2005). Ayrıca bu yöntemde kullanılan en yaygın deney Kaliforniya'da 1930'larda James Porter'ın geliştirdiği CBR (Kaliforniya Taşıma Oranı) CBR yöntemi ilk başlarda havaalanı kalınlık tasarımında kullanılmıştır. Sonrasında ise yol üstyapılarında kullanılmıştır. Zemin ve granüler malzemenin CBR değeri dikkate alınarak üstyapı tabaka kalınlıkları hesaplanmaktadır (Porter, 1950; Özcanan ve Akpınar, 2014). Ampirik yöntemler uygulamalar aracılığıyla elde edilen bilgi birikimleri ve özel test yollarından edinilen deneyimlere dayanan yani deneysel ve gözlemsel sonuçları temel alan bir yöntemdir. Bundan dolayı bu yöntem, uygulandığı test yolunun koşullarından daha çeşitli şartlarda uygun sonuçlar verememektedir (Whiteoak vd., 2004; Carvalho, 2006). Arazi koşullarını laboratuvar ortamında oluşturmak mümkün olmadığı için, yalnızca ampirik yöntemler yol tasarımı için yetersiz kalmaktadır (Bostancıoğlu, 2018)
- Analitik tasarım yöntemi: Teorik analiz ve bitümlü malzemelerin mekanik özelliklerini kullanmakta olup her şartta uygulanabilmektedir (Whiteoak vd., 2004). Bu yöntemlerden biri Shell yönteminde, malzeme özellikleri, çevresel koşullar ve tahmin edilen trafik yükü dikkate alınarak bilgisayar programıyla tabaka kalınlıkları belirlenir (Brown, 1980). Geçtiğimiz yirmi beş yılda analitik yöntemlerle ilgi birçok araştırma yapılmış ve ilerleme kaydedilmiştir. Çalışmalara hizmet eden bilgisayar programları geliştirilmiştir. İlk etapta bu programları yalnızca şirketler kullanırken kişisel bilgisayarlarla birlikte birçok mühendiste yararlanmış. Yöntem, üstyapıdaki trafik yükleri sonucu zemin ve alt temel arasında deformasyon oluşumunu ve bitümlü tabakada çatlak oluşumunu engelleyecek asfalt kaplama tabakasını tasarlama prensibiyle çalışır. Yöntemde malzemeler poisson oranı ve esneklik modülü ile karakterize edilmiştir (Berberoğlu, 2004).
- Mekanistik-ampirik yöntem: Araştırmacıların analitik yöntemle modellenemeyen bazı etkenlerinde üstyapıda rolü olduğunu tespit etmesiyle, gerçeğe daha yakın sonuçlar veren

mekanistik-ampirik yöntemler geliştirilmiştir. Mekanistik-ampirik yöntemde trafik yükü, yol malzemesinin fiziksel özellikleri ve iklim faktörü, yolu etkileyen üç ana faktördür. Mekanistik-ampirik yöntemlere örnek olarak verilebilecek AASHTO 93 yönteminde, AASHTO'nun (Amerikan Devlet Karayolları ve Ulaştırma Görevlileri Birliği) 1956-1958 yılları arasında Illinois'in Ottawa kentinde inşa ettiği ve içerisinde farklı tip kalınlıklarda kaplamalar içeren deneme yolu sonuçlarından yararlanılmıştır (Schwartz ve Carvalho, 2007; Berberoğlu, 2004). Bu yıllardaki ampirik tasarım çalışmalarının dezavantajı elde edilen denklemler sadece Illinois test parkurundaki koşulları tamamen yansıtmamasıdır (Mashayekhi vd., 2011; Lu vd., 2014).

AASHTO yöntemi, yükleme miktarı, uygulanan yük sayısı, kaplama tabaka kalınlığı, dingil tipi ve kaplama servis yeteneği arasındaki ampirik ilişki kurmaktadır (Berberoğlu, 2004). AASHTO 93 üstyapı tasarımı ülkemizde de kullanılan regresyon tabanlı ampirik bir yöntemdir (Sağlık ve Güngör, 2008).

Mekanik-ampirik yöntemde KENPAVE yazılım programı ile analizler yapılmaktadır. KENPAVE programı Burmister'in geliştirdiği katsayılar ve abaklar ile iki ve üç tabakalı sistemlerin gerilme ve deformasyonlarını hesaplayabilmektedir. Üç tabakalı sistem analizinde pek çok yaklaşım vardır. KENPAVE Jones'in geliştirdiği yaklaşımı temel kabul etmiştir. Programın tarafından hesaplanan birim şekil değiştirme ve gerilme sonuçları Jones'in yaklaşımıyla aynıdır (Yılmazok, 2019).

Burmister'in iki tabakalı sistem teorisi, her şeyden önce, gerçek olayların doğasının daha iyi anlaşılması için bir temel sağlamak ve yük-oturma ilişkilerini kontrol eden fiziksel faktörler arasında var olan bazı temel ilişkileri ortaya çıkarmak amacıyla sunulmuştur. Teori, 'iki tabakalı sistem'in yük-oturma özellikleri üzerindeki iki önemli oranın kontrol edici etkisini ortaya koymaktadır: İlki yarıçap taşıma alanının takviye veya kaplama tabakasının kalınlığına oranı r/h_i , ikincisi alt zemin modülünün kaplamasının E_i/E_1 oranı (Burmister, 1943).

Bu çalışmadaki esnek kaplama analizi, Burmister'in elastik tabakalar için gerilme ve birim şekil değiştirme tepkileri teorisine dayanmaktadır (Burmister, 1945) Bu teori, gerilme ve birim şekil değiştirme tepkilerini analiz etmek için KENLAYER yazılımında benimsenmiştir (Huang, 2004).

Bu tasarım yönteminin kullanılabilmesi amacıyla bulunan gerilme, birim şekil değiştirme veya deplasman değerlerinin tekerlek izinde oturma, yorulma çatlaması ve pürüzlülük gibi kaplama davranışlarını yansıtan bir parametreye dönüştürülmesi gereklidir (Ekwulo ve Eme, 2009).

Yorulma çatlakları kaplamada tekrarlı yüklemeye birlikte meydana gelen bir bozulma tipidir (Bostancıoğlu, 2018). Mekanik-ampirik tasarım yönteminde, kaplama deformasyonu belirlenirken yorulma çatlaması ve tekerlek izi olarak iki tür yorulma çeşidi kullanılmıştır. Yorulma çatlağına sebep olan ve kaplamanın yorulma ömrü olarak tanımlanan yük tekrar sayısını belirlemek amacıyla, dingil yüklerinden dolayı üstyapı tabakasının altındaki maksimum yatay birim şekil değiştirme kullanılmıştır. Tekerek izine neden olan yük tekrar sayısını tespit etmek amacıyla ise dingil yüklerinden dolayı yüzey tabakasının altındaki düşey birim şekil değiştirme kullanılmıştır (Dawid ve Piotr, 2018).

Tekerlek izi hasarına neden olan yük tekrar sayısı, yorulma çatlamaına neden olan yük tekrar sayısından genel olarak düşük çıkmaktadır. Yani kaplamada yorulma çatlaklarından çok önce tekerlek izi hasarı oluşmaktadır. Tekerlek izi deformasyonunun oluşmasındaki en önemli etken kalıcı oturmadır. (Khanal vd., 2016).

Yol üstyapısında trafik yükleri, araçların hareket etmesiyle, dingil yüklerinden dolayı meydana gelen radyal çekme ve basınç gerilmeleri ile düşey basınç gerilmelerinden oluşmaktadır. Trafik yüklerinin mertebesi ve şiddeti meydana gelen gerilmelerin tekrar etmesiyle doğrudan ilişkilidir. Karayolu üstyapı tasarımı yapılırken amaç, her bir tabakada kullanılacak malzeme özelliği tespit edilerek, muhtemel tekrar edecek yükleri, çevresel koşullar altında, çatlama ve büyük deformasyonlar meydana gelmeden olabildiğince güvenli bir şekilde taşıyabilecek tabaka kalınlıklarının belirlenmesidir (Ağar vd., 1998)

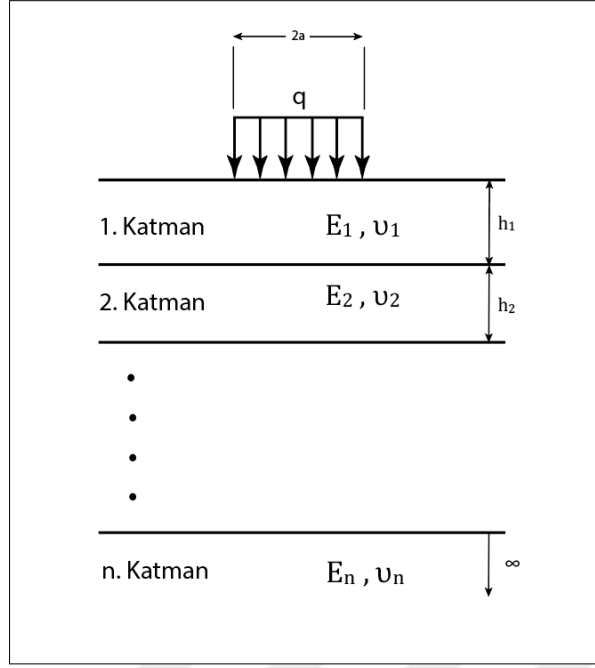
Yolda kullanılan malzemenin davranış parametrelerini her mevsim için tek bir değer kabul etmek ve trafik yükünü standardize ederek bu faktörleri özetlemektense, bütün kombinasyonlarının toplanarak yol tabakalarının analiz edilmesiyle daha iyi sonuçlar elde edilebilir (Özcanan ve Akpınar, 2014)

1.2.3. Tabakalı Sistemler

Esnek kaplamalar, üstte daha iyi malzemelere sahip tabakalı sistemlerdir ve homojen bir kütle ile temsil edilemez, bu nedenle Burmister'in tabakalı teorisinin kullanımı daha uygundur. Burmister (1943) önce iki tabakalı bir sistem için çözümler geliştirdi ve ardından bunları üç tabakalı bir sisteme genişletti (Burmister, 1945). Bilgisayarların ortaya çıkmasıyla teori, herhangi bir sayıda tabakaya sahip çok tabakalı bir sisteme uygulanabilir hale gelmiştir (Huang, 2004).

Yerine getirilmesi gereken temel varsayımlar şunlardır:

- Her tabaka homojen, izotropik ve bir elastik modül E ve bir Poisson oranı ν ile doğrusal olarak elastiktir.
- Malzeme ağırlıksızdır ve alansal olarak sonsuzdur.
- Her tabakanın sonlu bir kalınlığı (h) vardır, ancak en alttaki tabakanın kalınlığı sonsuzdur.
- Yüzeye a yarıçaplı dairesel bir alan üzerinde düzgün bir basınç (q) uygulanır.
- Süreklilik koşulları, aynı düşey gerilme, kayma gerilmesi, düşey yer değiştirme ve radyal yer değiştirme ile gösterildiği gibi tabaka arayüzlerinde yerine getirilir. Sürtünmesiz arayüz için, kayma gerilmesi ve radyal yer değiştirmenin sürekliliği, arayüzün her iki tarafında sıfır kayma gerilmesi ile değiştirilir (Huang, 2004).



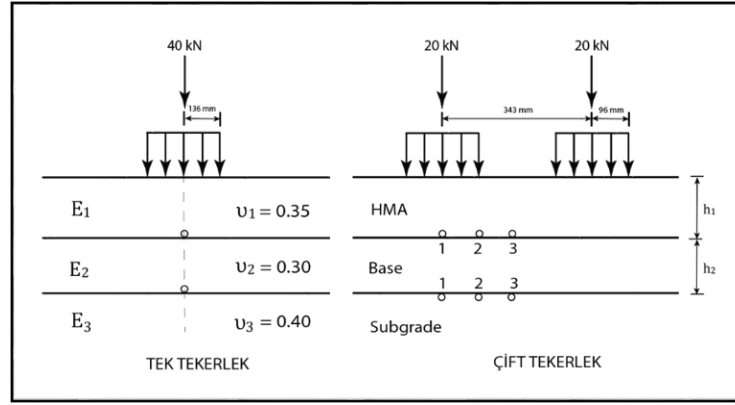
Şekil 1.3. Dairesel bir yüke maruz kalan n tabakalı sistem (Huang, 2004).

1.2.3.1. İki Tabakalı Sistemler

İki tabakalı bir sistemin kesin durumu, kalın bir BSK tabakasının doğrudan alt zemine yerleştirildiği tam derinlikli yapıdır. Bir kaplama üç tabakadan oluşuyorsa (örneğin, bir asfalt yüzey tabakası, bir taneli temel tabakası ve bir alt temel), asfalt tabakasındaki gerilmeleri ve şekil değiştirmeleri hesaplamak için temel tabakasını ve alt temeli tek bir tabakada birleştirmek veya alt temeldeki gerilmeleri ve şekil değiştirmeleri hesaplamak için asfalt yüzey tabakasını ve temel tabakasını birleştirmek gerekir.

1.2.3.2. Üç Tabakalı Sistemler

Bazı tasarım faktörlerinin kaplama tepkileri üzerindeki etkisini göstermek için, Şekil 1.3'te gösterildiği gibi bir elastik üç tabakalı sistem kullanılır. Değerlendirilecek değişkenler, tabaka kalınlıkları h_1 ve h_2 ve tabaka modülleri E_1, E_2 ve E_3 tiplerini içerir. İki tür tekerlek yükü dikkate alınır: biri tek bir tekerlekte ve diğeri 343 mm'lik çift aralıklı bir çift tekerlek setinde. Tek bir tekerlek için 136 mm, çift tekerlek için 96 mm temas yarıçapı varsayılmıştır. Bu yarıçaplar, 690 kPa'lık bir temas basıncı uygulayan 80 kN tek aks yüküne dayanmaktadır. Üç tabaka için poisson oranları sırasıyla 0,35, 0,3 ve 0,4'tür. Bir dizi ikili tekerlek için, Şekil 1.3'te gösterildiği gibi 1, 2 ve 3 noktalarındaki gerilmeler hesaplanır ve üçü arasında en büyüğü en kritik olarak seçilir.



Şekil 1.4. Tek ve çift tekerlek yüklerine maruz kalan üç tabakalı sistemler (Huang, 2004)

1.2.4. Üstyapıda Meydana Gelen Bozulmalar

Asfalt betonda meydana gelen bozulmalar kırılma veya çatlama, yama ve oyuklar, yüzey deformasyonu ve yüzey hataları olarak dört ana başlıkta incelenebilmektedir. Bunlardan birkaçını içeriğine bakacak olursak:

- Yorulma kırılması (Timsah sırtı çatlak): Dayanıklı olmayan temel veya taban zemini yüzünden, yüklemeye ya da tekrarlı yüklerden dolayı bir süre sonra oluşabilmektedir. Öncelikle boyuna çatlaklar oluşur ve sonrasında enine çatlaklarında oluşmasıyla birleşirler (Terzi, 2004). Çatlaklar önemlerine göre ayrılır. Parçalanmamış veya yarıkları doldurulmamış çatlaklar düşük, gözle görünür şekilde parçalanmış çatlaklar orta, kırık parçalar trafikle birlikte yer değiştirdiyse bu tür çatlaklar yüksek önemde kabul edilir (SHRP, 1993).



Şekil 1.5. Timsah sırtı çatlak (Bağdatlı, 2010).

- Tekerlek izi oturma: Asfalt betonu kaplamalarda tekerlek etkisi ile oluşmaktadır. Tekerlek izleri, kaplamanın altındaki bir ya da birden fazla tabakada oluşabilir. Trafik yüklerinin etkisiyle konsolidasyon ya da yanal hareketlerle kaplamanın kendinden oluşan yer değiştirmeler sonucu oluşabilmektedirler. Tekerlek izi oturma, aynı zamanda kalıcı deformasyonların birikiminden oluşabilmektedir. Genel olarak yoğun ve ağır trafikli üstyapılarda karşılaşılmaktadır (Bağdatlı, 2010)



Şekil 1.6. Tekerlek izinde oturma (Terzi, 2004)

2. KAYNAK ARAŞTIRMALARI

2.1. Literatür Özetleri

Abut vd. (2022), çalışmalarında esnek üstyapı tasarımında mekanistik-ampirik yöntem kullanan KENPAVE yazılımına, Karayolları Genel Müdürlüğü, Esnek Üstyapı Projelendirme Rehberi'nde bulunan tasarım kombinasyonlarından senaryolar girerek yolun servis ömrünü tahmin etmeyi amaçlamışlardır. Tabakalı ve elastik bir kaplama sisteminin tanımlanmasının ardından taban zemini üst noktasındaki düşey basınç gerilmesinden kaynaklanan tekerlek izi deformasyonu ve asfalt tabaka alt noktasındaki yatay çekme gerilmesinden kaynaklı yorulmaya ait hasar modelleri programa girilmiştir. Sonraki adımda AASHTO 93 esnek üstyapı tasarım parametreleri olan toplam mevcut SN değeri, taban zemini-MR ve trafik kategorisi gibi değerlerin servis ömrüne etkileri, duyarlılık analiziyle incelenmiştir. Karar parametrelerinin servis ömrü üzerindeki duyarlılıkları dikkate alındığında taban zemini-MR etkisi ve dingil yükü sayısının %95 güven aralığında anlamlı olduğu ve dingil yükü sayısının, servis ömrünü taban zemini-MR'a göre daha fazla etkilediği bulunmuştur.

Al-Ghafri ve Javid (2018) çalışmasında farklı yükleme, malzeme özellikleri ve sıcaklık rejimleri altında rijit üstyapı için manuel ve bilgisayar tasarımı arasında bir karşılaştırma yapmayı amaçlamıştır. Manuel tasarım için Westergaard Yöntemi, bilgisayar tasarımı için KENPAVE yazılımı kullanılmıştır. Gerilme analizi sonuçlarına göre, kenar gerilimlerinin iç ve köşe konumuna kıyasla daha yüksek olduğu ve Westergaard yöntemiyle tüm konumlarda tahmin edilen gerilimlerin, tahmin edilen gerilimlerden önemli ölçüde daha düşük olduğu bulunmuştur.

Arifi (2021), çalışmasında beş çok tabakalı konfigürasyon tasarlamıştır. Tüm konfigürasyonlara hareketli bir yük uygulamıştır. Yang H. Huang'ın geliştirdiği KENPAVE programıyla analizler gerçekleştirilmiştir. KANPAVE ile her konfigürasyon için izin verilen yük değerleri analiz edilmiştir. Daha çok bilgi için yükler farklı hızlarda da taşınarak farklı hızlardaki yükler analiz edilmiştir. Çalışma sonucunda bitümlü tabakanın kalınlığının artmasıyla kaplamanın tasarım ömrünün de arttığı tespit edilmiştir. Bu tespit asfalt betonun tabaka kalınlığı ve izin verilen yük itibarı arasındaki ilişkiyi ortaya çıkarmıştır. Ayrıca, yükün hızının artmasıyla kaplamanın tasarım ömrünün de arttığı saptanmıştır. Bu da izin verilen yük itibarı ve hız arasındaki ilişkiyi ortaya koymuştur.

Babu vd. (2013) Yüksek Performanslı Çimento Beton (HPCC) kaplamaları üzerine kapsamlı bir araştırma çalışması yürütmüşlerdir. Çalışmanın bir parçası olarak, laboratuvarında üçüncü nokta yükleme kullanılarak Konvansiyonel Beton (CC), Silika Dumanlı Beton (SFC), Yüksek Hacimli Uçucu Kül Beton (HVFAC), Fiber Betonarme (FRC) ve Fiber Takviyeli Yüksek Hacimli Uçucu Kül Beton (FRHVFAC) için statik eğilme dayanımları belirlenmiştir. Yüksek Performanslı Çimento Beton kırıntı numuneleri üzerinde laboratuvar yorulma testleri gerçekleştirilmiş ve kırılmaya kadar tekrar sayısı belirlenmiştir. Sonuçlar kullanılarak yorulma modelleri ve gerilme çizelgeleri geliştirilmiş ve HPCC'lerin döşeme kalınlıkları tasarlanmıştır. KENPAVE bilgisayar programıyla HPCC kaplamaları

ve kaplamaların tasarım ömrü analiz edilmiştir. Elde edilen kritik eğilme gerilmeleri, deneysel çalışmadan elde edilen gerilmelerle karşılaştırılmıştır. KENPAVE yazılımından elde edilen eğilme gerilmelerindeki değişim, gerçek eğilme gerilmeleriyle karşılaştırıldığında %5 ile %6 arasında değişmektedir. KENPAVE yazılımı kullanılarak yapılan hasar analizi, elde edilen tahmini tasarım ömrünün çeşitli HPCC'ler için %1 ile %12 arasında olduğunu göstermektedir. %12'lik varyasyon, Fiber Takviyeli HPCC'ler için olması, fiber takviyeli HPCC'lerin tasarım ömrünün daha fazla olduğunu göstermiştir.

Behiry (2012), çalışmasında, dingil yükü artışının ve kaplama elastikliğindeki değişimin genel kaplama ömrü üzerindeki etkisini incelemeyi amaçlamaktadır. Esnek kaplama, dingil yükü sınırlarına ve iklim koşullarına göre tasarlanmıştır. Mısır yönetmeliği, aşılması gereken belirli yük sınırlarını belirlemiştir. Aşırı yüklü kamyonlar kaplamada ciddi bozulmalara neden olur ve böylece ömrünü kısaltır. Araştırma, asfalt betonu (AC) tabakası altında meydana gelen çekme gerilmelerini ve alt temel yüzeyinin üzerindeki basınç gerilmelerini tahmin etmek için BISAR yazılımını ve Mısır çevre ve kaplama malzemeleri koşullarını kullanmaktadır. Sonuçlar, dingil yüklerinin artmasıyla çekme ve basınç gerilmesinin arttığını ve asfalt tabaka elastikliğinin artmasıyla azaldığını, bu nedenle ihlal eden kamyonların ağırlıkları belirli sınırları aştığında boşaltılması gerektiğini ortaya koymuştur. Taban kalınlığı ve alt temel esneklik modülü, yorulma ve tekerlek izi ömürleri arasındaki dengeyi kontrol eden kilit unsurlardır.

Bostancıoğlu (2020), çalışmasında esnek üst yapı kesitinin, bitümlü sıcak karışım (BSK) yüzey tabakası ile temel tabakasının değişen rijitlik ve kalınlık oranlarına göre yol ömrü analizleri M-A yöntem ve AASHTO kullanılarak yapılmış ve ardından sonuçlar arasında kıyaslama yapılmıştır. Analizler neticesinde AASHTO yöntemine en uyumlu sonuçlar veren iki modelin yorulmaya bağlı Shell modeliyle tekerlek izinde oturmaya bağlı Ulaşım ve Yol Araştırma Laboratuvarı modelleri olduğu saptanmıştır.

Bostancıoğlu (2021/A), çalışmasında yolun hizmet ömrünün artırılmasını amaçlayarak lineer fonksiyonel derecelendirme uygulaması yapmıştır. Mekanistik-ampirik yöntem ile yapılan analizlerde Asfalt Enstitüsü yöntemine göre yolun tekerlek izinde oturma ömrünün %36,4, yorulma ömrünün ise %62,3'e varan oranlarda arttığı saptanmıştır.

Bostancıoğlu (2021/B), çalışmasında seçilen bir üstyapı kesiti için çeşitli ampirik modeller ile yol ömrü analizleri yapmıştır. Temel tabakası ve yüzeyin değişen kalınlık ve rijitlik oranlarına göre transfer denklemlerini birbirleriyle karşılaştırmıştır. Çalışmanın neticesinde elde edilen sonuçlar tüm kuruluşlar için yorulma modelleri ile hesaplanan yol ömrü değerlerinin tekerlek izi modelleri ile hesaplanan değerlerden daha az olduğunu görülmüştür.

Ghadimi vd. (2014) çalışmalarında, örnek olarak inşa edilmiş bir üstyapı modeli üzerinde, granüler malzemeler için doğrusal olmayan analiz gerçekleştiren KENLAYER, bağlı kaplama malzemesi davranışını modellemek için kullanılan CIRCLY ve çok tabakalı granüler malzemelerin karmaşık davranışını modellemek amacıyla kullanılan ABAQUS bilgisayar programları ile sayısal

modellemenin sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Ayrıca, poisson oranının esnek kaldırımın yüzey defleksiyonlarına etkileri üzerine parametrik bir çalışma yapılmıştır. Granüler tabakaların Poisson oranındaki artışın yüzey gerilimini azalttığı, asfalt tabakasının Poisson oranındaki artışın yüzey defleksiyonunu artırdığı tespit edilmiştir.

Ghanizadeh ve Ziaie (2015), çalışmalarında, mekanik-Ampirik (M-E) yöntemi kullanılarak bir üstyapının tasarlanmasında ilk adım olarak kaplamanın analizi ve çeşitli yükler altında kaplamanın kritik tepkilerini hesaplamayı amaçlamışlardır. Bu, M-E yönteminin analitik bir temeli olarak kaplama analiz yazılımı geliştirme ihtiyacını doğrulamaktadır. Bu amaçla, esnek üstyapıların lineer ve nonlineer analizi için NonPAS programı geliştirilmiştir. Geliştirilen program, K- θ , Uzan, Uzan-Witczak, MEPDG 2002 ve Bilinear modeller dahil olmak üzere beş nonlineer model kullanılarak esnek kaplamaların doğrusal olmayan analizine izin verir. Bu kurucu modelleri kullanarak esnek kaplamaların nonlineer analizi, granüler malzeme davranışının daha doğru bir modellenmesini sağlar. Geliştirilen program, en fazla altı dairesel yüke maruz kalan maksimum 10 tabakadan oluşan bir kaplama sistemini analiz etmek için kullanılabilir. NonPAS programı, 400 farklı kaplama noktasında tepkilerin hesaplanmasına izin verir. Doğrusal ve doğrusal olmayan analiz sonuçlarını doğrulamak için NonPAS'dan elde edilen sonuçlar, KENLAYER programı kullanılarak elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, hem doğrusal hem de doğrusal olmayan analiz kullanılarak elde edilen ve geliştirilen programın kaplama analizi ve tasarımı amacıyla yüksek güvenilirlikle kullanılabileceğini onaylayan yanıtlar arasında çok iyi bir uyum olduğunu göstermektedir.

Haron vd. (2013), çalışmalarında, çeşitli tekerlek şişirme basınçlarının esnek üstyapı için tekerlek temas/kaplama izi alanının belirlenmesine etkilerini değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Son yıllarda, aşırı şişirilmiş tekerlek basıncı ve artan ağır vasıtaların dingil yükünün esnek kaplamalara verdiği tepkiler üzerindeki etkisi, daha yüksek gerilme seviyesinin neden olması ve kaplamalara daha fazla zarar vermesi nedeniyle büyük endişe konusu haline gelmiştir. Malezya'nın Klang Valley kentindeki iki büyük otoyolda mevcut tekerlek şişirme basıncı seviyeleri hakkında veri toplamak için bir anket yapılmıştır ve daha sonra 1: 1: 2 dingil konfigürasyonuna, 10 R 20 tekerlek boyutuna ve sabit dingil yüküne sahip ekli römorka sahip bir ağır vasıta üzerinde tam ölçekli bir deney yapılmıştır. Veriler, o bölgedeki ağır vasıtaların tekerlek şişirme basıncının operasyonel seviyelerinin 827 kPa (120 psi) kadar yüksek olduğunu gösterdi. Geleneksel dairesel alan yöntemi kullanılarak hesaplanan gerçek tekerlek kaplama temas alanı ile tekerlek temas alanı arasındaki karşılaştırma, %10'a varan bir fark gösterdi. Ölçülen gerçek tekerlek kaplama temas alanının etkilerini analiz etmek için KENPAVE doğrusal elastik programı kullanılmış ve sonuçlar geleneksel dairesel tekerlek temas alanı kullanılarak karşılaştırılmıştır. Yüksek tekerlek şişirme basıncının daha az temas alanı ürettiği ve geleneksel dairesel tekerlek temas alanı yöntemine kıyasla esnek kaplama üzerinde daha zararlı etki yarattığı bulunmuştur. Bununla birlikte, ağır vasıtalar çalışırken tekerleklerin sıcaklığının Malezya iklimi için tekerlek şişirme basıncı üzerinde daha az önemli bir etki yarattığı da tespit edildi.

Henderson (2020), tarafından yapılan çalışma kapsamında Minnesota yollarının alt temel tabakasındaki aşırı nemin önemini incelemek için bir dizi simülasyon uygulanmıştır. Minnesota'da inşa edilen yol çeşitliliğini örneklemek için MnPAVE programı kullanılarak altı örnek yol kesiti tasarlanmıştır. Her bir kesit, üç KENPAVE simülasyonuna tabi tutuldu. İlk test, optimum nem içeriğinde alt temel tabakasını içeriyordu, ikinci test, alt temel nem içeriğinde % 2,5'lik bir artışla uygulandı ve son test, alt temel nem içeriğinde % 5,0'lık bir artış içeriyordu. Li ve Selig modeli, her KENPAVE simülasyonu ve her nem ayarı için esneklik modülü değerlerini tahmin etmek için kullanıldı. Tüm test yolu kesitleri için benzer bir artan hasar ve azalan tasarım ömrü modeli geliştirilmiştir. Bu deneyin doğası, nem içeriğindeki artışa bağlı olarak kaplama ömründeki azalmayı ölçemese dahi, alt temel nem artışının bir sonucu olarak sürüş yüzeyi performansının azaldığını kesin olarak söyleyebilmektedir.

Jaritngam vd. (2013), çalışmalarında üstyapı tabakalarının gerilmesini, şekil değiştirmesini ve defleksiyonlarını elde etmek için kullanılan sayısal bir analiz tekniği olan sonlu elemanlar yönteminden (FEM) yararlanmıştır. Analitik yöntem genellikle tasarım parametreleri olarak üstyapı malzemelerinin elastisite modülü ve poisson oranını kullanır. Asfalt tabakanın altındaki kritik çekme gerilmeleri ve alt temel üstündeki kritik basınç gerilmeleri gibi düşey yüzey defleksiyonlarını sonlu elemanlar yöntemini kullanarak azaltmada bu değişkenlerin duyarlılığını incelemeyi amaçlamışlardır. Bu değişkenler üstyapı performansını artırmak için kullanılabilir. Bu çalışmanın, tasarım mühendislerinin uygun üstyapıyı seçmesine yardımcı olacak bir kılavuz olarak kullanılması beklenmektedir.

Mishra and Patel (2019), çalışmasında, değişken döngüsel yük tekrarları ve değişken kuru yoğunluklar altında temel ve alt temel tabakası için bağlanmamış granüler malzemenin kalıcı deformasyonunu analiz etmektedir. Genel olarak, diğer araştırmacılar tarafından geliştirilen tekerlek izi tahmin modelleri iyi sonuç vermiştir, ancak uzun vadede kalıcı deformasyonu hafife alma eğilimindedirler. Bu nedenle, bu çalışmada ilk olarak, KENPAVE yazılımı yardımıyla, kaplama tepkilerini (gerilme, şekil değiştirme ve deformasyon) veren KENLAYER bilgisayar programı kullanılarak kalıcı deformasyon özellikleri analiz edilmiştir. İkinci olarak, değişen yük tekrarları ve kuru yoğunlukların kalıcı deformasyon üzerindeki etkisi, test numaraları 1,2,3,4 ve 5 olan 5 farklı yol kategorisinden toplanan numuneler üzerinde incelenmiştir. Granüler malzemeler, düşük trafik hacimli yollarda kullanılmak üzere tatmin edici sonuçlar vermemiştir. İlgili ana konu, agregaların kalıcı deformasyon özellikleri bağlamında yük tekrarlarının ve yoğunluğunun etkisini araştırmaktır.

Muniandy vd. (2013) çalışmalarında, KENLAYER ve CHEVRON bilgisayar programlarını kullanarak esnek kaplamanın performansını karşılaştırmayı amaçlamışlardır. KENLAYER, tehlike modelleri kullanılarak hasar oranının belirlenmesi amacıyla, CHEVRON ise kaldırım bozulma modelleri kullanılarak kaldırım performansını gerilmeler, şekil değiştirmeler ve sapsmalar açısından tahmin etmek amacıyla kullanılmıştır. Nihayetinde KENLAYER tarafından elde edilen gerilme çıktısının, CHEVRON yazılımı tarafından elde edilen gerilme çıktısından daha fazla olduğu bulunmuştur. Kaldırım ömrünün karşılaştırılması yapılarak asfalt beton tabakasının altındaki yatay gerilmeden kaynaklı olarak kaldırım ömrünün belirleyici olduğu bulunmuştur. Çalışma sonucundaki test

verilerinin analizi, CHEVRON bilgisayar yazılımı tarafından tahmin edilen kaldırım ömrünün KENLAYER bilgisayar yazılımı tarafından tahmin edilenden daha büyük olduğunu göstermektedir.

Nidhi ve Nagakumar (2013), çalışmalarında Yang H. Huang tarafından geliştirilen Kenlayer bilgisayar programıyla parametrik analiz yaparak granüler nonlineerliğin kritik üstyapı tepkileri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. İşlenmemiş temel/alt temel tabakalarında kullanılan bağlanmamış granüler malzemeler, tekrarlanan tekerlek yükleri altında doğrusal olmayan davranış sergiler. Granüler malzemelerin özellikleri, bu kaldırımın performansında önemli bir rol oynamaktadır. Bu nedenle, granüler tabakaların doğru modellenmesi, yüklerin uygulanması altında kritik üstyapı tepkilerinin değerlendirilmesinde esastır, bu malzemeler gerilmeye bağlı özellikler sergiler. Bu nedenle, esnek bir kaplama yapısının üstyapı tepkilerinin doğru bir şekilde tahmin edilmesi için bu tabakalardaki doğrusal olmayanlığın dikkate alınması gereklidir. Sonuçlar, doğrusal olmayanlığın dikkate alınmasının, bitümlü tabakaların altındaki çekme gerilmelerinde %23,13 azalma ve basınç gerilmelerinde %0,76 artış sağladığını göstermektedir.

Priyanka vd. (2015), çalışmalarında, kaldırımın suya batması nedeniyle MR değerlerinde kritik azalma vakalarını göz önünde bulundurmışlardır. Kaldırımın erken arızalanması her ülkede karşılaşılan ciddi bir sorundur, ancak nedeni durumdan duruma değişebilir. Tasarım uygulamalarının çoğu, alt katın yüksek taşkın seviyesinin yaklaşık 500 mm üzerinde olduğu varsayımına dayanmaktadır. Ancak ülkenin birçok yerinde yağış çok yüksektir, bu da kaldırımın bir kısmını veya bazen tüm yapısını batık durumda yapar. Sorun, genellikle mevcut arazide dolgu sağlanmadan kaldırımın yapıldığı düşük hacimli yollar için daha kritiktir. Hindistan Yollar Kongresi (IRC), kaldırım tabakalarının esneklik modülünün (MR) önemli bir faktör olduğu farklı durumlar için kaldırım tasarım bölümleri sağlar. IRC SP 72'nin düşük hacimli yollar için önerdiği farklı alt zemin ve trafik koşulları için KENPAVE yazılım programında MR değerlerinde %25, %50 ve %75 azalma varsayılarak analiz yapılır. Elde edilen sonuçlardan, tüm kritik vakalarda gerilme ve şekil değiştirme değerlerinde artış, yorulma ve tekerlek izinde ciddi azalma gözlenmiştir. Hasar oranı, gerçek yük tekrarlarının izin verilen yük tekrarlarına oranıdır ve bunun için birden büyük bir değer, kaplama arızasını gösterir. Analizler, MR değerleri düşürüldüğünde geleneksel durumlar için kaplama yapılarının başarısız olduğunu ve bu nedenle bu durumlarda tasarımın değiştirilmesi gerektiğini göstermektedir.

Rind vd. (2017), çalışmasında KENPAVE gibi mekanistik-ampirik temelli yazılımları kullanarak, Pakistan'da esnek kaplamalardaki tekerlek izi ve yorulma çatlama gibi deformasyonların, şiddetli ve yoğun olmasının kaplama performansı üzerindeki büyük etkileri nedeniyle büyük sıkıntılar doğurduğundan bu başarısızlıkları azaltmayı amaçlamıştır. Ağır vasıtaların ve kamyon dingil yüklerinin artması, yerel çevre koşullarını karşılamak için uygun olmayan kaplama tasarım prosedürleri ve manuel tasarım sırasında meydana gelen hatalar, günümüzde Pakistan'da zamansız bozulmaların sorumlu başlıca faktörlerdir. Bu nedenle, ekonomik tasarım için bu zamansız bozulmaları en aza indirmeye ihtiyaç vardır. KENPAVE yazılımı, esnek ve sert kaplamadaki gerilme ve şekil değiştirmeleri hesaplamak için kullanılır. KENPAVE tasarım yazılımını mevcut ampirik tasarım yaklaşımlarıyla

doğrulamak, karşılaştırmak ve aşınma ve temel tabakası kalınlıklarındaki değişimin yorulma ve tekerlek izi hasarına göre kaplama performansı ve tasarım ömrü üzerindeki etkisini araştırmak amaçlanmıştır. Bu amaçla test için bir bölüm seçilmiştir. Pakistan'da aşınma ve temel tabakası için kullanılabilir çeşitli olası kesitler, kalınlıkları +% 25 ve -% 25 değiştirilerek dikkate alınmıştır. Bunu yaparak analiz edilecek toplam 10 kesit vardır. Bu 10 kesit, seçilen yolda izin verilen maksimum eşdeğer dingil yüküne bağlı olarak tekerlek izi (Nr) ve yorulma (Nf) açısından izin verilen sayıda yük tekrarı açısından analiz edilmiştir. Sonuç, tekerlek izi (Nr) ve yorulma (Nf) arızasını önlemek için izin verilen yük tekrarı sayısı açısından bozulmaya dayanıklı kaplama kesitinin çoğunun kesit-5 ve kesit-10 olduğunu ve tasarlanan kesit-5 ve kesit-10'un yapım maliyetinin neredeyse eşit olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, kesit-10, tasarım ömrü ve bozulmaya dayanıklılık özellikleri açısından ekonomiktir.

Sahis ve Biswas (2021), çalışmalarında kaplama, bitümlü karışımın üst tabakası ve ardından toprak alt tabakasına dayanan bağlanmamış granüler tabaka ile üç tabakalı bir sistem olarak kabul edilmiştir. Makalenin amacı, bitümlü ve granüler tabaka kalınlığının tahmini için mekanik-ampirik yaklaşıma dayalı bir optimizasyon yöntemi geliştirmektir. Bitümlü yol kesitinin gerilme esaslı kriterlere göre yapısal tasarımında tekerlek izi ve yorulma olarak iki ana arıza şekli göz önünde bulundurulmuştur. Alt tabakanın üstündeki düşey basınç gerilmesi ve bitümlü tabakanın altındaki radyal çekme gerilmesi, üç tabakalı sistemi Odemark yöntemiyle homojen bir sisteme dönüştürdükten sonra Boussinesq teorisi ile belirlenmiştir. Bu çalışmadan elde edilen bulgular, kaplamayı hem yorulmaya hem de tekerlek izine karşı korumak için yalnızca bir tipik bitümlü ve granüler tabaka kalınlığı kombinasyonunun mümkün olduğunu ortaya koymaktadır. Mevcut metodoloji kullanılarak elde edilen tabaka kalınlığının sonucu, diğer uluslararası yayınlanmış verilerle karşılaştırılmış ve uyum içinde olduğu bulunmuştur. Bu şekilde elde edilen optimize edilmiş kaplama bölümü için bir performans göstergesi olarak kaplama defleksiyonu, Odemark ve Boussinesq yaklaşımı ile belirlenmiş ve makul derecede iyi yakınsama gösteren IITPAVE ve KENPAVE yazılımı kullanılarak elde edilen defleksiyon ile karşılaştırılmıştır.

Selvi (2015), çalışmasında tasarım şartnamesini yerine getirmek için kireç ilavesi ile alt temel mukavemetini arttırmayı amaçlamıştır. Bu ilave, 1, 5, 10, 20 ve 30 milyon standart dingil yükü ile %2, %3 ve %4 CBR değerlerinin üstyapıda alt temel dayanımlarının kalınlıklarında ekonomi sağlar. Bu çalışmada, bitümlü ve kireç stabilize tabakaların tabanındaki çekme dayanımı ve kireç stabilize alt temeldeki basınç dayanımını belirlemek için KENLAYER bilgisayar programı kullanılarak çok tabakalı bir elastik analiz yapılmıştır. Ayrıca, alt temel dayanımı için tasarım kataloglar geliştirilmiştir. Elde edilen sonuçlardan, % 2 CBR değerine sahip alt temel mukavemet için tekerlek izi değerinde % 71.43 azalma gözlenmiştir.

Tanyıldızı ve Geçkil (2019), çalışmalarında karayolu üstyapısını projelendirilme aşamasında tercih edilen AASHTO yöntemindeki parametrelerin, esnek üstyapı sayısını ne ölçüde etkilediği ve rijit üstyapı beton kaplama kalınlığı üzerine araştırmalar yapmışlardır. Ülkemizde karayollarının bakım-onarımlarının yanında, işletme giderleri de değerlendirilerek en uygun seçeneğin tercih edilmesi verimlilik ve ekonomiklik açısından önemlidir. Araştırmalar sonucunda esnek üstyapıların

projelendirilmesinde dikkate alınması gereken en önemli parametre ‘Taban Zemini Esneklik Modülü (M_R)’ iken rijit üstyapılarda ‘Betonun Elastisite Modülü (E_c)’ olduğu bulunmuştur. Projelendirmede ekonomi açısından kayıpların önlenmesi için, bu parametrelerin belirlenmesinde hassas davranılması gerektiği saptanmıştır.

Teja vd. (2019), çalışmalarında KENPAVE yazılımını kullanarak yumuşak topraklar üzerinde geosentetik malzeme türlerinden olan Geocell malzemesi ile güçlendirilmiş esnek kaplamaları incelemektedir. Geosentetiklerin ortaya çıkışı, otoyol mühendislerine, üstyapı geliştirmede performansı artırmak için kullanımlarını düşündürmüştür. Özellikle geogrid, geocell ve geotextile gibi geosentetikler, çok işlevli davranışlarından dolayı, kaplamalardaki yansıma çatlama kontrolünde, kil alt temelde ayırıcı-filtre-drenaj olarak, yumuşak topraklarda takviye faktörü olarak kullanılmıştır. Nihayetinde Geocell takviyeli temel altı esnek kaplaması, kaplama kesitinde yaklaşık %13, taban donatısında ise yaklaşık %4 azalma sağlamıştır.

2.2.KENPAVE Bilgisayar Programı

1993'te Kentucky Üniversitesi'nin inşaat mühendisliği profesörlerinden olan YANG H. HUANG'ın geliştirdiği KENPAVE, sert ve esnek üstyapıları modellemek, analizini yapmak, gerilmeler, şekil değiştirmeler ve deformasyonları hesaplamak amacıyla kullanılan bir bilgisayar programıdır (Huang, 2004). Üstyapıda çoklu tabakaların analizinde uzmanlaşmıştır (Alzaim, 2019). İngiliz veya Uluslararası Birimler Sistemi'ni (SI) kullanabilmektedir. Asfalt ve beton olmak üzere iki tür analizi gerçekleştirmemize olanak sağlamaktadır. Dört ayrı bilgisayar programı olan LAYERINP, KENLAYER, SLABSINP, KENSLABS ve bazı grafik programlarının birleşmesinden meydana gelmiştir. KENLAYER, giriş programı LAYERINP ve grafik programı LGRAPH ile birlikte KENPAVE'in asfalt analizinde kullanılan parçalarıdır. KENLAYER, her tabakanın lineer elastik, lineer olmayan elastik veya viskoelastik şeklinde çeşitli davranışlar gösterdiği tek, çift, ikili çift veya üçlü çift tekerlekler altındaki tabakalı sistemlere uygulanabilmektedir. Hasar analizi, en fazla 12 döneme bölünerek gerçekleştirilebilmektedir. Periyotların her biri farklı malzeme özelliklerine sahip olmalı ve her dönem, tek veya çoklu 12 yük grubuna sahip olabilmektedir. Tasarım ömrünü belirlemek amacıyla bütün yük gruplarının her dönemi için kalıcı deformasyon ve yorgunluk çatlama neden olduğu hasar özetlenmiştir (Huang, 2004).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Çalışmada farklı tabaka yapısına sahip, üç üstyapı modeli incelenmiştir. Her bir üstyapı modeli için elastisite modülü, izafi mukavemet katsayısı, poisson oranı gibi tabakaların mekanik özellikleri ve yükleme durumu tanımlanmıştır.

Tablo 3.1. Tabaka kalınlıkları ve elastik malzeme özellikleri (Hadi ve Bodhinayake, 2003).

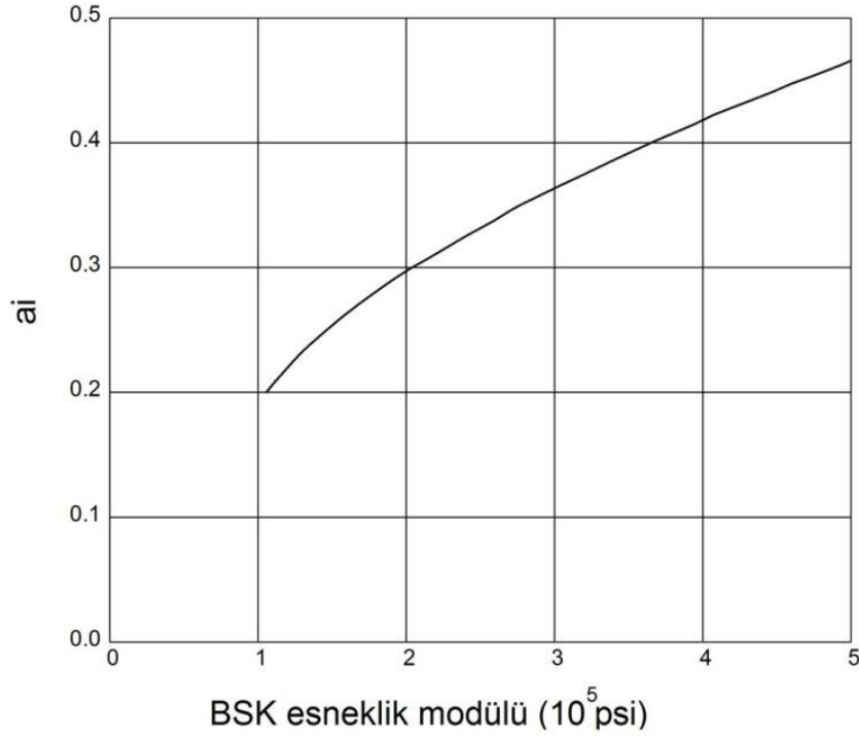
Layer	Thickness (mm)	Modulus of elasticity (kPa)	Poisson's ratio
Asphalt (AC14)	45	1,800,000	0.3
Asphalt (AC20)	55	1,725,000	0.3
Base	85	138,000	0.35
Sub-base	230	96,600	0.35
Fill	175	72,450	0.35
Rock fill	370	62,100	0.35
Subgrade	Infinite	55,200	0.35

Tabakalara ait izafi mukavemet katsayıları seçiminde Türkiye Karayolları Genel Müdürlüğü Esnek Üst Yapılar Projelendirme Rehberi (EÜPR)'nde yer alan Tablo 3.2'den yararlanılmıştır.

Tablo 3.2. Tabaka katsayıları (Sağlık ve Güngör, 2008).

TABAKA CİNSİ	MARSHALL STABİLİTESİ (kg)	CBR (%)	7 GÜNLÜK SERBEST BASINÇ DAYANIMI (kg/cm ²)	a _i
a) BSK TABAKALARI				
Taş Mastik Asphalt (TMA)				0,44
Asfalt Betonu Aşınma	≥ 900			0,42
Asfalt Betonu Binder	≥ 750			0,40
Bitümlü Temel	≥ 600			0,36
b) TEMEL TABAKASI				
Çimento Bağlayıcı Granüler Temel			35-55	0,23
Plent-Miks Temel		≥ 120		0,15
Granüler Temel		≥ 110		0,11
c) ALT TEMEL TABAKASI				
Kırmataş Alt Temel		≥ 50		0,13
Kum-Çakıl Alt Temel		≥ 30		0,11

Üstyapı tabakalarının izafi mukavemet katsayılarının (a_i), yapılacak analizlerde kullanılmak üzere kaplama elastisite modülüne dönüştürülmesinde Şekil 3.1'deki grafikten yararlanılmıştır.



Şekil 3.1. BSK için izafi mukavemet katsayısı-esneklik modülü dönüşüm grafiği (Huang, 2004).

Temel tabakasının elastisite modülünün hesaplanmasından Eşitlik 3.1 kullanılırken, alt temel elastisite modülünün hesabında Eşitlik 3.2 kullanılmıştır (Huang, 2004). Eşitliklerde a_{temel} ve $a_{alt\ temel}$ sırasıyla temel ve alt temel tabakalarının izafi mukavemet katsayılarını, E_{temel} ve $E_{alt\ temel}$ ise sırasıyla temel ve alt temel tabakalarının elastisite modülü değerlerini (psi) ifade etmektedir.

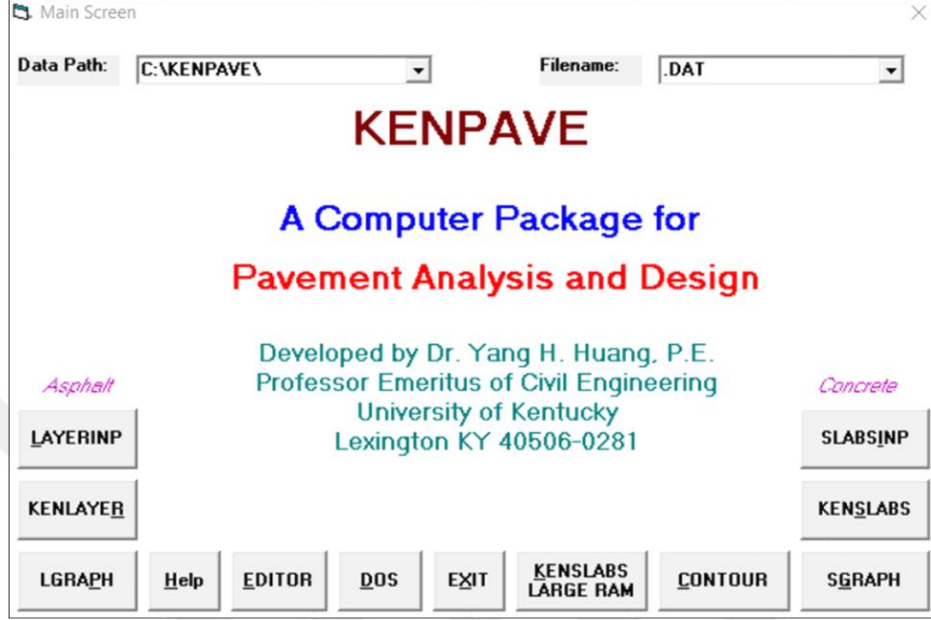
$$a_{temel}=0.249 \times \log(E_{temel})-0.977 \quad (3.1.)$$

$$a_{alt\ temel}=0.227 \times \log(E_{alt\ temel})-0.839 \quad (3.2.)$$

Tüm üstyapı modelleri için kesit üzerinde yer alan tekerlek yükü değişken olarak 80-90-100-110-120 kN olarak belirlenmiştir (Huang, 2004). Bu yük akstaki tekerleklere eşit olarak dağıtılmıştır ve tekerlek temas alanı dairesel kabul edilmiştir (Hafeez vd., 2017). Tekerlek iç basıncı ise 550-618-687-756-825 kPa iken 40-45-50-55-60 kN yük altında bu iç basıncı sağlayan temas yarıçapı (CR) 10.74 cm olarak hesaplanmış ve analizlerde kullanılmıştır (Hadi ve Bodhinayake, 2003). Elastisite modülü ve poisson oranı, esnek üstyapı tasarımının analizleri için dikkate alınan tek doğrusal malzeme özellikleridir (Alzaim, 2019).

3.1. KENPAVE Bilgisayar Programı

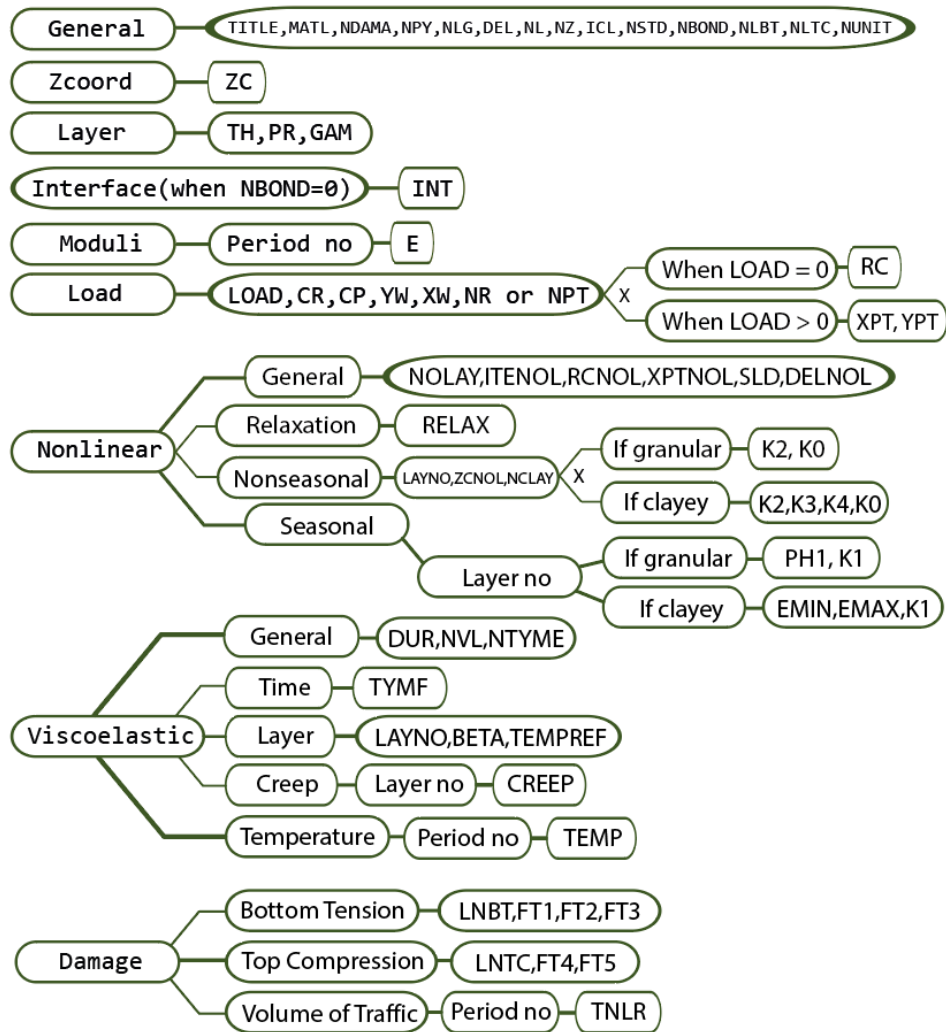
3.1.1 Ana sayfa Komut Düğmeleri İşlevleri



Şekil 3.2. Program ana sayfası (Huang, 2004).

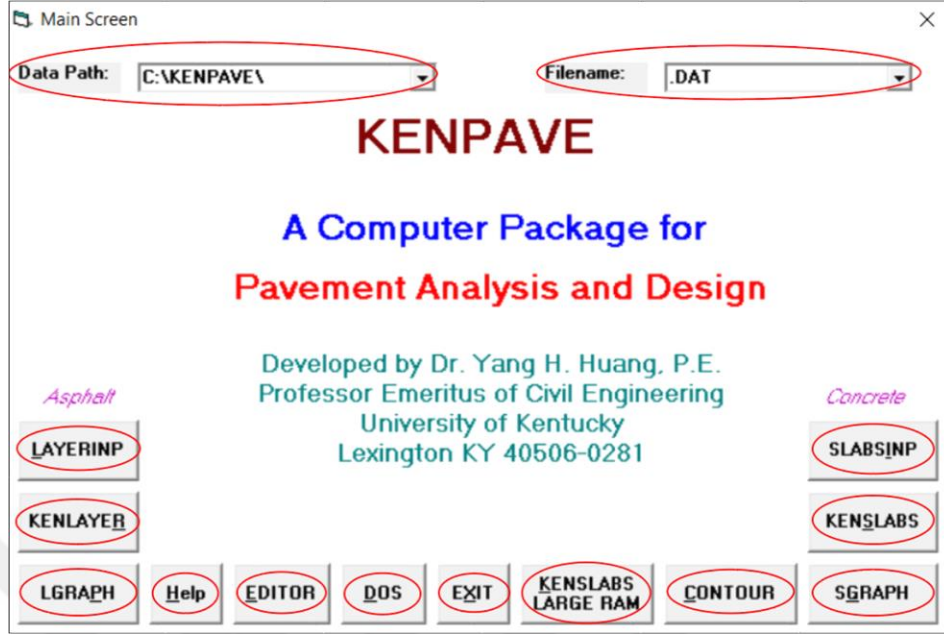
- LAYERINP/SLABSINP: KENLAYER veya KENSLABS çalıştırılmadan önce bir veri dosyası oluşturmak için kullanılır. Veriler bir dizi form üzerinde gruplar halinde düzenlenmiştir. Şekil 3.2, LAYERINP'deki çeşitli ekranlardaki giriş parametrelerinin konumunu göstermektedir. Tüm giriş parametreleri büyük harflidir; her menünün ilk harfi hariç, giriş parametrelerinin bulunduğu menüler küçük harflidir. X harfi, önceki ekranda belirli bir giriş parametresi yazıldığında otomatik olarak görünecek bir yardımcı ekranın varlığını gösterir.
- KENLAYER/KENSLABS: Kaplama analizi için ana programdır ve yalnızca bir veri dosyası oluşturulduktan sonra çalıştırılabilir. Program veri dosyasından okuyacak ve yürütülmeye başlayacaktır. Yürütme sırasında, programın çalıştığını size bildirmek için ekranda bazı sonuçlar görünecektir. KENLAYER veya KENSLABS bir çalışma sırasında beklenmedik şekilde durursa, en olası neden veri hatasından kaynaklanır. Hatanın yerini bulmanız ve ardından veri dosyasındaki verileri düzeltmeniz gerekir. Ekrandaki iletiden hatayı bulamıyorsunuz. En kolay yol EDITOR kullanarak .TXT dosyasını açmaktır. Hangi girdinin yanlış olduğunu bulana ve gerekli düzeltmeyi yapana kadar dosyayı okuyabilirsiniz.
- LGRAPH/SGRAPH: Kaplama planını ve kesitini girdi ve çıktı hakkında bazı bilgilerle birlikte grafiklemek için kullanılabilir.

- Help: Çoğu ekran, giriş parametrelerini ve formun kullanımını açıklayan bir yardım metin kutusuna sahiptir. Ancak, bazı ekranlarda 'HELP' düğmesi veya 'Help' menüsü vardır ve bunlara tıklandığında ayrı bir ekranda bir metin kutusu gösterilir.
- EDITOR: Veri dosyalarını incelemek, düzenlemek ve yazdırmak için kullanılabilir. Veri dosyasının düzenine aşina olmayan kullanıcıların düzenleyici olarak LAYERINP veya SLABINP kullanılması tavsiye edilmektedir. Deneyimli kullanıcılar tarafından EDITOR kullanılarak veri dosyasında bazı basit değişiklikler yapılırken ise, düzenlemelerde hata yapılmamasına olabildiğince dikkat edilmelidir.
- DOS ve EXIT: DOS, geçici olarak Windows'dan MS-DOS'a çıkmak için kullanılabilir. MS-DOS'tan Windows'a dönmek için EXIT kullanılmalıdır. İstenen tüm analizler yapıldıktan sonra KENPAVE'i kapatmak için EXIT'e taklanabilir.
- CONTOUR: Bu menü, x veya y yönündeki gerilmelerin veya momentlerin dağılımlarını çizmek için kullanışlıdır (Huang, 2004).



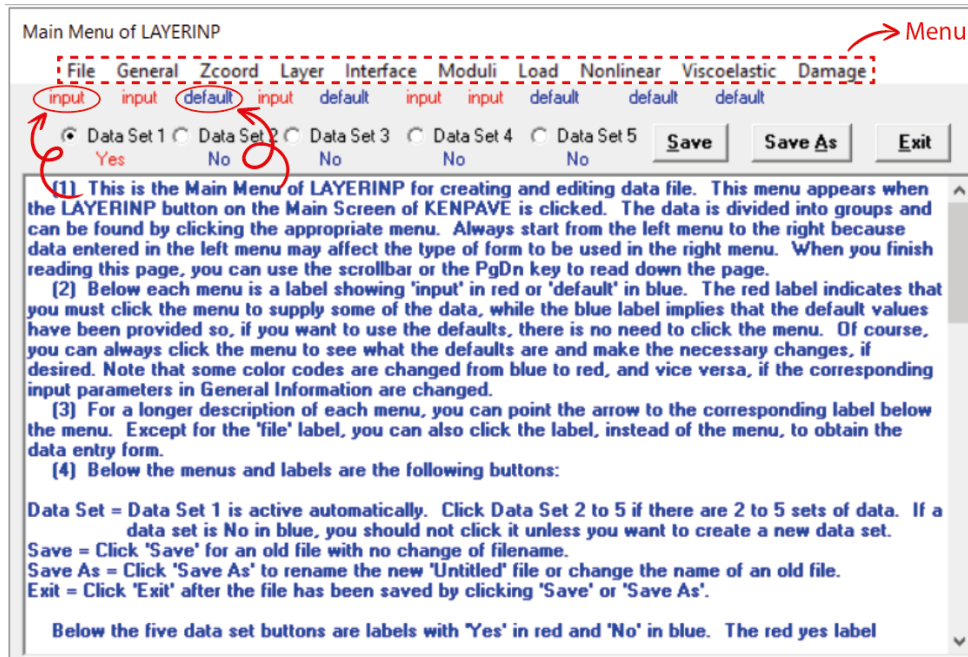
Şekil 3.3. LAYERINP'deki çeşitli ekranlardaki giriş parametrelerinin konumu (Huang, 2004).

3.1.2. Program Adımları



Şekil 3.4. KENPAVE yazılımının ana ekranı için ayrıntılar (Huang, 2004).

1. Adım; KENPAVE’i başlatma: Bu, KENPAVE programını çalıştırmaya başlamanın ilk adımdır. Ana ekran görünür ve bu ekrandan tüm düğmeler kolayca kullanılabilir ve Şekil 3.4’te gösterildiği gibi ekranın üst kısmında veri yolu ve dosya adı açıkça görünür.



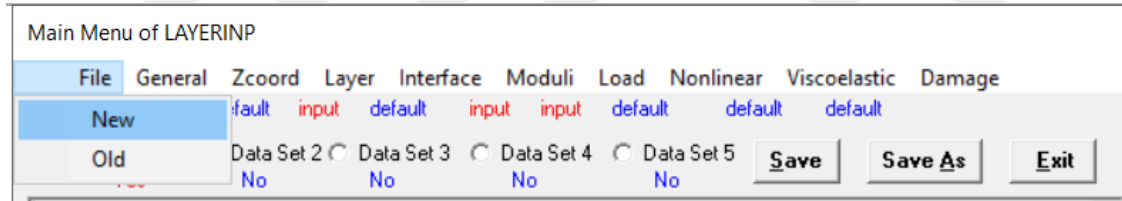
Şekil 3.5. LAYERINP Ana Menüsü (Huang, 2004).

2.Adım; LAYERINP komutunu seçme: LAYERINP'in ana menüsü Şekil 3.5'te gösterilmiştir. Bu menü, KENPAVE ana ekranında bulunan LAYERINP butonuna tıkladığında ekrana gelir. Veriler gruplara ayrılmıştır ve uygun menüye tıklayarak bulunabilir. Her menünün altında kırmızı 'giriş'i veya mavi 'varsayılan'ı gösteren bir etiket vardır. Varsayılanları kullanmak istiyorsanız, menüye tıklamanıza gerek yoktur. Her bir menünün daha uzun açıklaması için, oku menünün altındaki ilgili etikete yönlendirebilirsiniz. Dosyayı ifade eden 'file' etiketi dışında, veri giriş formunu elde etmek için menü yerine etikete de tıklayabilirsiniz. Etiketler aşağıdaki düğmelerdir:

Data Set: Veri kümesini ifade eder. Data Set 1 otomatik olarak etkindir. 2 ila 5 veri kümesi varsa Data Set 2 ila 5'e tıklanabilir. Bir veri kümesi mavi renkte 'No' ise, yeni bir veri kümesi oluşturmak istenmiyorsa onlara tıklanmamalıdır.

- Save: Dosya adında değişiklik olmayan eski bir dosya için tıklanabilir.
- Save As: Yeni adsız dosyayı yeniden adlandırmak veya eski bir dosyanın adını değiştirmek için tıklanabilir.
- Exit: Dosya 'Save' veya 'Save As'e tıklanarak kaydedildikten sonra 'Exit'e tıklanabilir.

Beş Data Set düğmesinin altında kırmızı 'Yes' ve mavi 'No' olarak etiketlenmiştir. Yeni bir dosya için, veri kümeleri 2 ila 5 altındaki etiketler mavi renkte her zaman 'No'dur. Bu veri kümesi düğmelerine tıklanırsa, kırmızı olarak 'Yes' olarak değiştirilir ve Data Set 1'deki tüm veriler bu yeni kümelere kopyalanır. Aktif veri seti, seçenek düğmesinde siyah bir nokta ile gösterilir (Huang, 2004).



Şekil 3.6. Ana menüdeki 'Data File' (Huang, 2004).

3.Adım; araç çubuğundan 'File' seçme: Yeni bir veri dosyası ayarlamak için 'File' ve 'New'e tıklayın ve 'Untitled' dosya adı 'File' altındaki etikette görünecektir, Şekil 3.6'daki gibi görünecektir. Bundan sonra gerekli verileri girmeye devam edebilirsiniz. Mevcut bir dosyayı düzenlemek için, açılır liste kutusundaki dosya adını tıklayarak ana ekrandaki 'Filename' kutusunda vurgulayabilirsiniz. LAYERINP düğmesini ve ardından 'File' ve 'Old'u tıkladıktan sonra, veri dosyalarının listesini gösteren bir iletişim kutusu görünecektir.

General Information of LAYERINP for Set No. 1

TITLE Dosya adı bu kısımda görünecektir!

Type of material (1=linear, 2=nonlinear, 3=viscoelastic, 4=combined) (MATL)	1
Damage analysis (0=no, 1=yes with summary only, 2=yes with detailed printout) (NDAMA)	1
Number of periods per year (NPY)	1
Number of load groups (NLG)	1
Tolerance for numerical integration (DEL)	0.001
Number of layers (NL)	3
Number of Z coordinates for analysis (NZ)	0
Maximum cycles of numerical integration (ICL)	80
Type of responses (1=displacements only, 5=plus stresses, 9=plus strains) (NSTD)	9
All layer interfaces bonded (1=yes, 0=if some are frictionless) (NBOND)	1
Number of layers for bottom tension (NLBT)	1
Number of layers for top compression (NLTC)	1
System of units (0=English, 1=SI) (NUNIT)	1

(1) This form appears when the 'General' on the Main Menu of LAYERINP is clicked. You can override any of the default values by typing in a new value. You can use the Tab key to move the cursor from one textbox to the next or just click on the textbox before typing. The use of click has the advantage that you don't have to delete the default before typing in the data you want. If you want to read the remaining text, you can use the scrollbar. You can also use the PgDn key after clicking this textbox to make it active.

(2) TITLE (title of run): Any title or comment can be typed on one line. The title should not be longer than 68 characters including spaces. If you make a mistake in typing, use the Del key to erase any typographical errors. When the total length reaches 68, no additional characters can be added. No comma should be used in TITLE. Use colon or semicolon instead.

(3) MATL (types of material): 1 when all layers are linear elastic, 2 when some layers are nonlinear

Şekil 3.7. 'General' ekranı (Huang, 2004).

4.Adım; araç çubuğundan 'General' seçme: LAYERINP ana menüsünde bulunan 'General'a tıkladığında Şekil 3.7'deki gibi bir ekran gelecektir. Yeni bir değer girerek varsayılan değerlerden herhangi birini geçersiz kılabilirsiniz.

General ekranın detayları aşağıdaki gibidir:

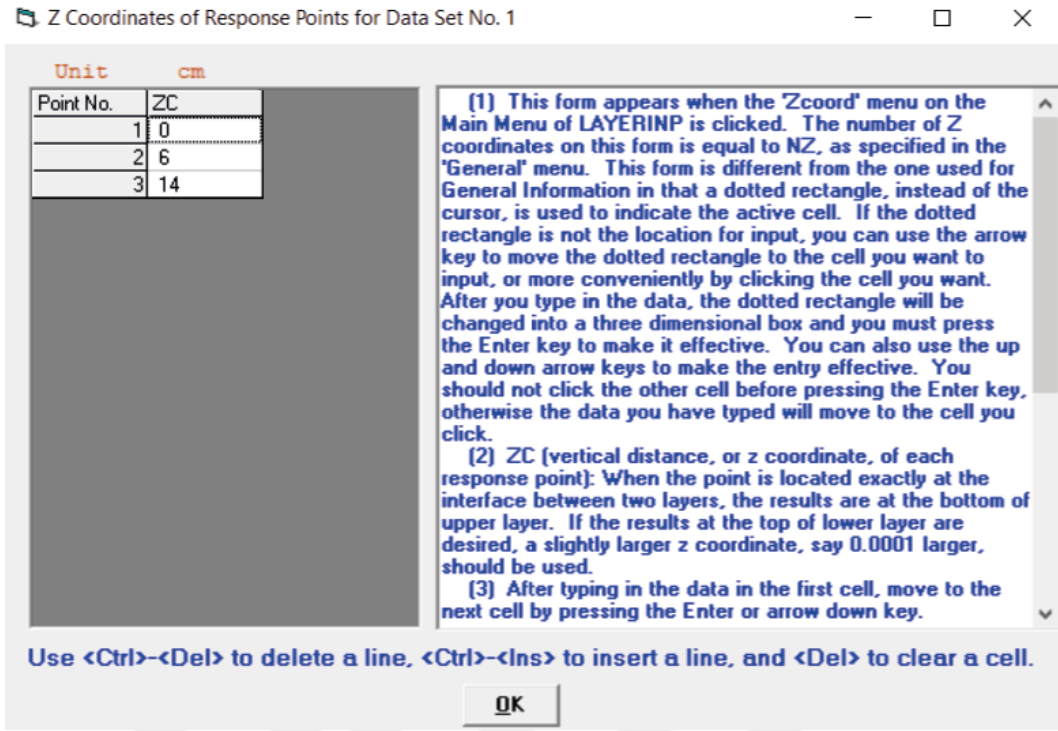
- TITLE: Çalışmanın başlığının yazılı olduğu yerdir. Tek satıra herhangi bir başlık veya yorum yazılabilir. Başlık boşluklar dahil 68 karakterden uzun olmamalıdır. TITLE'da virgül kullanılmamalıdır. Bunun yerine iki nokta üst üste veya noktalı virgül kullanılabilir.
- MATL: Malzeme türlerini ifade eder. 1, tüm tabakalar lineer elastik olduğunda; 2, bazı tabakalar lineer olmayan elastik olduğunda ve varsa geri kalanlar lineer elastik olduğunda; 3, bazı tabakalar viskoelastik olduğunda ve varsa geri kalanlar lineer elastik olduğunda; 4, bazı tabakalar lineer olmayan elastik olduğunda, bazıları viskoelastiktir ve eğer varsa geri kalanlar lineer elastiktir.
- NDAMA: Hasar analizini ifade eder. 0, hasar analizi olmadan; 1 hasar analizi ile özet çıktısı ve 2, hasar analizi ile daha detaylı çıktıdır.
- NPY: Yılda periyot sayısını ifade eder. Hasar analizi için her yıl maksimum 12 periyoda bölünebilir. Hasar analizi olmadan bile, NPY, her dönem için farklı modüller atayarak tabaka modüllerinin kaplama tepkileri üzerindeki etkisini bulmak için kullanılabilir.
- NLG: Yük grubu sayısını ifade eder. Dingil yükleri, hasar analizi için her biri farklı tekerlek yükü ve konfigürasyonuna sahip maksimum 12 gruba ayrılabilir.

- DEL: Sayısal entegrasyon toleransını ifade eder. Varsayılan 0,001, %0,1'lik bir doğruluk anlamına gelir.
- NL: Tabaka sayısını (maksimum 19) ifade eder. Varsayılan NL, kırmızı ile gösterildiği gibi muhtemelen değiştirmek isteyeceğiniz 3'tür.
- NZ: Cevapların hesaplanacağı düşey koordinatların sayısını ifade eder. NDAMA = 1 olduğunda, NZ 0 olarak bırakılabilir, çünkü NZ, hasar analizinin yapılacağı lokasyon sayısına göre program tarafından belirlenecektir.
- ICL: Maksimum entegrasyon döngüsü sayısını (önerilen 80) ifade eder. Yürütme sırasında bilgisayar ekranında gösterilen gerçek döngü sayısı, ICL'den daha küçük olmalıdır.
- NSTD: Gerilme, şekil değiştirme ve deplasman sayısını ifade eder. Sadece düşey yer değiştirmeler için 1, düşey yer değiştirmeler ve dört gerilme için 5 ve düşey yer değiştirmeler, dört gerilme ve dört şekil değiştirme için 9. Hasar analizi yapıldığında, NSTD'ye 9 atanmalıdır.
- NBOND: İki tabaka arasındaki ara yüz türlerini ifade eder. 1, genellikle olduğu gibi tüm ara yüzler bağlı olduğunda ve 2, bazı ara yüzler bağlanmamış veya sürtünmesiz olduğunda.
- NLBT: Asfalt tabakasının altındaki çekme gerilmesine dayalı hasar analizi ile tabaka sayısını ifade eder.
- NLTC: Alt zeminin veya diğer bağlanmamış tabakaların tepesindeki dikey basınç gerilmesine dayalı olarak hasar analizi ile tabaka sayısını ifade eder.
- NUNIT: Birimler sistemini ifade eder. SI birimleri için 1 ve İngiliz birimleri için 0 (Huang, 2004).

Tablo 3.3. Birim sistemi (Huang, 2004).

English Unit	SI Unit	Conversion
Mile	Kilometer	1 mile = 1.609 km
Foot	Meter	1 ft = 0.305 m
Inch	Centimeter	1 inch = 2.54 cm
Pound	Grams	1 lb = 453.59 g
Ounce	Grams	1 oz = 28.35 g
Gallon	Liter	1 gallon = 3.79 L
Celsius	Kelvin	0 Degree C = 273.15 K

Tamamlandıktan sonra, LAYERINP'in Ana Menüüne dönmek için OK'a tıklayın.



Şekil 3.8. 'Z Coordinates' ekranı (Huang, 2004).

5. Adım; araç çubuğundan 'Zcoord' seçme: LAYERINP Ana Menüünde 'Zcoord' menüsüne tıklandığında Şekil 3.8'deki ekran gelecektir. 'General' menüsünde belirtildiği gibi Z koordinatlarının sayısı NZ'ye eşittir.

'Z Coordinates' ekranının detayları aşağıdaki gibidir:

- ZC: Her tepki noktasının düşey mesafesi veya z koordinatını ifade eder. Nokta tam olarak iki tabaka arasındaki ara yüzde bulunduğunda, sonuçlar üst tabakanın altındadır. Alt tabakanın tepesindeki sonuçlar isteniyorsa, biraz daha büyük bir z koordinatı, diyelim ki 0.0001 daha büyük kullanılmalıdır. Bir çizgiyi veya bir koordinat noktasını önce çizgi üzerinde herhangi bir yere tıklayarak aktif hale getirip ardından <Ctrl>- tuşlarına basarak silebilirsiniz. Herhangi bir satırın üstüne yeni bir çizgi veya bir koordinat noktası ekleyebilirsiniz, önce verilen satırdaki hücreyi aktif hale getirmek için tıkkatıp ardından <Ctrl>-<Ins> tuşlarına basın. Tamamlandıktan sonra, LAYERINP ana menüsüne dönmek için 'OK'a tıklayın (Huang, 2004).

Layer Thickness, Poisson's Ratio and Unit Weight for Data Set No. 1

After typing the value in a cell, be sure to press the Enter key to make it effective.

Unit cm kN/m³

Layer No.	TH	PR
1	10	.35
2	25	.4
3	XXXXXXXXXX	.45

Use <Ctrl>- to delete a line, <Ctrl>-<Ins> to insert a line, and to clear a cell.

[1] This form appears when the 'Layer' menu on the Main Menu of LAYERINP is clicked. The number of layers on this form is equal to NL, as specified in the 'General' menu. This form is different from the one used for General Information in that a dotted rectangle, instead of the cursor, is used to indicate the active cell. If the dotted rectangle is not the location for input, you can use the arrow key to move the dotted rectangle to the cell you want to input, or more conveniently by clicking the cell you want. After you type in the data, the dotted rectangle will be changed into a three dimensional box and you must press the Enter key to make it effective. You can also use the up and down arrow keys to make the entry effective. Note that the dotted rectangle is now in the upper left cell, so you can type in the data right away. If you want to read the remaining text and use the PgDn key, instead of the scrollbar, you

OK

Şekil 3.9. 'Layer' ekranı (Huang, 2004).

6.Adım; araç çubuğundan 'Layer' seçme: LAYERINP ana menüsünde 'Layer' menüsüne tıkladığında Şekil 3.9'daki ekran gelecektir. 'General' menüsünde belirtildiği gibi tabaka sayısı NL'ye eşittir.

'Layer' ekranının detayları aşağıdaki gibidir:

- TH: Her tabakanın kalınlığını ifade eder. Son tabakanın kalınlığı sonsuzdur ve test edilmesi gerekmez.
- PR: Her tabakanın Poisson oranı değerini ifade eder. Önerilen değerler HMA ve taneli malzemeler için 0.35, ince taneli zeminler için 0,45'tir.
- GAM: Her tabakanın birim ağırlığını ifade eder. Önerilen değerler BSK için 22,8 kN/m³, taneli malzemeler için 21,2 kN/m³, toprak için 19,6 kN/m³ şeklindedir. MATL = 1 veya 3 olduğunda kaybolur. Verileri bir hücreye yazdıktan sonra, etkin olması için enter tuşuna bastığınızdan emin olun. Son satırdan sonra bir satır eklemek istiyorsanız, 'General' menüsünden NL'yi 1 olarak değiştirebilirsiniz, son satır boş bir satır olarak görünecektir. Bu formu doldurduktan sonra, LAYERINP'in ana menüsüne dönmek için OK'a tıklayın.

Layer Modulus of each period for Data Set No. 1

Period1 input					

(1) This form appears when the 'Moduli' menu on the Main Menu of LAYERINP is clicked. The number of periods on this form is equal to NPY, as specified in the 'General' menu. The 12 buttons on the form indicates that a maximum of 12 periods may be used. However, only the periods being actually specified are marked with the period number on the button.

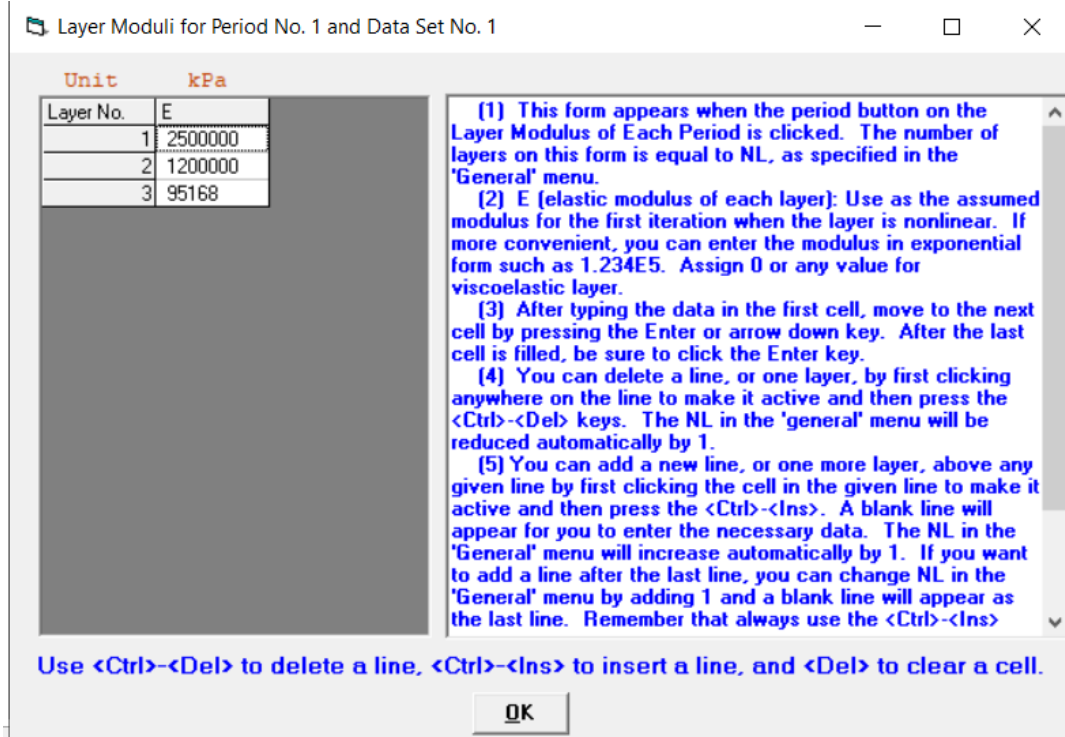
(2) Below the period button is a label showing 'input' in red, indicating that there are no defaults and you must enter the elastic modulus for each layer. After the data are entered, the letter 'input' will be changed to 'done'.

(3) Now you can click the Period1 button to enter the data. After the data for all periods are entered, as indicated by 'done' under each period button, click OK to return to the Main Menu of LAYERINP.

OK

Şekil 3.10. 'Layer Modulus' ekranı (Huang, 2004).

7.Adım; araç çubuğundan 'Moduli' seçme: LAYERINP ana menüsünde 'Moduli' menüsüne tıkladığında Şekil 3.10'daki ekran gelecektir. 'General' menüsünde belirtildiği gibi periyot sayısı NPY'ye eşittir. Şekil 3.10'da gösterildiği gibi 12 buton, maksimum 12 noktanın kullanılabileceğini gösterir. Ancak sadece fiilen belirtilen periyotlar buton üzerinde periyot numarası ile işaretlenmiştir. Nokta butonunun altında, varsayılan olmadığını ve her tabaka için elastisite modülü girmeniz gerektiğini belirten kırmızı 'input'u gösteren bir etiket vardır. Verileri girdikten sonra, 'input' yazısı 'done' olarak değişecektir. Artık verileri girmek için Periyot1 düğmesine tıklayabilirsiniz. Her periyot butonunun altında 'done' ile gösterildiği gibi tüm periyotlara ait veriler girildikten sonra, LAYERINP ana menüsüne dönmek için OK'a tıklayınız (Huang, 2004).



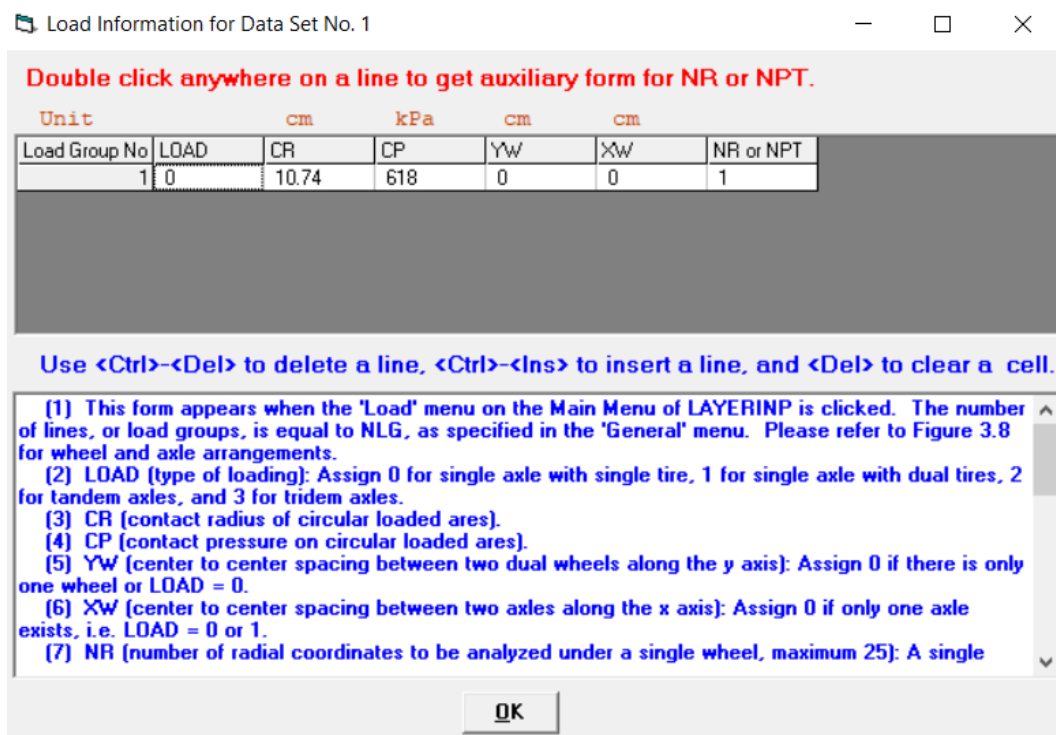
Şekil 3.11. 'Layer Moduli for Period' ekranı (Huang, 2004).

8.Adım; Period1 butonunu seçme:

Her periyodun tabaka modülü üzerinde periyot butonu tıklandığında Şekil 3.11'deki ekran gelecektir.

Her bir periyodun tabaka modülleri ekranının detayları aşağıdadır:

- E: Her tabakanın elastisite modülünü ifade eder. Tabaka doğrusal olmadığında ilk yineleme için varsayılan modül olarak kullanın. Daha uygunsa, modülü 1.234E5 gibi üstel biçimde girebilirsiniz. Viskoelastik tabaka için 0 veya herhangi bir değer atayın. Tamamlandıktan sonra, 'OK'a tıklayın.



Şekil 3.12. 'Load' ekranı (Huang, 2004).

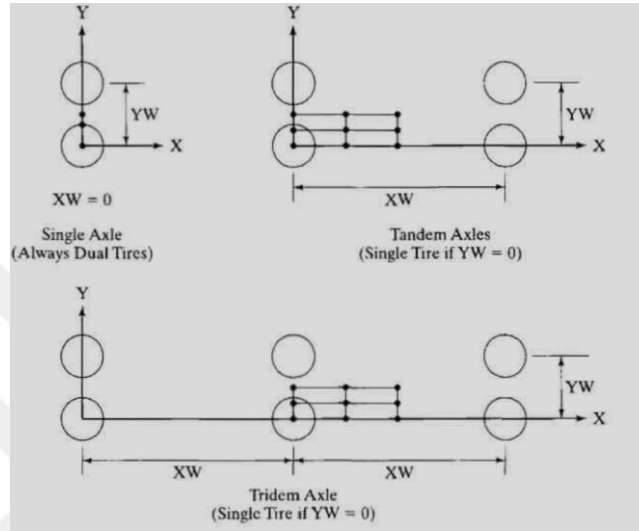
9.Adım; araç çubuğundan 'Load' seçme: LAYERINP ana menüsünde 'Load' menüsüne tıkladığında Şekil 3.12'deki ekran gelecektir. Satır sayısı veya yük grubu, 'General' menüsünde belirtildiği gibi NLG'ye eşittir. 'Load' ekranının detayları aşağıdaki gibidir:

- LOAD: Yükleme türünü ifade eder. Tek tekerlekli tek dingil için 0, çift tekerlekli tek dingil için 1, tandem dingil için 2 ve üçlü dingil için 3 atayın.

- CR: Dairesel yüklü alanların temas yarıçapını ifade eder.
- CP: Dairesel yüklü alanlar üzerindeki temas basıncını ifade eder.
- YW: y eksenini boyunca iki çift tekerlek arasındaki merkezden merkeze boşluğu ifade eder. Yalnızca bir tekerlek varsa 0 veya YÜK = 0 olarak atayın.
- XW: x eksenini boyunca iki dingil arasındaki merkezden merkeze boşluğu ifade eder. Yalnızca bir dingil varsa 0 atayın, yani YÜK = 0 veya 1.
- NR: Tek bir tekerlek altında analiz edilecek radyal koordinat sayısını (maksimum 25) ifade eder. LOAD = 0 olan tek bir tekerlek, bir eksen simetri durumudur, bu nedenle tepki noktalarının konumu radyal koordinatlar cinsinden ifade edilir ve boş bırakılamaz.
- NPT: Birden fazla tekerlek altında analiz edilecek x ve y koordinatlarındaki nokta sayısını (maksimum 25) ifade eder. YÜK > 0 ise, tepki noktalarının konumu x ve y kartezyen koordinatları cinsinden ifade edilir. Bu sütun girilmelidir ve boş bırakılamaz (Huang, 2004).

Belirli bir satırın yardımcı formuna, NR veya NPT için verileri yeniden yazmadan, o satıra çift tıklayarak girebilirsiniz. Çift tıklama yerine <Esc> tuşuna basarak da yardımcı forma girebilirsiniz, ancak <Esc> tuşuna basmadan önce noktalı dikdörtgeni satıra taşımayı

unutmayın. Yardımcı formun varlığından dolayı Enter tuşuna basılarak formun yukarıdan aşağıya doğru satır satır doldurulması gerekmektedir. Bir sonraki satıra geçmek için ok tuşunu kullanmayın çünkü Enter tuşu kullanılmadan yardımcı form girildiğinde bu girişler kaydedilmez. Ok tuşu, yalnızca yardımcı form olmadığında kullanılabilir. Bu formu ve gerekli tüm yardımcı formları doldurduktan sonra, LAYERINP ana menüsüne dönmek için OK'a tıklayın (Huang, 2004).



Şekil 3.13. Tekerlek ve dingil dizilimleri (Huang, 2004).

X and Y Coordinates of Response Points for Load Group No. 1 and Data Set No. 1

Point No.	XPT	YPT
1	0	0
2	0	3.375
3	0	6.75
4	8	0
5	8	3.375
6	8	6.75
7	16	0
8	16	3.375
9	16	6.75
10	24	0
11	24	3.375
12	24	6.75

(1) This auxiliary form appears automatically when NPT of a given load is typed on the main form. If NPT was specified previously, you can also enter this auxiliary form by double clicking the main form anywhere on the given load group, instead of retyping NPT to enter this auxiliary form.

(2) XPT (x coordinates of points to be analyzed).

(3) YPT (y coordinates of points to be analyzed).

(4) After typing the data in a cell, be sure to press the Enter key to make it effective.

(5) You can delete a line, or one of the points, by first clicking anywhere on the line to make it active and then press the <Ctrl>- keys. The NPT in the main form will be reduced automatically by 1.

(6) You can add a new line, or one more point, above any given line by first clicking the cell in the given line to make it active and then press the <Ctrl>-<Ins>. A blank line will appear for you to enter the necessary data. The NPT in the main form will increase automatically by 1. If you want to add a line after the last line, you can change NPT in the main form by adding 1 and a blank line will appear as the last line. Remember that always use the <Ctrl>-<Ins> keys to add a line unless the line to be added is the last line. By so doing, you don't have to retype any of the existing lines.

(7) After completing this form, click OK to return to the

Use <Ctrl>- to delete a line, <Ctrl>-<Ins> to insert a line, and to clear a cell.

OK

Şekil 3.14. x ve y koordinatlarındaki noktaların sayısı (NPT) için yardımcı form (Huang, 2004).

Radial Coordinates of Response Points for Load Group No. 1 of Data Set No. 1

Unit	cm
Point No.	RC
1	0
2	12
3	24
4	36
5	48
6	60

[1] This auxiliary form appears automatically when NR of a given load is typed on the main form. If NR was specified previously, you can also enter this auxiliary form by double clicking the main form anywhere on the given load group, instead of retyping NR to enter this auxiliary form.

[2] RC (radial distances, or R coordinates, of points to be analyzed).

[3] After typing the data in a cell, be sure to press the Enter key to make it effective.

[4] You can delete a line, or one of the points, by first clicking anywhere on the line to make it active and then press the <Ctrl>- keys. The NR in the main form will be reduced automatically by 1.

[5] You can add a new line, or one more point, above any given line by first clicking the cell in the given line to make it active and then press the <Ctrl>-<Ins>. A blank line will appear for you to enter the necessary data. The NR in the main form will increase automatically by 1. If you want to add a line after the last line, you can change NR in the main form by adding 1 and a blank line will appear as the last line. Remember that always use the <Ctrl>-<Ins> keys to add a line unless the line to be added is the last line. By so doing, you don't have to retype any of the existing lines.

[6] After completing this form, click OK to return to the

Use <Ctrl>- to delete a line, <Ctrl>-<Ins> to insert a line, and to clear a cell.

OK

Şekil 3.15. Radyal koordinat sayısı (NR) için yardımcı form (Huang, 2004).

10.Adım; yardımcı formun doldurulması: Şekil 3.14, x ve y koordinatlarındaki nokta sayısı (NPT) için yardımcı formu ve Şekil 3.15 radyal koordinat sayısı (NR) için yardımcı formu göstermektedir.

Nonlinear Layers Menu for Data Set No. 1

General Relaxation Nonseasonal Seasonal Mohr-Coulomb Theory

input default input input Use default input for clay Do not use default input for clay

[1] This form appears when the 'Nonlinear' menu on Main Menu of LAYERINP is clicked. If there is a nonlinear clay subgrade, you have to decide whether you want to use the defaulted parameter values of K1, K2, K3, K4, EMIN and EMAX for the four types of subgrade, as suggested in Figure 3.6 of the book. When creating a new file, it is suggested that these default values be used, as indicated by the black dot in the option button. However, if you don't want to use these suggested values or you want to keep the values you input previously, you should click the 'Do not use the default input for clay' option button so when you enter the Seasonal Input Parameters screen, these existing values will not be replaced by the suggested values again. When editing an existing file, the black dot will automatically appear in the 'Do not use default' button because it is improbable that you want to change the original data. Of course, you may click the other button if you want to replace the original data with the suggested values. You really don't have to pay any attention to these two buttons if you are using the suggested values all the time.

[2] You can point the arrow to the label below each menu for a longer description of the menu.

[3] Below each menu is a label with 'input' in red and 'default' in blue. The red label indicates that you must click the menu to supply some of the data, while the blue label under the Relaxation menu indicates that default values are provided so, if you want to use the defaults, there is no need to click the menu. Of course you can always click the menu to see what the defaults are and make the necessary change, if desired.

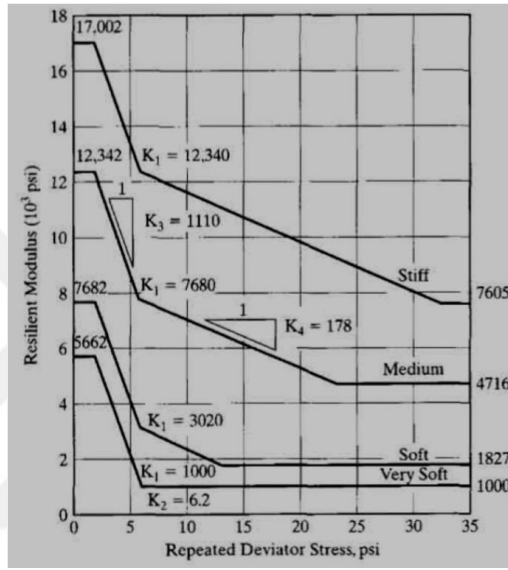
[4] After completing each data entry form, the word 'done' will be shown in the corresponding label. After completing all the forms on this screen, click OK to return to the Main Menu of LAYERINP.

[5] For the nonlinear elastic case, the elastic moduli of some layers are stress dependent and these layers must be identified. The elastic moduli of these nonlinear layers must be initially assumed and an iterative procedure is used until the moduli converge to a specified tolerance within 10 iterations. Any arbitrary values may be assumed, e.g. use the modulus of the subgrade or the K1 values of the

OK

Şekil 3.16. 'Nonlinear' ekranı (Huang, 2004).

11.Adım; araç çubuğundan ‘Nonlinear’ seçme: LAYERINP’in ana menüsündeki ‘Nonlinear’ menüsüne tıkladığında Şekil 3.16’daki gibi bir ekran gelecektir. Eğer lineer olmayan bir kil alt zemin varsa, varsayılan parametre değerlerini kullanmak isteyip istemediğinize karar vermelisiniz. Dört tür alt temel için esneklik modülü-sapma-gerilme için önerilen varsayılan parametre değerleri Şekil 3.17’dedir. Yeni bir dosya oluştururken, siyah nokta ile gösterildiği gibi bu varsayılan değerlerin kullanılması önerilir. Ancak önerilen bu değerleri kullanmak istemiyorsanız veya daha önce girdiğiniz değerleri korumak istiyorsanız, ‘Do not use the default input for clay’ butonuna tıklamalısınız, böylece ‘Seasonal’ ekranına girdiğinizde bu mevcut değerler önerilen değerlerle tekrar değiştirilmeyecektir (Huang, 2004).



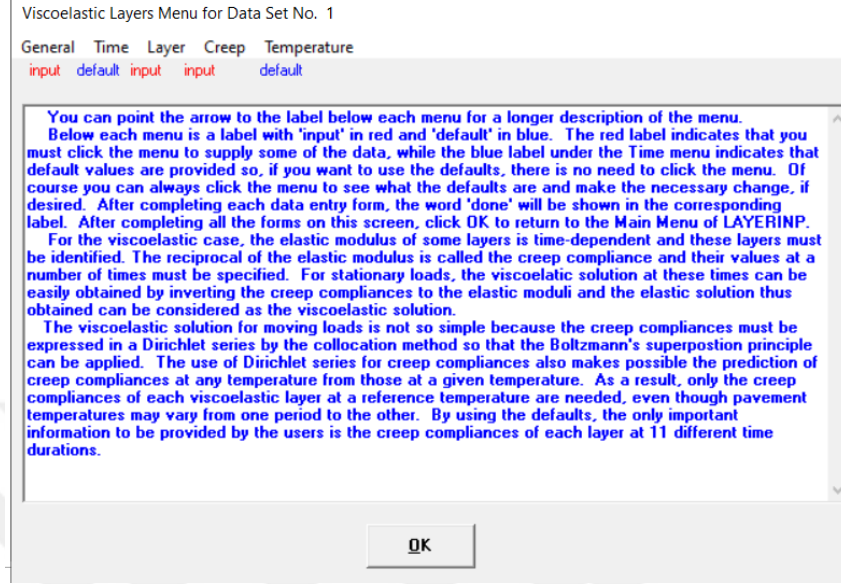
Şekil 3.17. Dört alt temel türü için Esneklik modül-sapma-gerilme ilişkisi (Huang, 2004).

Şekil 3.18, Nonlinear Layers Menu for Data Set No. 1 ekranını göstermektedir. Ekranın üst kısmında 'General' sekmesi seçilmiştir. 'input' etiketi kırmızı bir daireyle vurgulanmıştır. Ekranın alt kısmında 'done' etiketi kırmızı bir daireyle vurgulanmıştır. Ekranın ortasında, 'Use default input for clay' butonu seçilmiştir. Ekranın alt kısmında, 'Do not use default input for clay' butonu seçilmiştir. Ekranın alt kısmında, 'This form appears when the 'Nonlinear' menu on Main Menu of LAYERINP is clicked. If there is' mesajı yer almaktadır.

Şekil 3.18. Veri girişi tamamlandıktan sonra etikette değişiklik (Huang, 2004).

Menünün daha uzun bir açıklaması için oku her menünün altındaki etikete yönlendirebilirsiniz. Her menünün altında kırmızı ‘input’ ve mavi ‘default’ yazan bir etiket vardır ve istenirse gerekli değişiklikleri yapın. Şekil 3.18’de görülebileceği üzere, her birini tamamladıktan sonra veri giriş formunda, karşılık gelen etikette ‘done’ ifadesi görünecektir. Bu ekrandaki tüm formları doldurduktan sonra, LAYERINP ana menüsüne dönmek için OK’a tıklayın.

Nonlinear menüsünün öğelerinin (General, Relaxation, Nonlinear, Seasonal and Mohr-Coulomb Theory) daha uzun açıklaması için, girmek istediğiniz mevcut verilerinize göre istediğiniz her birine tıklayın ve tamamladıktan sonra ‘Nonlinear Layers Menu’ye dönmek için ‘OK’a tıklayın.



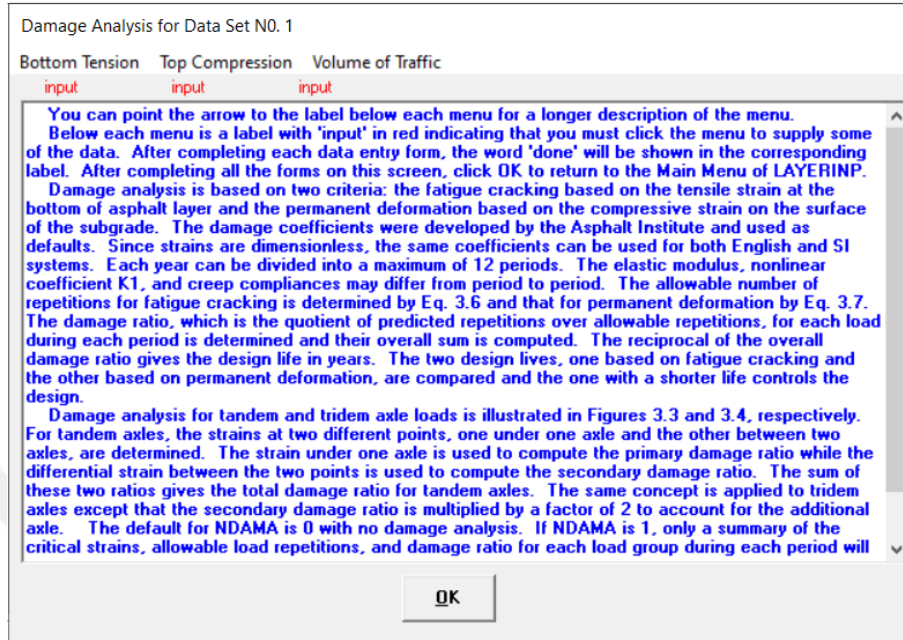
Şekil 3.19. ‘Viscoelastic’ ekranı (Huang, 2004).

12.Adım; araç çubuğundan ‘Viscoelastic’ seçme: LAYERINP ana menüsünde ‘Viscoelastic’ menüsüne tıkladığında Şekil 3.19’deki ekran açılacaktır. Menünün daha uzun açıklaması için oku her menünün altındaki etikete doğrultabilirsiniz. Kırmızı etiket, verilerin bir kısmını sağlamak için menüye tıklamanız gerektiğini belirtirken, ‘Time’ menüsünün altındaki mavi etiket, varsayılan değerlerin sağlandığını gösterir. Bu nedenle, varsayılanları kullanmak istiyorsanız, menüye tıklamanıza gerek yoktur. Elbette, varsayılanların ne olduğunu görmek ve istenirse gerekli değişikliği yapmak için her zaman menüye tıklayabilirsiniz. Her bir veri giriş formunu doldurduktan sonra, ilgili etikette ‘done’ yazısı görüntülenecektir. Bu ekrandaki tüm formları doldurduktan sonra, LAYERINP ana menüsüne dönmek için OK’a tıklayın (Huang, 2004).

Viskoelastik durum için, bazı tabakaların elastisite modülü zamana bağlıdır ve bu tabakaların tanımlanması gerekir. Elastisite modülünün tersi, sünme uyumu olarak adlandırılır ve değerleri birkaç kez değerleri belirtilmelidir. Durağan yükler için, bu zamanlarda viskoelastik çözüm, sünme uyumlarının elastik modüle çevrilmesiyle kolayca elde edilebilir ve bu şekilde elde edilen elastik çözüm, viskoelastik çözüm olarak kabul edilebilir.

Hareket eden yükler için viskoelastik çözüm o kadar basit değildir, çünkü Boltzmann’ın bindirme kuralının uygulanabilmesi için, sünme uyumlarının eş dizim yöntemiyle bir Dirichlet serisinde ifade edilmesi gerekir. Sünme uyumları için Dirichlet serilerinin kullanılması, belirli bir sıcaklıktakilerden herhangi bir sıcaklıktaki sünme uyumlarının tahminini de mümkün kılar. Sonuç olarak, kaplama sıcaklıkları bir dönemden diğerine değişebilse, yalnızca bir referans sıcaklıkta her bir

viskoelastik tabakanın sünme uyumlarına ihtiyaç vardır. Varsayılanlar kullanılarak, kullanıcılar tarafından sağlanacak tek önemli bilgi, her tabakanın 11 farklı zaman dilimindeki sürünme uyumudur.



Şekil 3.20. 'Damage' ekranı (Huang, 2004).

13.Adım; araç çubuğunda 'Damage' seçme: LAYERINP ana menüsünde bulunan 'Damage' menüsüne tıkladığında Şekil 3.20'deki ekran açılacaktır. Menünün daha uzun açıklaması için oku her menünün altındaki etikete doğrultabilirsiniz (Huang, 2004).

Her menünün altında, verilerin bir kısmını sağlamak için menüyü tıklamanız gerektiğini belirten kırmızı 'input' yazan bir etiket vardır. Her veri giriş formunu doldurduktan sonra ilgili etikette 'done' kelimesi gösterilecektir. Bu ekrandaki tüm formları doldurduktan sonra, LAYERINP'in ana menüsüne dönmek için OK'a tıklayın.

Hasar analizi iki kritere dayanmaktadır: Asfalt tabakasının altındaki çekme gerilmesine dayalı yorulma çatlama ve alt temelin yüzeyindeki basınç gerilmesine dayalı kalıcı deformasyon. Hasar katsayıları Asfalt Enstitüsü tarafından geliştirilmiş ve varsayılan olarak kullanılmıştır. Gerilmeler boyutsuz olduğundan, aynı katsayılar hem English hem de SI sistemleri için kullanılabilir. Her yıl en fazla 12 döneme ayrılabilir. Elastisite modülü, nonlineer katsayı K1 ve sünme uyumları dönemden döneme farklılık gösterebilir. İzin verilen tekrar sayısı yorulma çatlama için Eşitlik 3.1 ile, kalıcı deformasyon için Eşitlik 3.2 ile belirlenir.

$$N_f = f_1 (\epsilon_t)^{-f_2} (E_1)^{-f_3} \quad (3.1)$$

- N_f , yorulma çatlama için izin verilen yük tekrarı sayısını,
- ϵ_t , asfalt tabakasının altındaki çekme gerilmesini,

- E_1 , asfalt tabakasının elastisite modülünü,
- f_1 , f_2 ve f_3 , laboratuvar yorulma testlerinden belirlenen sabitleri ifade eder ve f_1 , saha performansı gözlemleriyle bağıntılı olacak şekilde değiştirilmiştir.

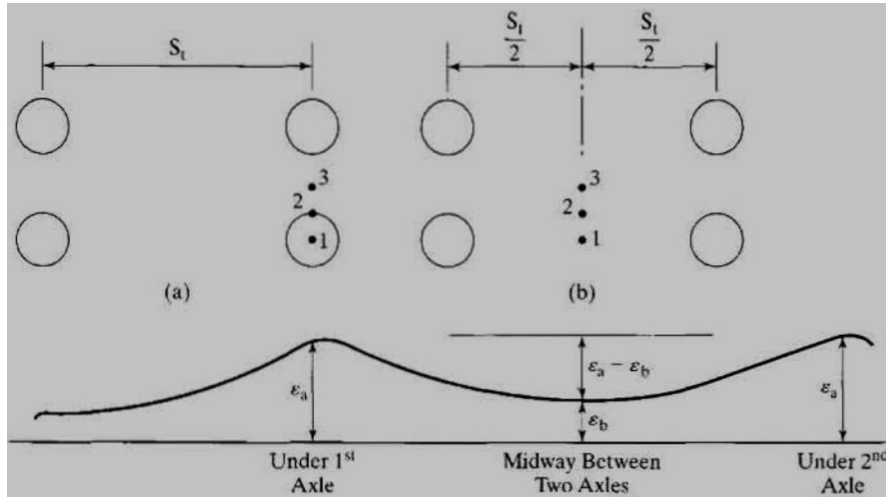
Asfalt Enstitü, analitik tabanlı tasarım prosedüründe f_1 , f_2 ve f_3 için sırasıyla 0.0796, 3.291 ve 0.854 kullanmıştır; Shell tarafından kullanılan karşılık gelen değerler ise 0.0685, 5.671, ve 2.363'tür. (Shook vd., 1982).

$$N_d = f_4 (\epsilon_c)^{-f_5} \quad (3.2.)$$

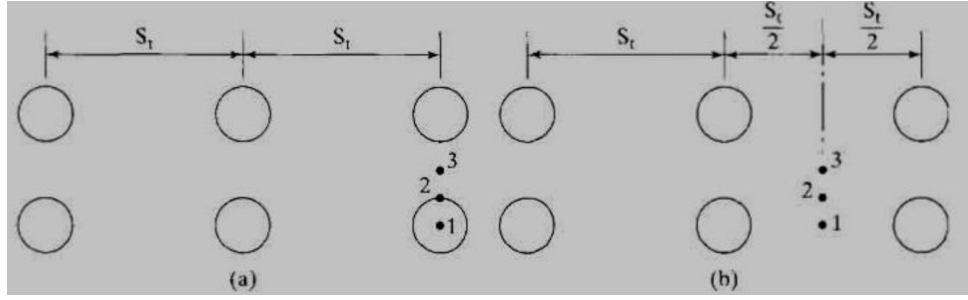
- N_d , kalıcı deformasyonu sınırlamak için izin verilen yük tekrarı sayısını,
- ϵ_c , alt zeminin tepesindeki basınç gerilmesini,
- f_4 ve f_5 , yol testleri veya saha performansından belirlenen sabitleri ifade eder.

f_4 ve f_5 değerleri Asfalt Enstitü (AI, 1982) tarafından 1.365×10^{-9} ve 4.477, Shell (Claussen vd., 1977) tarafından 6.15×10^{-7} ve 4.0, University of Notting -ham (Brown vd., 1977) tarafından 1.13×10^{-6} ve 3.571 önerilmiştir.

Öngörülen tekrarların izin verilen tekrarlara bölümü olan hasar oranı, her periyottaki her yük için belirlenir ve toplamları hesaplanır. Toplam hasar oranının tersi, tasarım ömrünü yıl olarak verir. Tandem ve tridem dingil yükleri için hasar analizi sırasıyla Şekil 3.21 ve 3.22'de gösterilmektedir (Huang, 2004).



Şekil 3.21. Tandem-dingil yüklerinin hasar analizi (Huang, 2004).



Şekil 3.22. Tridem-dingil yüklerinin hasar analizi (Huang, 2004).

Tandem dingiller için bir dingil altında ve iki dingil arasında olmak üzere iki farklı noktada gerilmeler belirlenir. Birincil hasar oranını hesaplamak için bir aksın altındaki gerilme kullanılırken, iki nokta arasındaki diferansiyel gerilme ikincil hasar oranını hesaplamak için kullanılır. Bu iki oranın toplamı tandem dingiller için toplam hasar oranını verir. İkincil hasar oranının ilave dingili hesaba katmak için 2 ile çarpılması dışında aynı kavram üçlü dingiller için de geçerlidir. NDAMA için varsayılan, hasar analizi olmadan 0'dır. NDAMA 1 ise, her dönem boyunca her yük grubu için kritik gerilmelerin, izin verilen yük tekrarlarının ve hasar oranının yalnızca bir özeti sunulacaktır. NDAMA = 2 ise, yer değiştirmelerin, gerilmelerin ve yer değiştirmelerin tam tablosunu içeren daha ayrıntılı bir çıktı sunulacaktır.

14.Adım; verileri yeni bir dosyaya kaydetmek için 'Save As'a tıklama: "Problem4" veya buna benzer bir ad verin. Bu program DOS tabanlı olduğu için, muhtemelen gömülü boşluklu dosya adlarını veya 8 karakterden (her zaman ".dat" olacak dosya uzantısını saymazsak) fazla dosya adlarını kullanamazsınız.

15.Adım: 'Exit'e tıklayarak LAYERINP'den çıkış yapın.

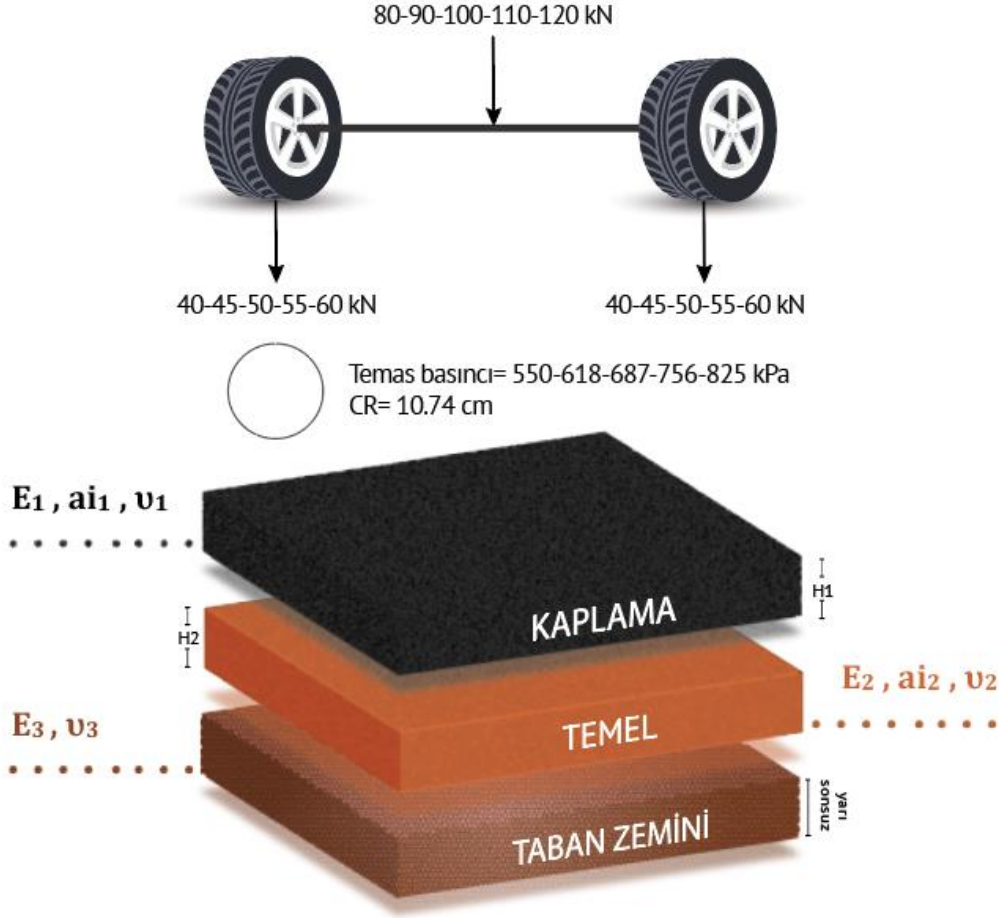
16.Adım: Hesaplamaları yapmak için KENLAYER'a tıklayın.

17.Adım: Çıktı dosyasını görüntülemek için EDITOR'e tıklayın (Huang, 2004).

3.2. Üstyapı Modelleri

3.2.1. Birinci Model

Üstyapı modellerinden ilki taban zemini üzerine yerleştirilmiş kaplama ve temel tabakalarından oluşmaktadır.



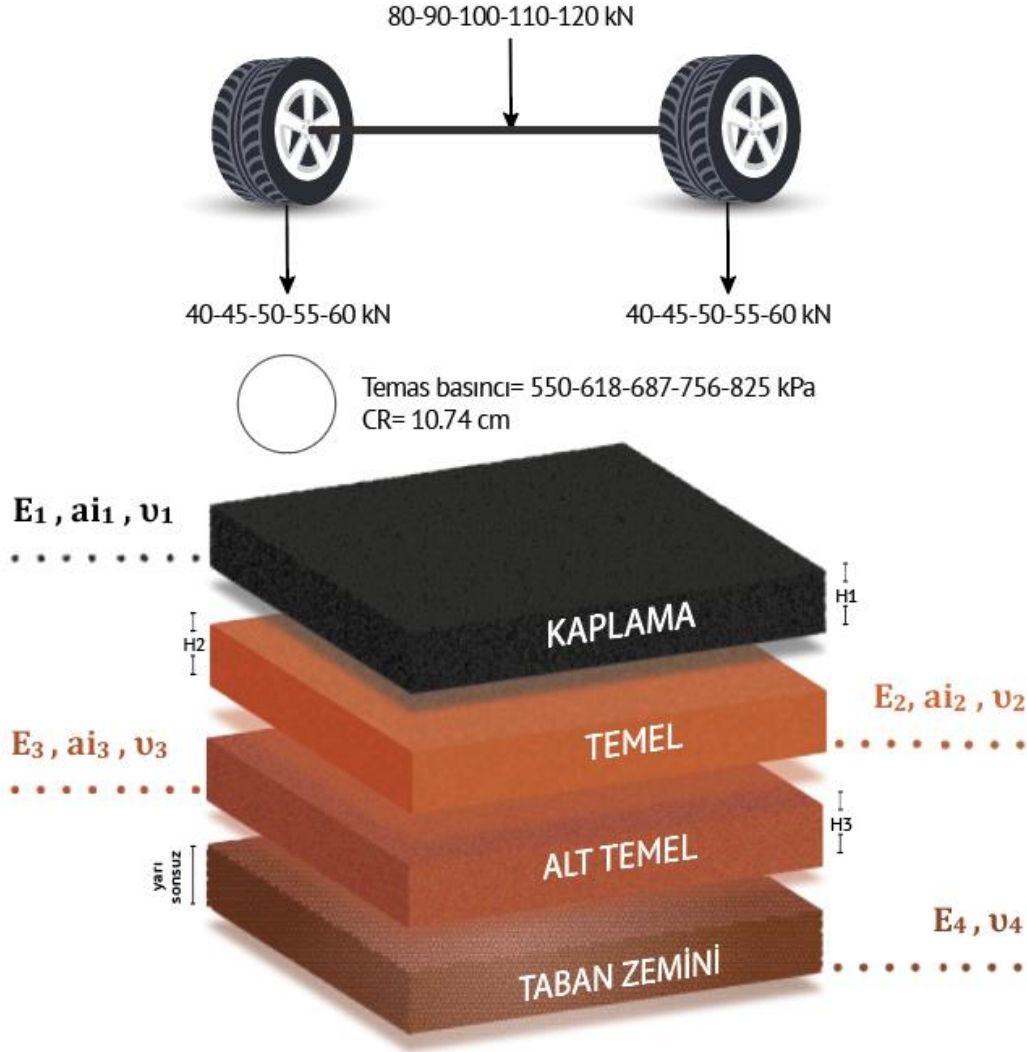
Şekil 3.23. Birinci modelde kullanılan üstyapı kesiti.

Bu üstyapı sistemi için farklı tekerlek yükleri altında elastisite modülü değerleri değiştirilerek analizler yapılmıştır. Kaplama tabakası için elastisite modülü değerleri 2000 MPa, 2500 MPa, 3000 MPa, 3500 MPa ve 4000 MPa; temel tabakası için 200 MPa, 250 MPa ve 300 MPa, 350 MPa ve 400 MPa; taban zemini için 60 MPa, 70 MPa, 80 MPa, 90 MPa ve 100 MPa seçilmiştir. Poisson oranı değerleri ise kaplama tabakası için 0.35, temel tabakası için 0.40, taban zemini için 0.45 alınmıştır. Tabaka kalınlıkları kaplama için 10 cm, temel için 25 cm seçilmiştir. Analizler diğer tabakaların elastisite modülleri sabit tutularak kaplama tabasının elastisite modülün değiştirilmesiyle, aynı işlemlerin sırasıyla temel tabakası ve taban zemini için yapılmasıyla gerçekleştirilmiştir.

Diğer analizler ise tabaka kalınlıklarının değiştirilmesiyle yapılmıştır. Bu analizlerde ise elastisite modülü kaplama tabakası için 2500 MPa; temel tabakası için 200 MPa; taban zemini için 80 MPa'da sabitlenmiştir. Tabaka kalınlıkları kaplama tabakası için 5-6-7-8 cm; temel tabakası için 15-20-25-30 cm olarak alınmıştır. Taban zemini kalınlığı yarı sonsuzdur. Öncelikle temel tabakasının kalınlık değerleri minimumda sabit tutularak kaplama tabakası kalınlıkları değiştirilerek analizler yapılmış daha sonra aynı işlemler temel tabakası için yapılmıştır.

3.2.2. İkinci Model

İkinci üstyapı modelimiz taban zemini üzerine yerleştirilmiş kaplama, temel ve alt temel tabakalarından oluşmaktadır.



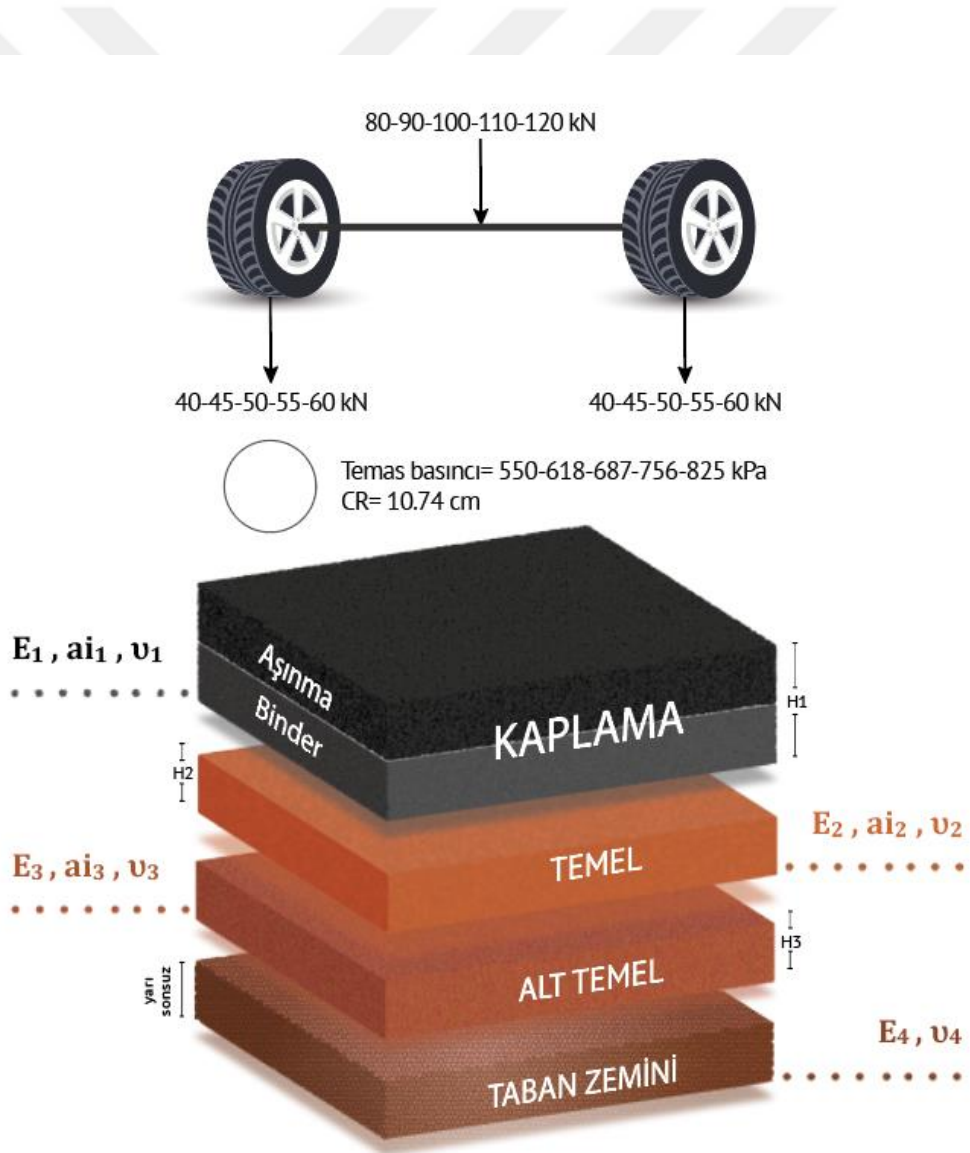
Şekil 3.24. İkinci modelde kullanılan üstyapı kesiti.

Kaplama tabakası için elastisite modülü değerleri 2000 MPa, 2500 MPa, 3000 MPa, 3500 MPa ve 4000 MPa; temel tabakası için 200 MPa, 250 MPa ve 300 MPa, 350 MPa ve 400 MPa; alt temel tabakası için 100 MPa, 125 MPa, 150 MPa, 175 MPa, 200MPa; taban zemini için 60 MPa, 70 MPa, 80 MPa, 90 MPa ve 100 MPa seçilmiştir. Poisson oranı değerleri ise kaplama tabakası için 0.35, temel tabakası için 0.40, alt temel tabakası için 0.35, taban zemini için 0.45 alınmıştır. Tabaka kalınlıkları kaplama için 10 cm, temel için 25 cm, alt temel için 20 cm seçilmiştir.

Diğer analizler ise tabaka kalınlıklarının değiştirilmesiyle yapılmıştır. Bu analizlerde ise elastisite modülü kaplama tabakası için 2500 MPa; temel tabakası için 200 MPa; alt temel tabakası için 150 MPa; taban zemini için 80 MPa'da sabitlenmiştir. Tabaka kalınlıkları kaplama tabakası için 5-6-7-8 cm; temel tabakası için 15-20-25-30 cm; alt temel tabakası için 15-20-25-30 cm olarak alınmıştır. Taban zemini kalınlığı yarı sonsuzdur. Öncelikle diğer tabakaların kalınlık değerleri minimumda sabit tutularak kaplama tabakası kalınlıkları değiştirilerek analizler yapılmış daha sonra aynı işlemler temel ve alt temel tabakası için yapılmıştır.

3.2.3. Üçüncü Model

Üçüncü üstyapı modelimiz taban zemini üzerine yerleştirilmiş aşınma ve binder tabakalarında oluşan kaplama, temel ve alt temel tabakalarından oluşmaktadır.



Şekil 3.25. Üçüncü modelde kullanılan üstyapı kesiti.

Kaplama tabakasını oluŐturan aşınma tabakası için elastisite modülü değerleri 2000 MPa, 2500 MPa, 3000 MPa, 3500 MPa ve 4000 MPa; binder tabakası için 2000 MPa, 2250 MPa, 2500 MPa, 2750 MPa, 3000 MPa; temel tabakası için 200 MPa, 250 MPa ve 300 MPa, 350 MPa ve 400 MPa; alt temel tabakası için 100 MPa, 125 MPa, 150 MPa, 175 MPa, 200MPa; taban zemini için 60 MPa, 70 MPa, 80 MPa, 90 MPa ve 100 MPa seçilmiştir. Poisson oranı değerleri ise aşınma tabakası için 0.35, binder tabakası için 0.35, temel tabakası için 0.40, alt temel tabakası için 0.35, taban zemini için 0.45 alınmıştır. Tabaka kalınlıkları aşınma tabakası için 5 cm, binder tabakası için 5 cm, temel için 25 cm, alt temel için 20 cm seçilmiştir.

Diğer analizler ise tabaka kalınlıklarının değiştirilmesiyle yapılmıştır. Bu analizlerde ise elastisite modülü aşınma tabakası için 2500 MPa; binder tabakası için 2250 MPa; temel tabakası için 200 MPa; alt temel tabakası için 150 MPa; taban zemini için 80 MPa'da sabitlenmiştir. Tabaka kalınlıkları aşınma tabakası için 4-5 cm; binder tabakası için 4-5 cm; temel tabakası için 15-20-25-30 cm; alt temel tabakası için 15-20-25-30 cm olarak alınmıştır. Taban zemini kalınlığı yarı sonsuzdur. Öncelikle diğer tabakaların kalınlık değerleri minimumda sabit tutularak aşınma tabakası kalınlıkları değiştirilerek analizler yapılmış daha sonra aynı işlemler diğer tabakalar için yapılmıştır.

4.KENPAVE'DE VERİ ANALİZİ

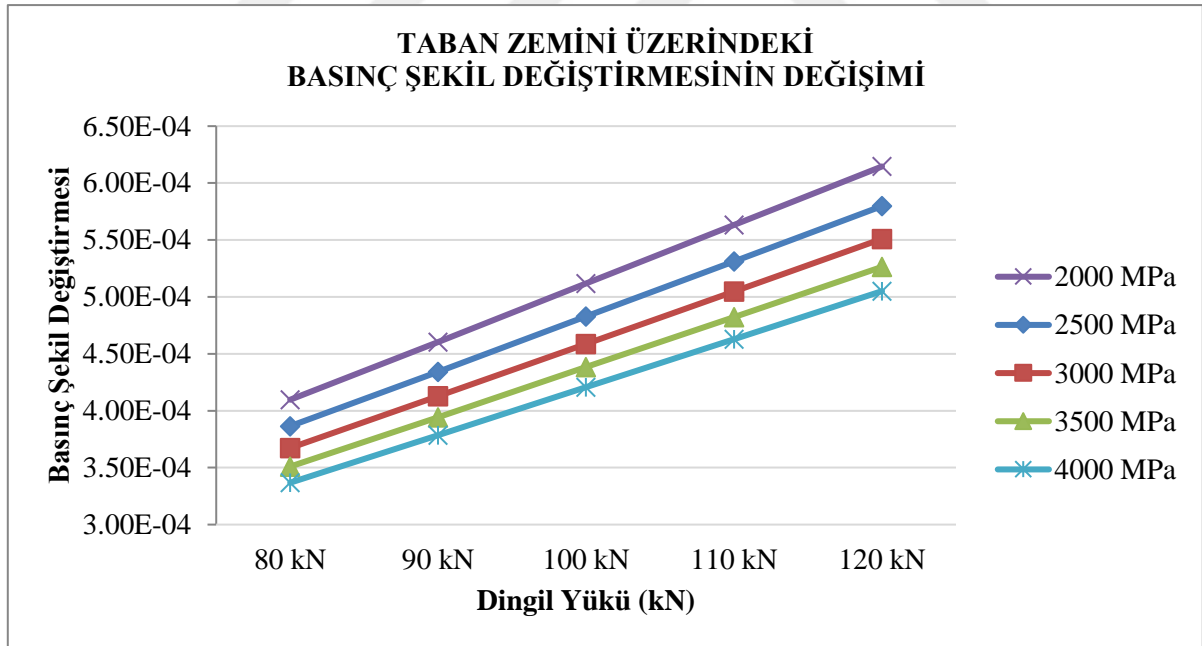
4.1. Birinci Model İçin Analiz Sonuçları

4.1.1. Basınç ve Çekme Şekil Değiştirme Hesabı

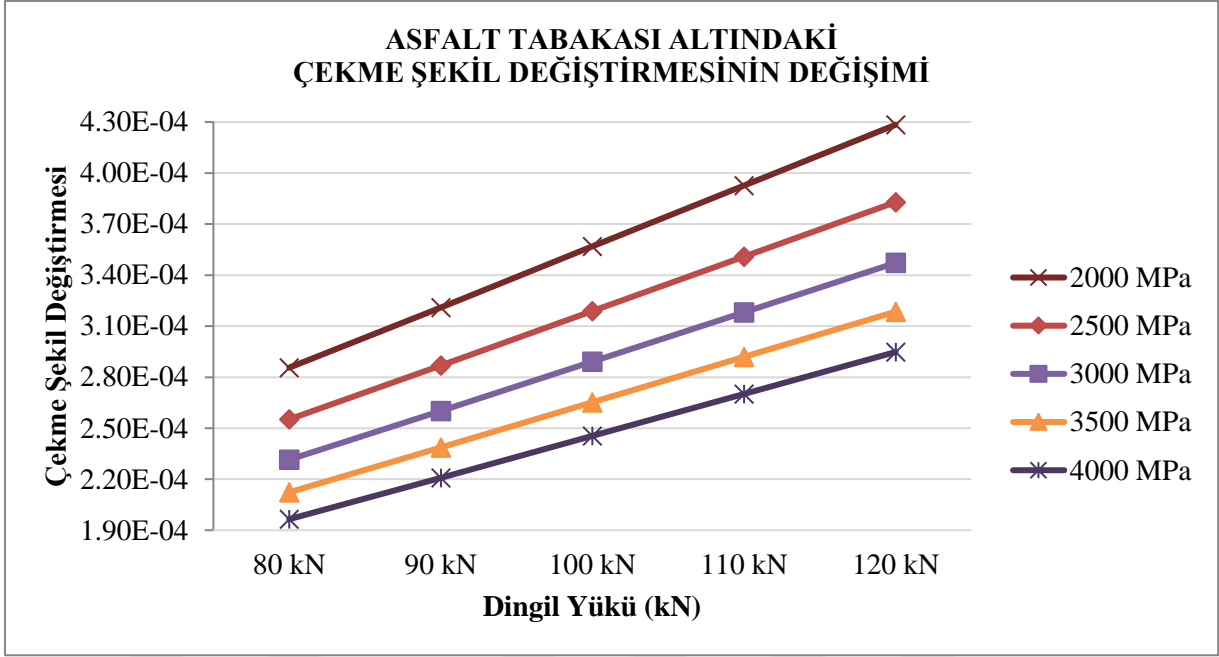
KENPAVE programında gerçekleştirilen analizler sonucu kaplama tabakası, temel tabakası ve taban zemininin her biri için basınç ve çekme şekil değiştirme değerleri elde edilmiştir. Elde edilen değerlerle grafikler oluşturulmuştur.

Grafiklerin hepsi incelendiğinde, dingil yükünün artmasıyla kaplama tabakası, temel tabakası ve taban zemininin basınç ve çekme şekil değiştirme değerleri %25-50 aralığında artmıştır.

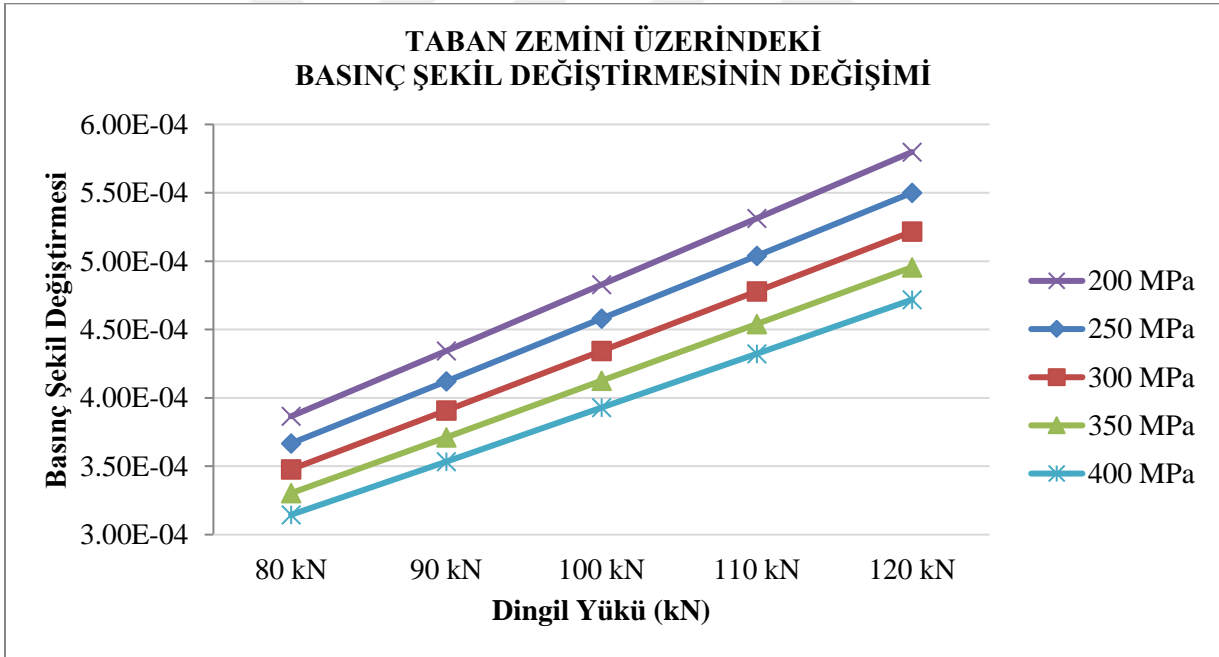
Elastisite modülünün artırılmasıyla ise basınç ve çekme şekil değiştirmelerinin azaldığı görülmektedir. Kaplama tabakasının basınç şekil değiştirme değişiminin azalma oranı %5-18 aralığındayken, çekme şekil değiştirme değişiminin azalma oranı %10-31 aralığındadır. Temel tabakasının basınç şekil değiştirme değişiminin azalma oranı %5-18 aralığındayken, çekme şekil değiştirme değişiminin azalma oranı %9-31 aralığındadır. Taban zemininin basınç ve çekme şekil değiştirme değişiminin azalma oranı %0.7-2.3 aralığındadır.



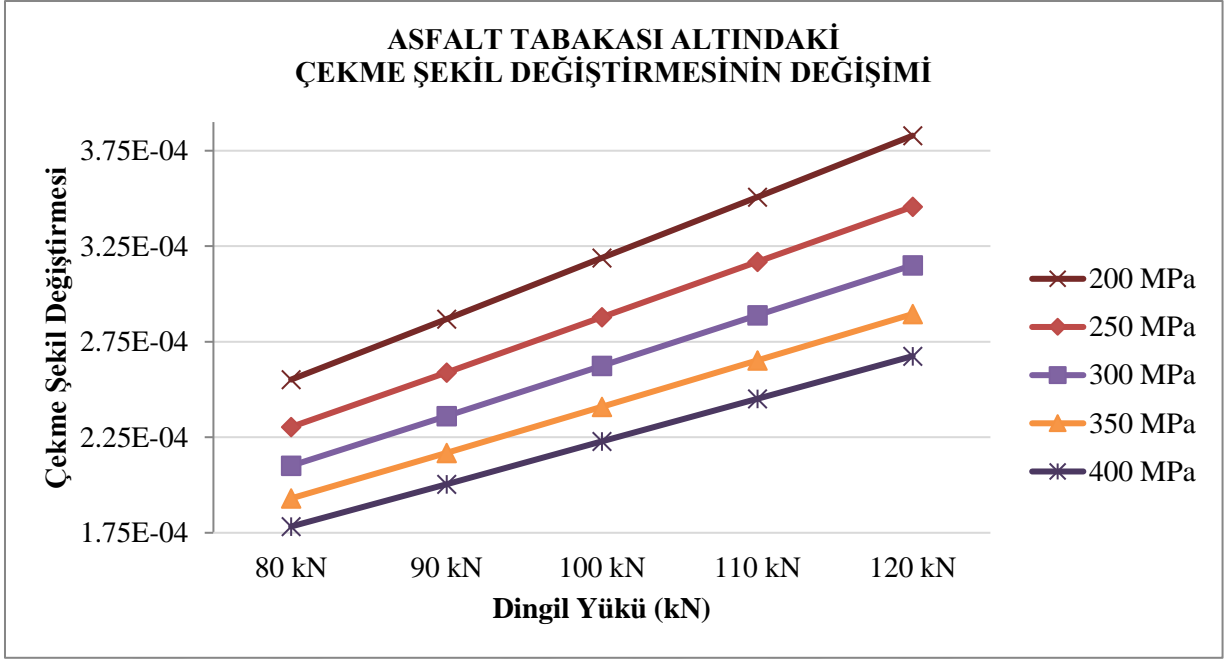
Şekil 4.1. Kaplama tabakasının elastisite modülü değişimine göre taban zeminini üzerindeki basınç şekil değiştirme (1. Model).



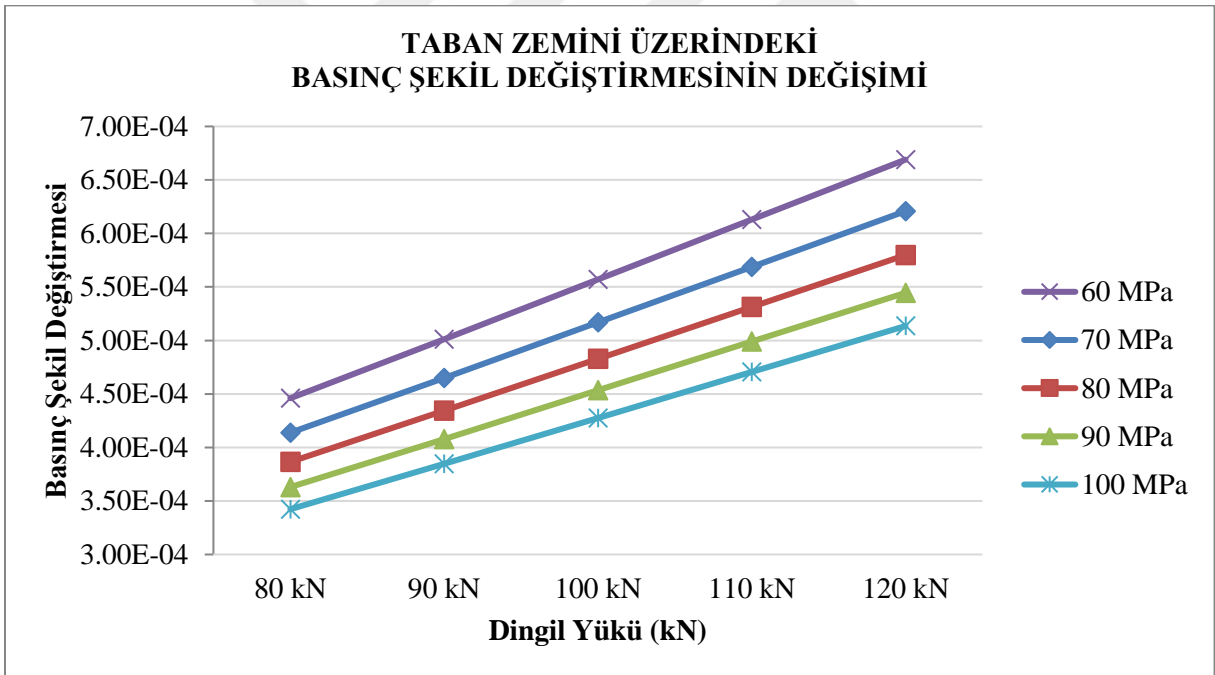
Şekil 4.2. Kaplama tabakasının elastisite modülü değişimine göre çekme şekil değişirmesi (1. Model).



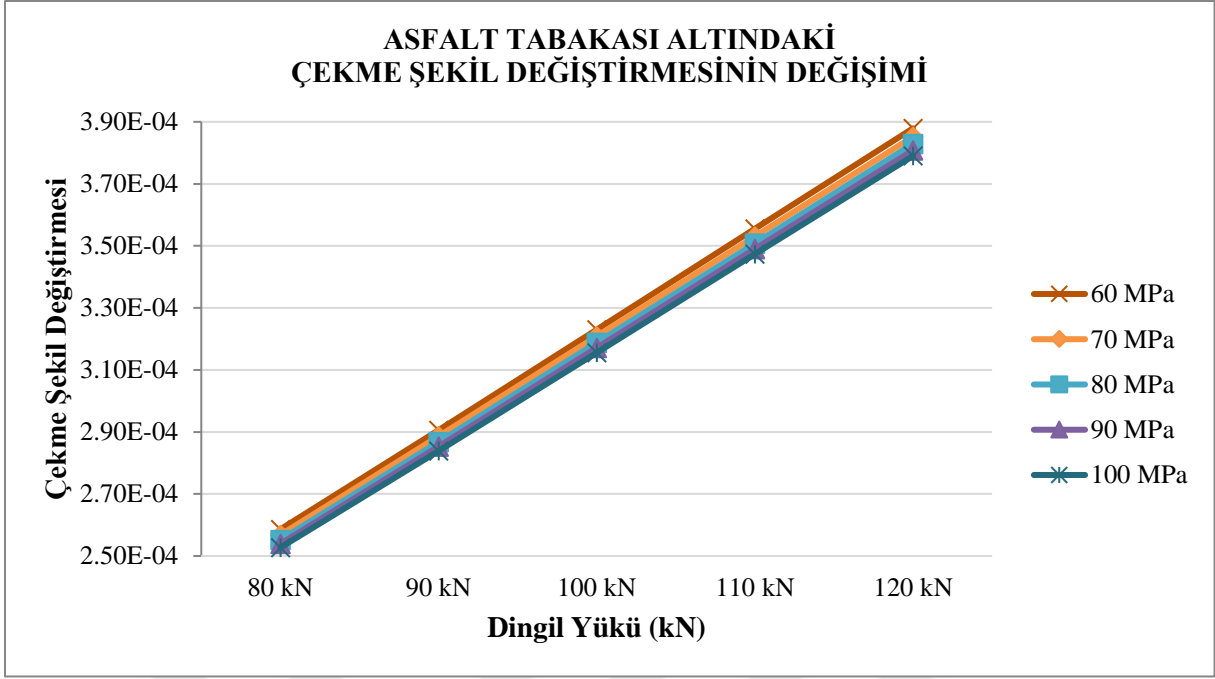
Şekil 4.3. Temel tabakasının elastisite modülü değişimine göre basınç şekil değişirmesi (1. Model).



Şekil 4.4. Temel tabakasının elastisite modülü değişimine göre çekme şekil değiştirmesi (1. Model).



Şekil 4.5. Taban zemininin elastisite modülü değişimine göre basınç şekil değiştirmesi (1. Model).



Şekil 4.6. Taban zemininin elastisite modülü değişimine göre çekme şekil değişimi (1. Model).

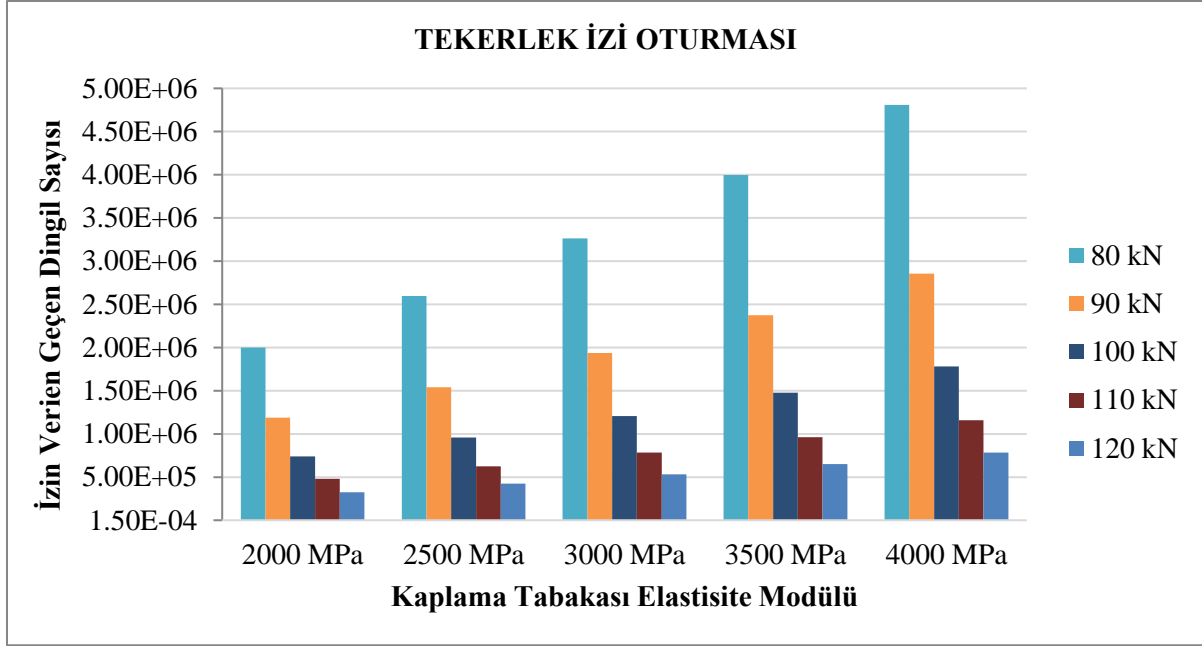
4.1.2. İzin Verilen Yük Tekrar Sayısı Hesabı

Yoldan geçmesine izin verilen yük tekrar sayılarını hesaplamak için Bölüm 3.1.2’de verilen Formül 3.1 ve 3.2’den yararlanılmıştır. Bu formüller de kullanılan $f1$, $f2$, $f3$, $f4$ ve $f5$ katsayıları için dünya çapındaki farklı karayolu organizasyonları kendi deneyimlerine göre farklı değerler türetmişlerdir. Tablo 4.1 de bu değerler görülmektedir.

Tablo 4.1. Farklı kuruluşlar için bozulma modeli katsayıları (Behiry, 2012).

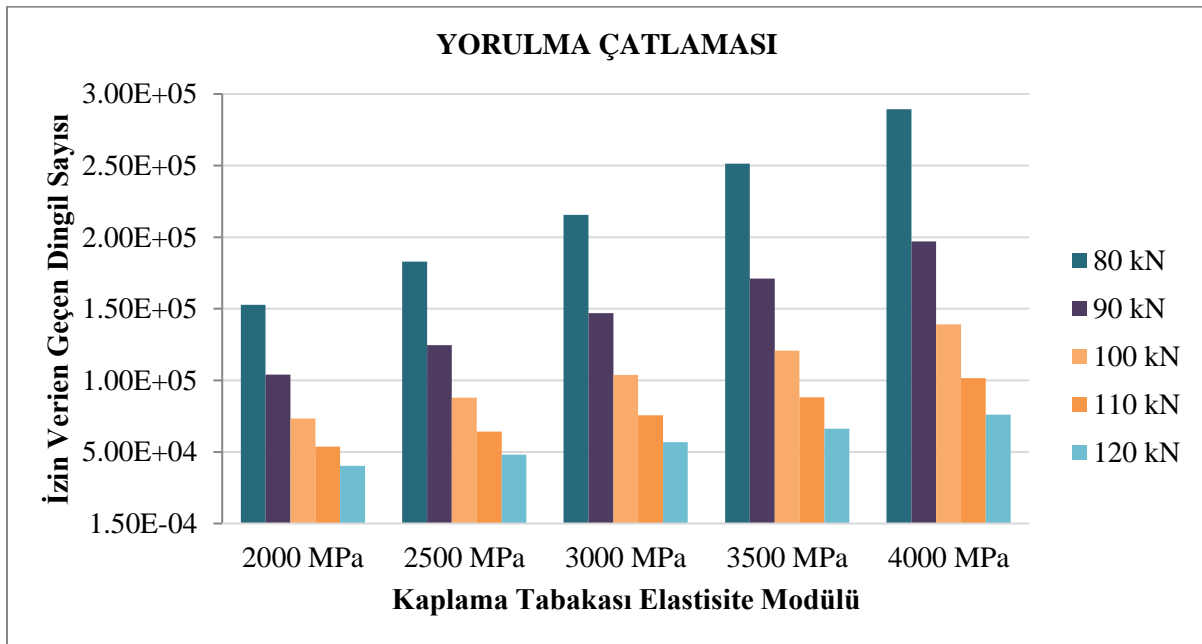
	$f1$	$f2$	$f3$	$f4$	$f5$
Asphalt Instutie	0.0796	3.291	0.854	1.37E-09	4.477
Shell Research	0.0685	5.671	2.363	6.15E-07	4
US Army Corps of Engineers	497.156	5	2.66	1.81E-15	6.527
Belgian Road Research Center	4.92E-14	4.76	0	3.05E-09	4.35
Transport and Road Research Laboratory	1.66E-10	4.32	0	1.13E-06	3.75

Bu tez çalışması kapsamında Tablo 4.1’de verilen katsayılar kullanılarak izin verilen yük tekrarı sayısı hesapları yapılmıştır. Hesaplamalar, kaplama tabakası, temel tabakası ve taban zemini için belirlenen her bir elastisite modülü değeri için ayrı ayrı yapılmıştır.



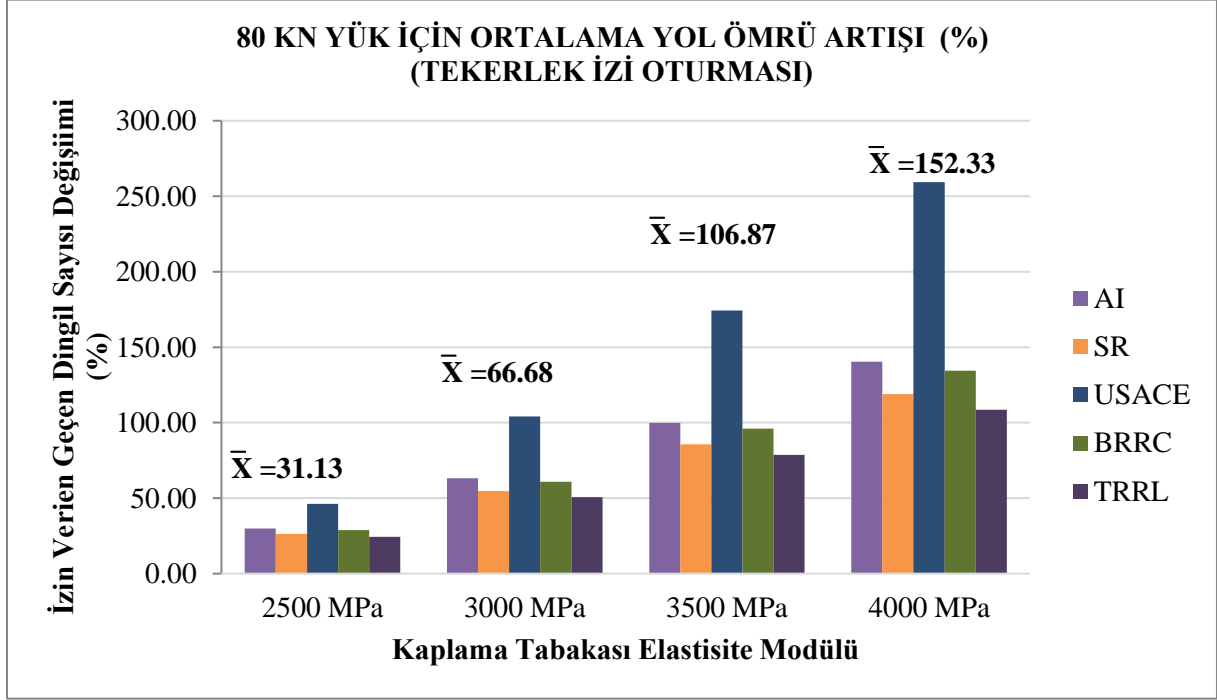
Şekil 4.7. Kaplama tabakasının elastisite modülü değişimine göre tekerlek izi oturması için izin verilen yük tekrar sayısı (1. Model).

Şekil 4.7’de görüldüğü üzere birinci modelin kaplama tabakasının elastisite modülü arttıkça her bir dingil yükü değeri için yoldan geçmesine izin verilen dingil sayısının arttığı açıkça görülmektedir. Bu artış oranı %30-140 aralığındadır. Ancak her bir farklı elastisite modülü değeri için dingil yükü değerinin artışı yoldan geçmesine izin verilen dingil sayısının azalmasına neden olmuştur. Bu azalma oranı %40-84 aralığındadır.



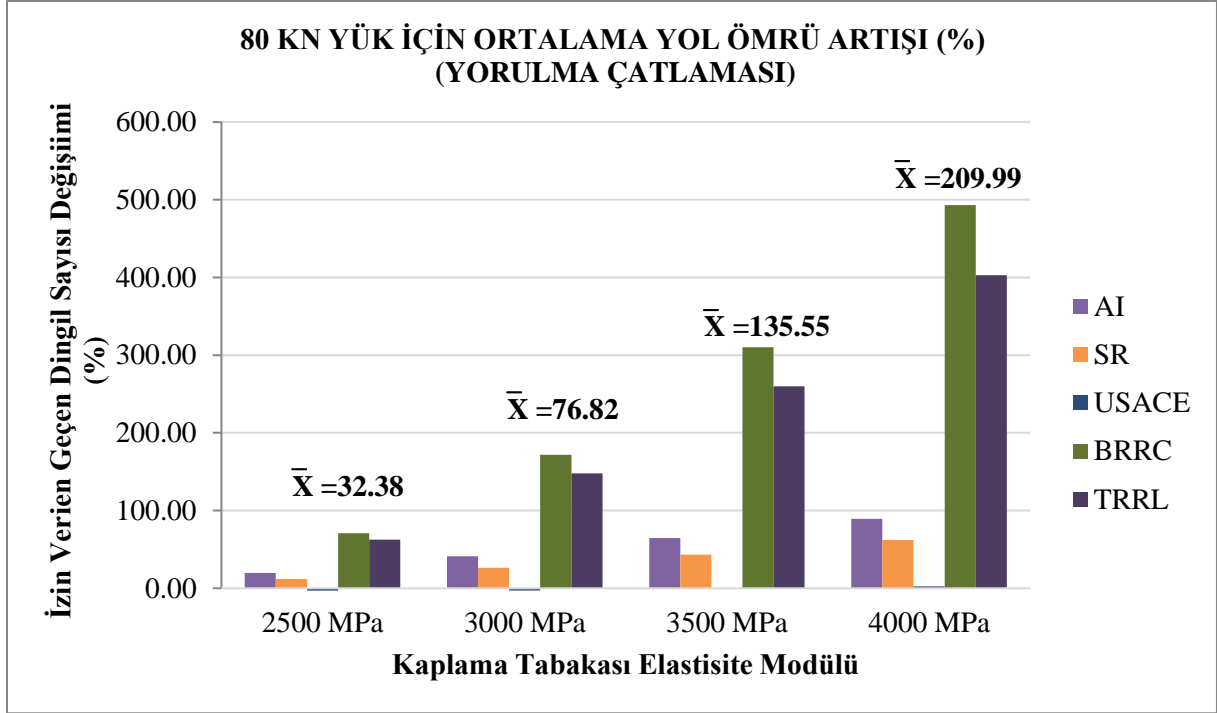
Şekil 4.8. Kaplama tabakasının elastisite modülü değişimine göre yorulma çatlama oluşumu için izin verilen yük tekrar sayısı (1. Model).

Şekil 4.8’de görüldüğü üzere birinci modelin kaplama tabakasının elastisite modülü arttıkça her bir dingil yükü değeri için yoldan geçmesine izin verilen dingil sayısı artmıştır. Bu artış oranı %19-89 aralığındadır. Her bir farklı elastisite modülü değeri için dingil yükü değerinin artışı yoldan geçmesine izin verilen dingil sayısının azalmasına neden olmuştur. Bu azalma oranı %32-74 aralığındadır.



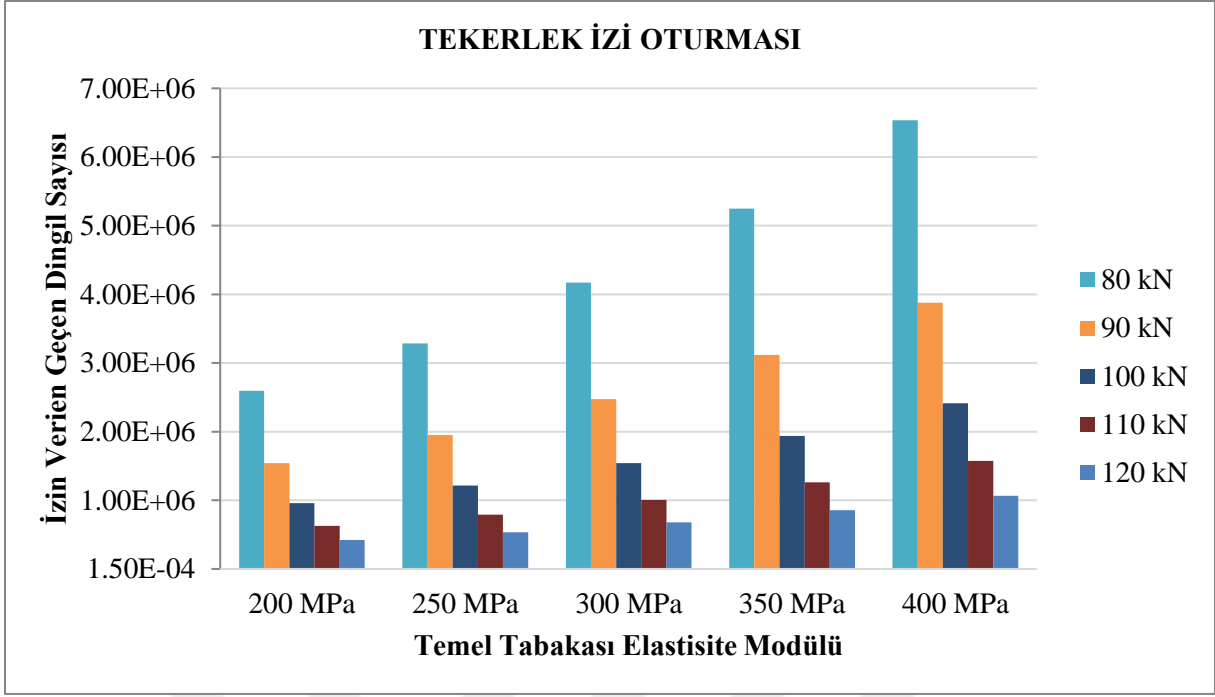
Şekil 4.9. Kaplama tabakasının elastisite modülü değişimine göre 80 kN dingil yükü altında izin verilen yük tekrar sayısının farklı kuruluşlara göre değişimi (%) (1. Model).

Şekil 4.9’da Asphalt Institute, Shell Research, US Army Corps of Engineers, Belgian Road Research Center ve Transport and Road Research Laboratory kuruluşlarının önerdiği katsayılar kullanılarak hesaplanan 80 kN dingil yükü değeri için yoldan geçmesine izin verilen dingil sayıları karşılaştırılmıştır. Grafikte her bir sütun grubu üzerinde gösterilen ortalama değerler, kaplama tabakasının elastisite modülü arttıkça farklı kuruluşların önerdiği katsayılara göre yoldan geçmesine izin verilen dingil yükü sayılarındaki ortalama artış yüzdesini göstermektedir. Buna göre kaplama tabakasının elastisite modülü 2500-3000-3500-4000 MPa olduğunda yoldan geçmesine izin verilen dingil sayıları sırasıyla ortalama %31.13, %66.68, %106.87, %152.33 oranında artmıştır.



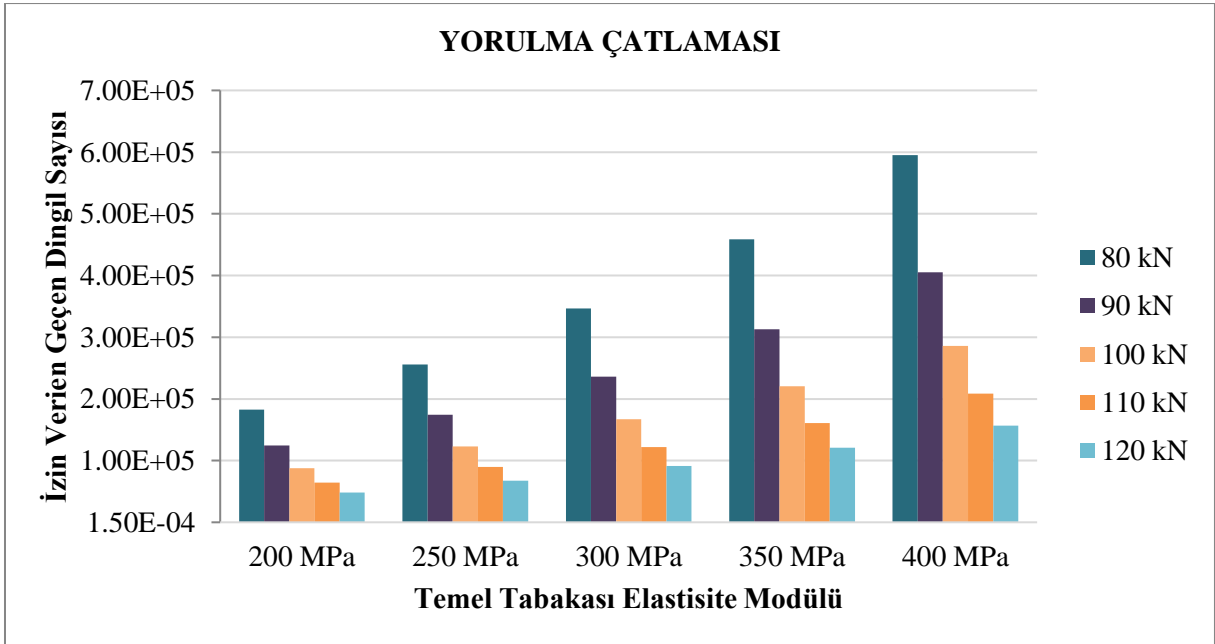
Şekil 4.10. Kaplama tabakasının elastisite modülü değişimine göre 80 kN dingil yükü altında izin verilen yük tekrar sayısının farklı kuruluşlara göre değişimi (%) (1. Model).

Şekil 4.10'da görüldüğü üzere yorulma çatlamaına göre yapılan hesaplarda ise 2500 MPa elastisite modülüne göre yapılan hesapta yol ömrü artışı %19.7 iken ortalama değer %32.38, 3000 MPa elastisite modülüne göre yapılan hesapta %41.18 iken ortalama değer %76.82, 3500 MPa elastisite modülüne göre yapılan hesapta %64.57 iken ortalama değer %135.55, 4000 MPa elastisite modülüne göre yapılan hesapta yol ömrü artışı %89.39 iken ortalama değer %209.99'dür.



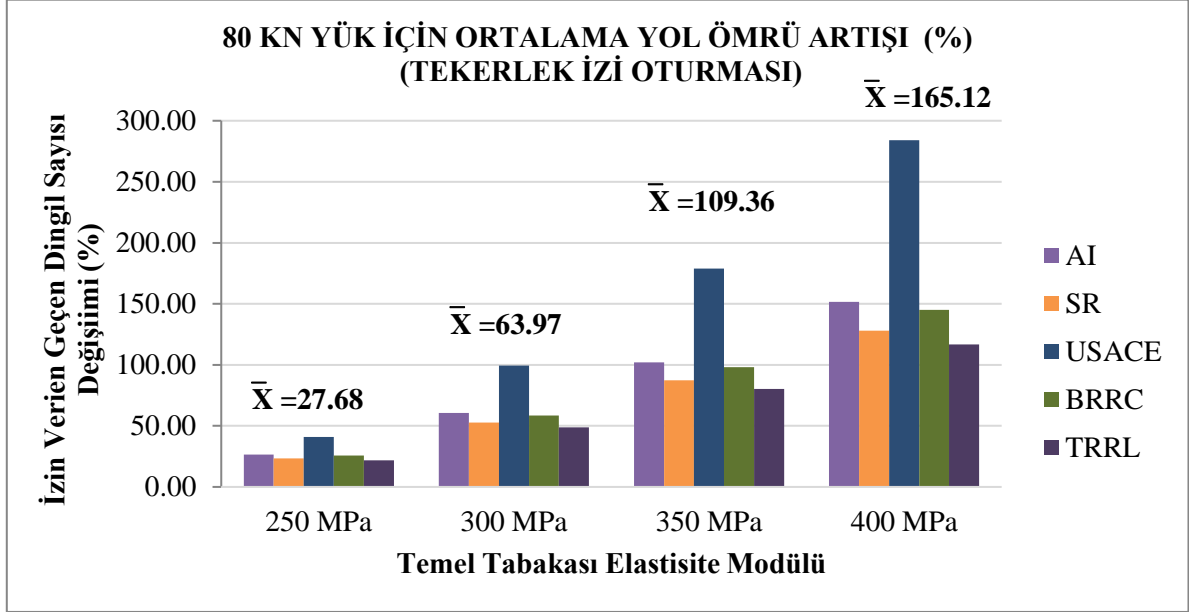
Şekil 4.11. Temel tabakasının elastisite modülü değişimine göre tekerlek izi oturması için izin verilen yük tekrar sayısı (1. Model).

Şekil 4.11’de görüldüğü üzere birinci modelin temel tabakasının elastisite modülü arttıkça her bir dingil yükü değeri için yoldan geçmesine izin verilen dingil sayısı artmıştır. Bu artış oranı %26-152 aralığındadır. Her bir farklı elastisite modülü değeri için dingil yükü değerinin artışı yoldan geçmesine izin verilen dingil sayısının azalmasına neden olmuştur. Bu azalma oranı %40-84 aralığındadır.

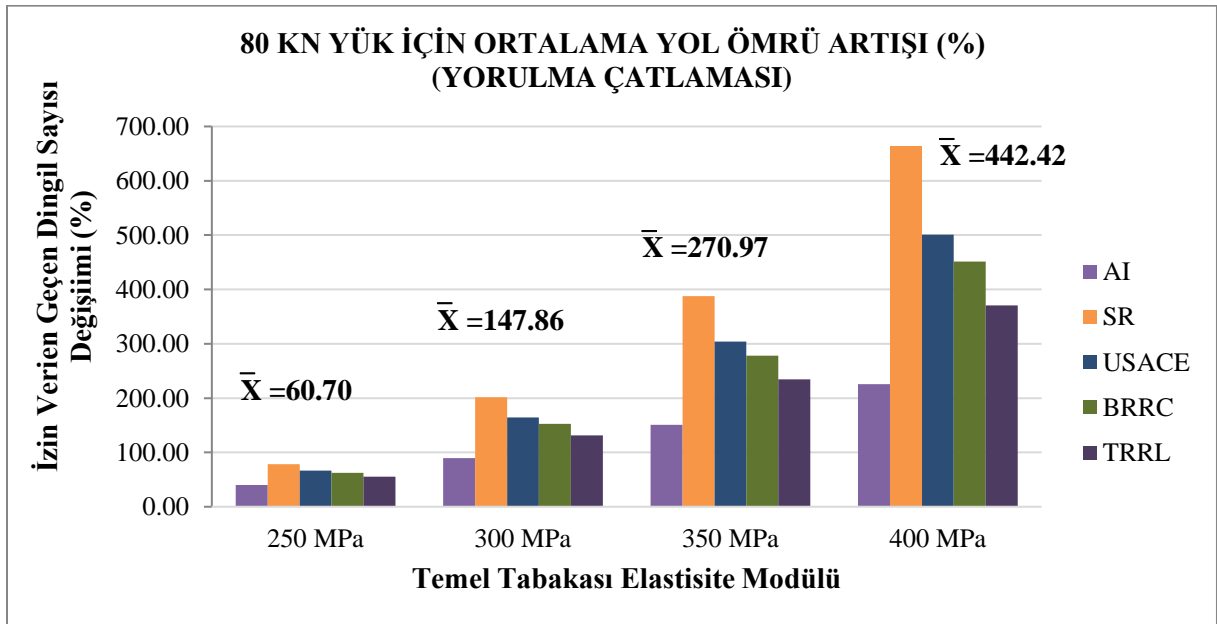


Şekil 4.12. Temel tabakasının elastisite modülü değişimine göre yorulma çatlama oluşumu için izin verilen yük tekrar sayısı (1. Model).

Şekil 4.12’de görüldüğü üzere birinci modelin temel tabakasının elastisite modülü arttıkça her bir dingil yükü değeri için yoldan geçmesine izin verilen dingil sayısı artmıştır. Bu artış oranı %40-225 aralığındadır. Her bir farklı elastisite modülü değeri için dingil yükü değerinin artışı yoldan geçmesine izin verilen dingil sayısının azalmasına neden olmuştur. Bu azalma oranı %32-74 aralığındadır.

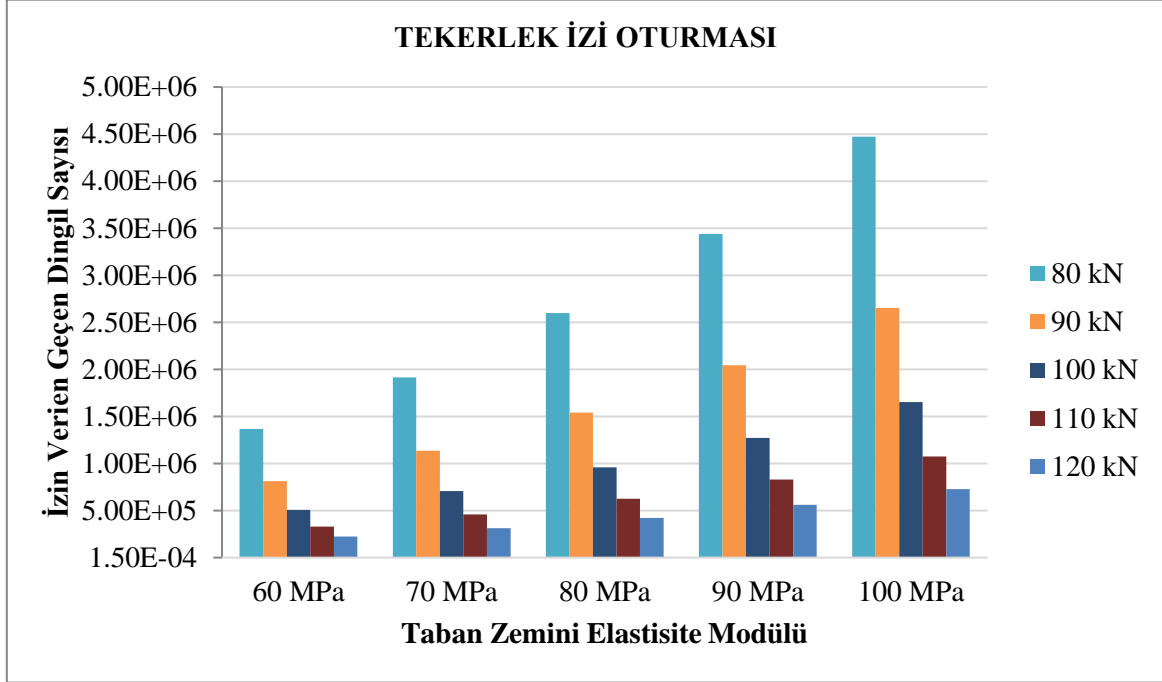


Şekil 4.13. Temel tabakasının elastisite modülü değişimine göre 80 kN dingil yükü altında izin verilen yük tekrar sayısının farklı kuruluşlara göre değişimi (%) (1. Model).



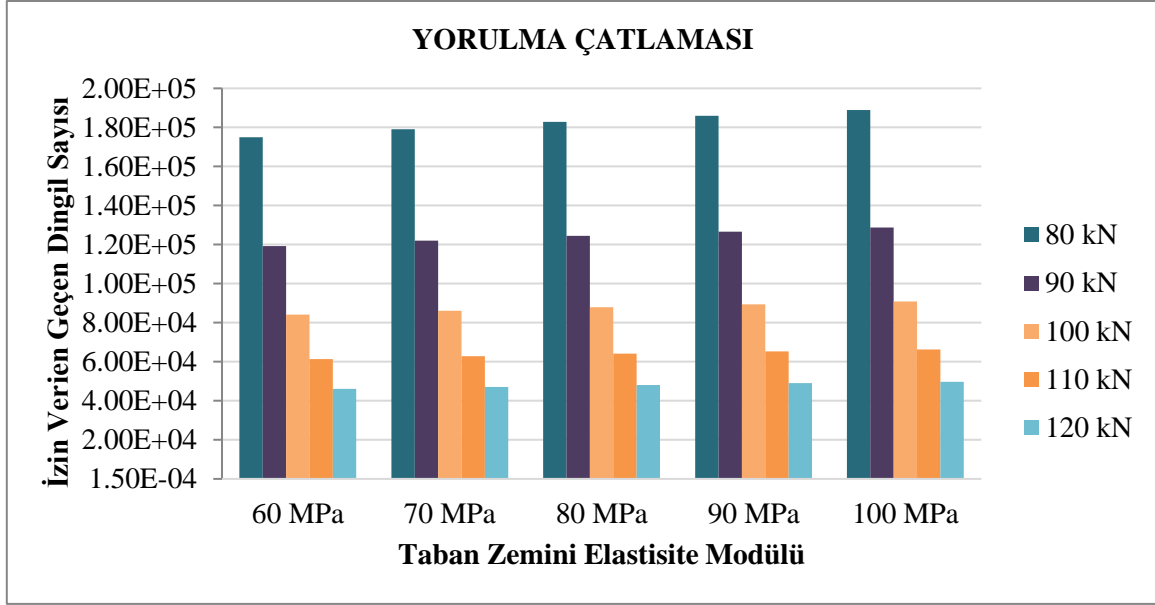
Şekil 4.14. Temel tabakasının elastisite modülü değişimine göre 80 kN dingil yükü altında izin verilen yük tekrar sayısının farklı kuruluşlara göre değişimi (%) (1. Model).

Şekil 4.13 ve 4.14'te temel tabakasının elastisite modülü arttıkça tekerlek izi oturması ve yorulma çatlama oluşumuna bağlı olarak yoldan geçmesine izin verilen dingil yükü sayılarındaki ortalama artış yüzdeleri görülmektedir. Bu grafiklere göre her bir bozulma türü için temel tabakası elastisite modülü artışının yoldan geçmesine izin verilen dingil sayılarının artmasına olumlu katkıları olmuştur.



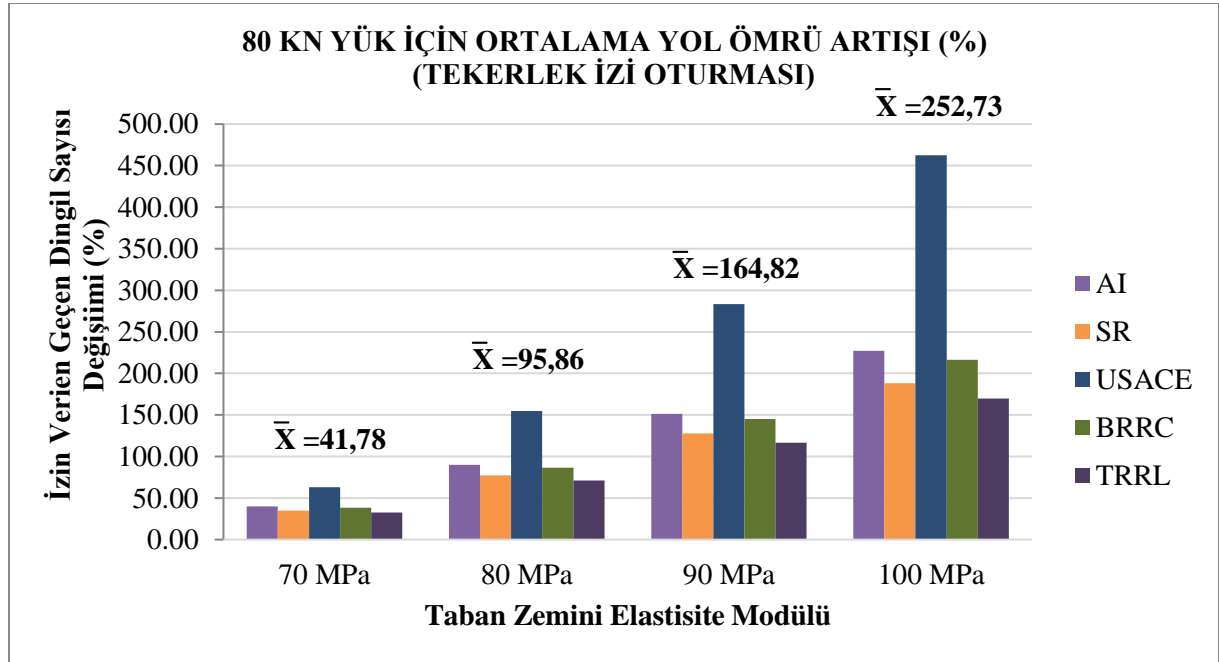
Şekil 4.15. Taban zemininin elastisite modülü değişimine göre tekerlek izi oturması için izin verilen yük tekrar sayısı (1. Model).

Şekil 4.15'de görüldüğü üzere birinci modelin taban zemininin elastisite modülü arttıkça her bir dingil yükü değeri için yoldan geçmesine izin verilen dingil sayısı artmıştır. Bu artış oranı %40-227 aralığındadır. Her bir farklı elastisite modülü değeri için dingil yükü değerinin artışı yoldan geçmesine izin verilen dingil sayısının azalmasına neden olmuştur. Bu azalma oranı %40-84 aralığındadır.

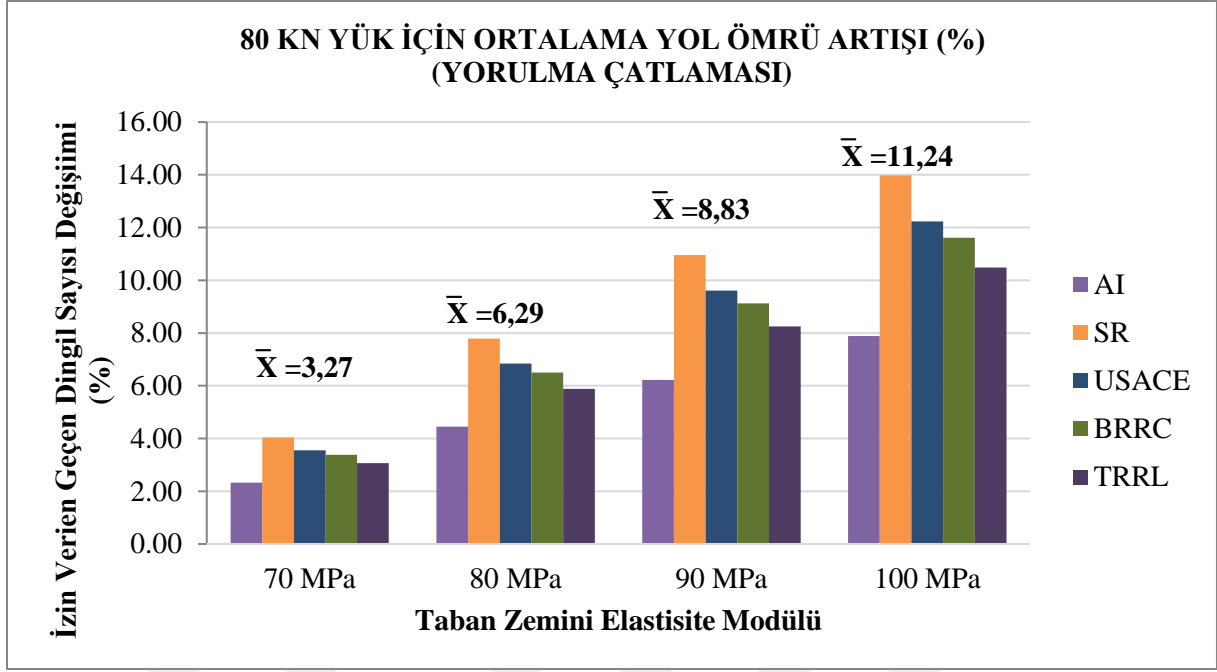


Şekil 4.16. Taban zemininin elastisite modülü değişimine göre yorulma çatlama oluşumu için izin verilen yük tekrar sayısı (1. Model).

Şekil 4.16’da görüldüğü üzere birinci modelin taban zemininin elastisite modülü arttıkça her bir dingil yükü değeri için yoldan geçmesine izin verilen dingil sayısı artmıştır. Bu artış oranı %2-8 aralığındadır. Her bir farklı elastisite modülü değeri için dingil yükü değerinin artışı yoldan geçmesine izin verilen dingil sayısının azalmasına neden olmuştur. Bu azalma oranı %32-74 aralığındadır.



Şekil 4.17. Taban zemininin elastisite modülü değişimine göre 80 kN dingil yükü altında izin verilen yük tekrar sayısının farklı kuruluşlara göre değişimi (%) (1. Model).



Şekil 4.18. Taban zemininin elastisite modülü değişimine göre 80 kN dingil yükü altında izin verilen yük tekrar sayısının farklı kuruluşlara göre değişimi (%) (1. Model).

Şekil 4.17 ve 4.18’de taban zemininin elastisite modülü arttıkça tekerlek izi oturması ve yorulma çatlama oluşumuna bağlı olarak yoldan geçmesine izin verilen dingil yükü sayılarındaki ortalama artış yüzdeleri görülmektedir. Bu grafiklere göre her bir bozulma türü için taban zemin elastisite modülü değerinin artışı yoldan geçmesine izin verilen dingil yükü sayısını arttırmıştır.

4.1.3. Yol Ömrü Hesabı

4.1.3.1. Yükleme ve Elastisite Modülü Değerlerinin Değiştirilmesi ile Hesap Yapılması

```
TITLE -1.Analiz(550)

MATL = 1 FOR LINEAR ELASTIC LAYERED SYSTEM
NDAMA=1, SO DAMAGE ANALYSIS WITH SUMMARY PRINTOUT WILL BE PERFORMED
NUMBER OF PERIODS PER YEAR (NPY) = 1
NUMBER OF LOAD GROUPS (NLG) = 1
TOLERANCE FOR INTEGRATION (DEL) -- = 0.001
NUMBER OF LAYERS (NL)----- = 3
NUMBER OF Z COORDINATES (NZ)----- = 0
LIMIT OF INTEGRATION CYCLES (ICL)- = 80
COMPUTING CODE (NSTD)----- = 9
SYSTEM OF UNITS (NUNIT)----- = 1

Length and displacement in cm, stress and modulus in kPa
unit weight in kN/m^3, and temperature in C

THICKNESSES OF LAYERS (TH) ARE : 10 25
POISSON'S RATIOS OF LAYERS (PR) ARE : 0.35 0.4 0.45
ALL INTERFACES ARE FULLY BONDED

FOR PERIOD NO. 1 LAYER NO. AND MODULUS ARE :    1  2.000E+06    2  2.000E+05
          3  8.000E+04

LOAD GROUP NO. 1 HAS 1 CONTACT AREA
CONTACT RADIUS (CR)----- = 10.74
CONTACT PRESSURE (CP)----- = 550
RADIAL COORDINATES OF 1 POINT(S) (RC) ARE : 0

NUMBER OF LAYERS FOR BOTTOM TENSION (NLBT)---- = 1
NUMBER OF LAYERS FOR TOP COMPRESSION (NLTC)--- = 1
LAYER NO. FOR BOTTOM TENSION (LNBT) ARE: 1
LAYER NO. FOR TOP COMPRESSION (LNTC) ARE: 3

LOAD REPETITIONS (TNLR) IN PERIOD 1 FOR EACH LOAD GROUP ARE : 1000000

DAMAGE COEF.'S (FT) FOR BOTTOM TENSION OF LAYER 1 ARE: 0.0796 3.291 0.854
DAMAGE COEFICIENTS (FT) FOR TOP COMPRESSION OF LAYER 3 ARE: 1.365E-09 4.477

DAMAGE ANALYSIS OF PERIOD NO. 1 LOAD GROUP NO. 1

AT BOTTOM OF LAYER 1 TENSILE STRAIN = -2.856E-04
ALLOWABLE LOAD REPETITIONS = 1.527E+05 DAMAGE RATIO = 6.549E+00

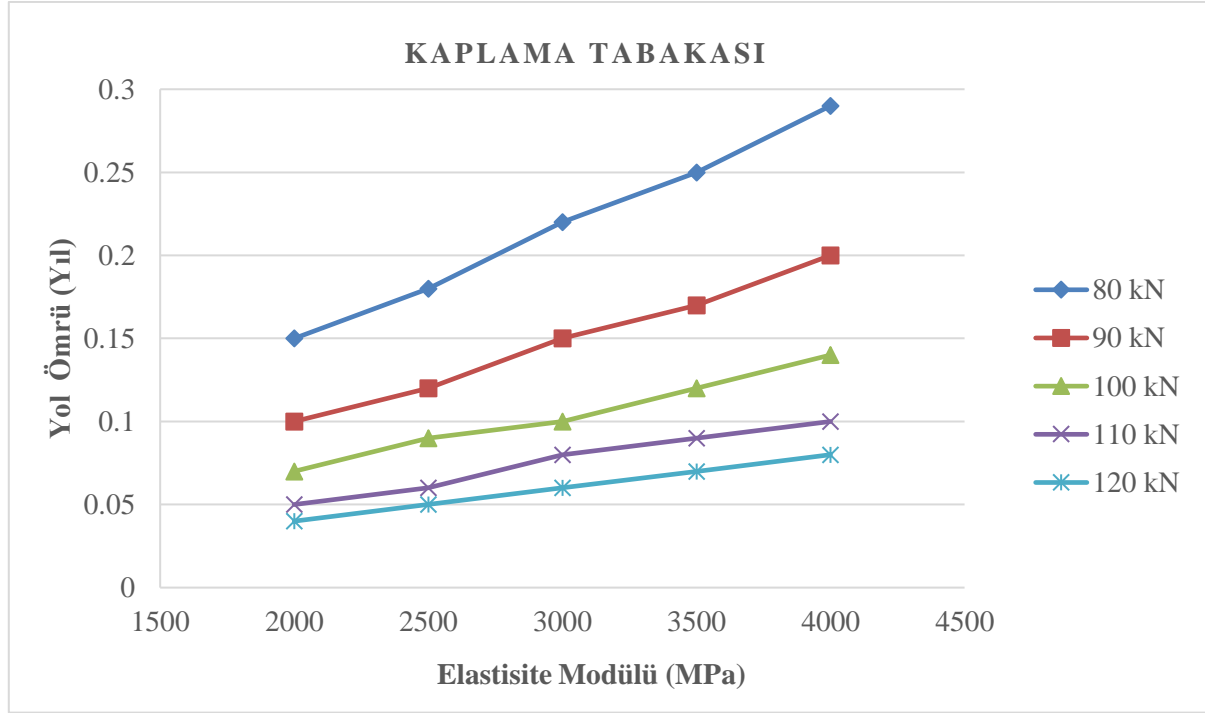
AT TOP OF LAYER 3 COMPRESSIVE STRAIN = 4.097E-04
ALLOWABLE LOAD REPETITIONS = 2.000E+06 DAMAGE RATIO = 5.001E-01

*****
* SUMMARY OF DAMAGE ANALYSIS *
*****
AT BOTTOM OF LAYER 1 SUM OF DAMAGE RATIO = 6.549E+00
AT TOP OF LAYER 3 SUM OF DAMAGE RATIO = 5.001E-01

MAXIMUM DAMAGE RATIO = 6.549E+00 DESIGN LIFE IN YEARS = .15
```

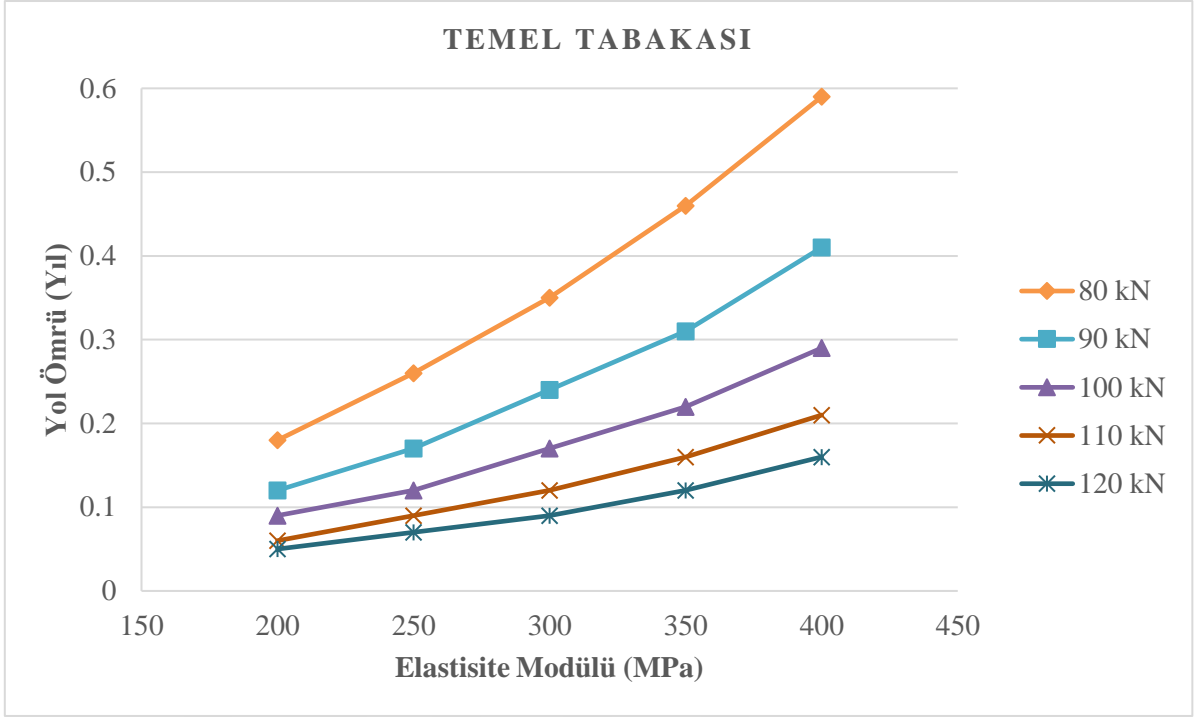
Şekil 4.19. KENPAVE programı analiz çıktısı.

Şekil 4.19'da örnek bir analiz sonucunu görülmektedir. Program, yol ömrünü yıl cinsinden hesaplarken basınç ve çekme şekil değiştirme değerlerine bağlı olarak izin verilen yük tekrar sayısını hesaplar. Bu hesaplardan da izin verilen yük tekrar sayısı değerleri içinde küçük olan değer yoldan bir yılda geçmesi beklenen taşıt sayısı değerine bölünmesi ile yol ömrü yıl cinsinden elde edilmiş olur. Elde edilen değerlerden yararlanılarak elastisite modülü ve dingil yükü değişimlerine bağlı grafikler oluşturulmuştur.



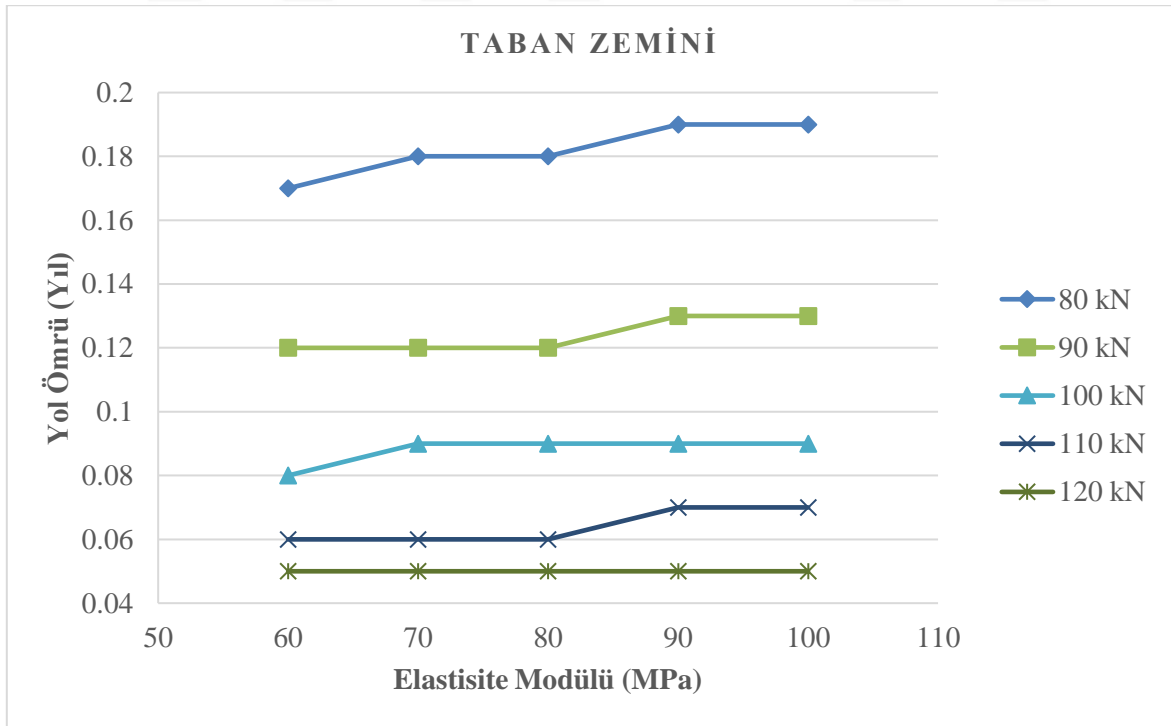
Şekil 4.20. Kaplama tabakasının elastisite modülü değişimine göre yol ömrünün değişimi (1. Model).

Birinci modelimizin kaplama tabakası, temel tabakası ve taban zemini elastisite modülü ve dingil yükü değerlerinin değiştirilmesiyle yapılan analizler sonucu düzenlenen grafiklere göre, kaplama tabakasının elastisite modülünün artmasıyla yol ömrü ortalama %20-100 aralığında artış göstermiştir.



Şekil 4.21. Temel tabakasının elastisite modülü değişimine göre yol ömrünün değişimi (1. Model).

Temel tabakası elastisite modülünün değiştirilmesiyle yol ömrü ortalama %33-250 aralığında artış göstermiştir.



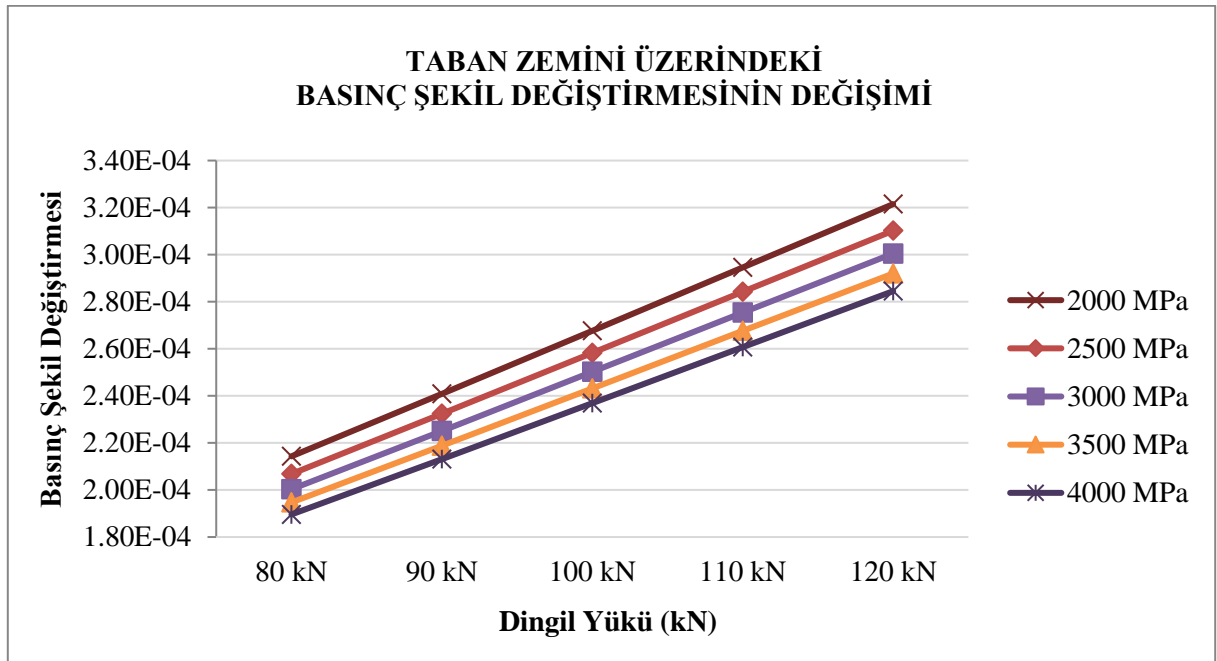
Şekil 4.22. Taban zeminin elastisite modülü değişimine göre yol ömrünün değişimi (1. Model).

Taban zemininin elastisite modülünün artırılmasıyla yol ömründe %5-17 aralığında artışlar görülmüştür. Bazı değişimlerde hiç artış görülmezken, en yüksek artış 110 kN dingil yükü altında görülmüştür.

Tabakalar ve taban zemininin analiz sonuçlarını genel olarak değerlendirildiğinde elastisite modülü artışının en çok etkisi temel tabakasında görülmektedir. Dingil yükünün artmasıyla ise her iki tabaka ve taban zemini için yol ömründe %30-70 aralığında azalmalar görülmektedir.

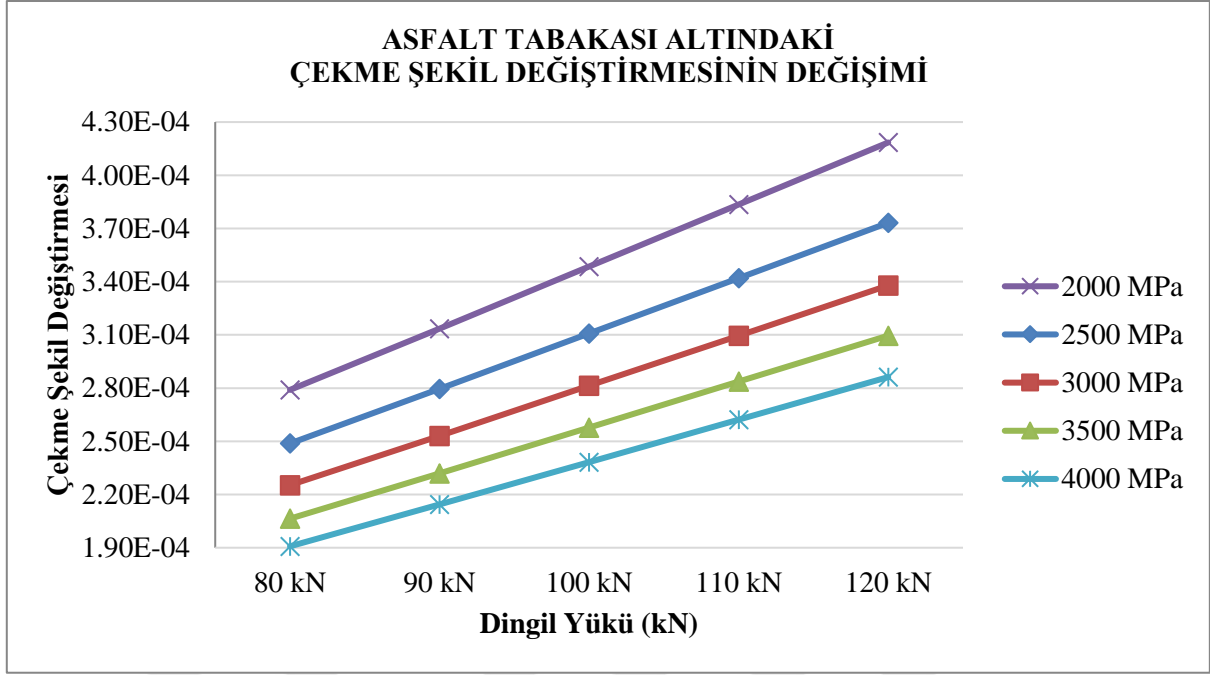
4.2. İkinci Model İçin Analiz Sonuçları

4.2.1. Basınç ve Çekme Şekil Değiştirmesi Hesabı



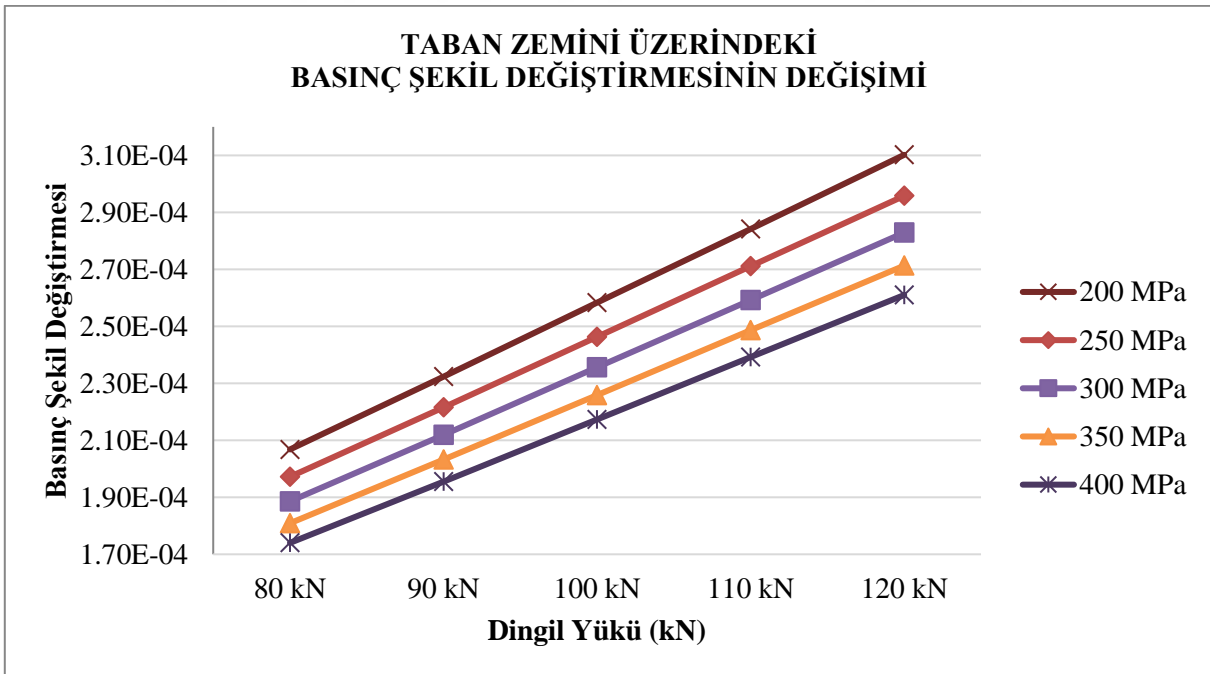
Şekil 4.23. Kaplama tabakasının elastisite modülü değişimine göre basınç şekil değiştirmesi (2. Model).

Şekil 4.23'de görüldüğü üzere kaplama tabakasının elastisite modülünün artırılmasıyla basınç ve çekme şekil değiştirmelerinin %3.5-11 aralığında azaldığı görülmektedir.



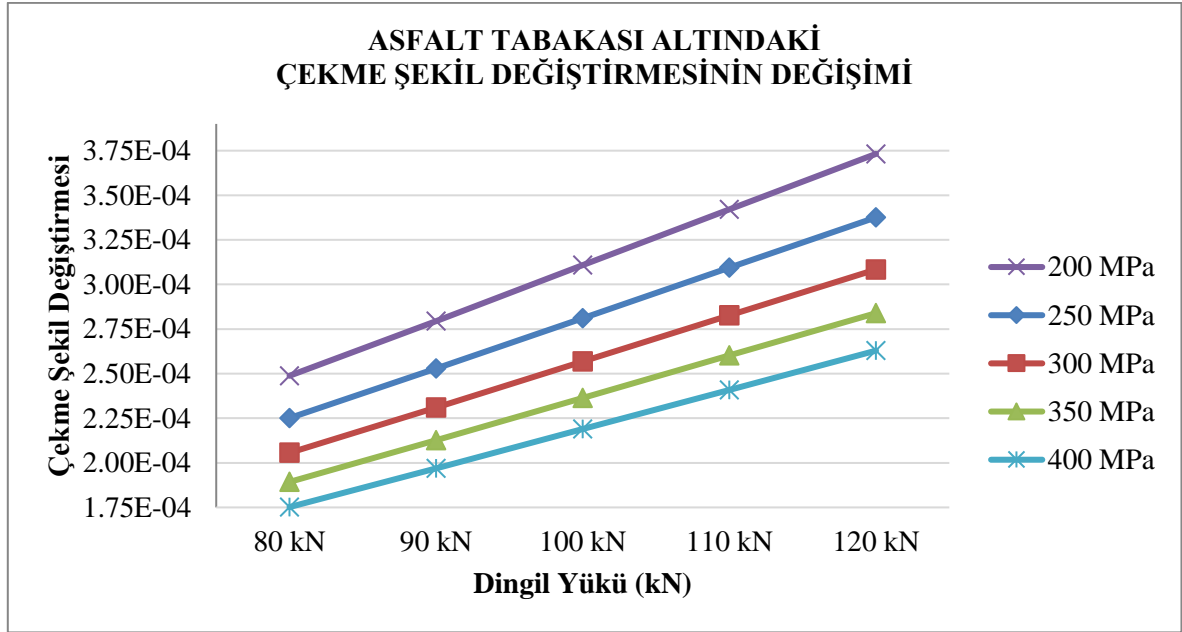
Şekil 4.24. Kaplama tabakasının elastisite modülü değişimine göre çekme şekil değişirmesi (2. Model).

Şekil 4.24’de görüldüğü üzere kaplama tabakasının elastisite modülünün artırılmasıyla çekme şekil değişirmesindeki azalma oranı %10-31 aralığındadır.



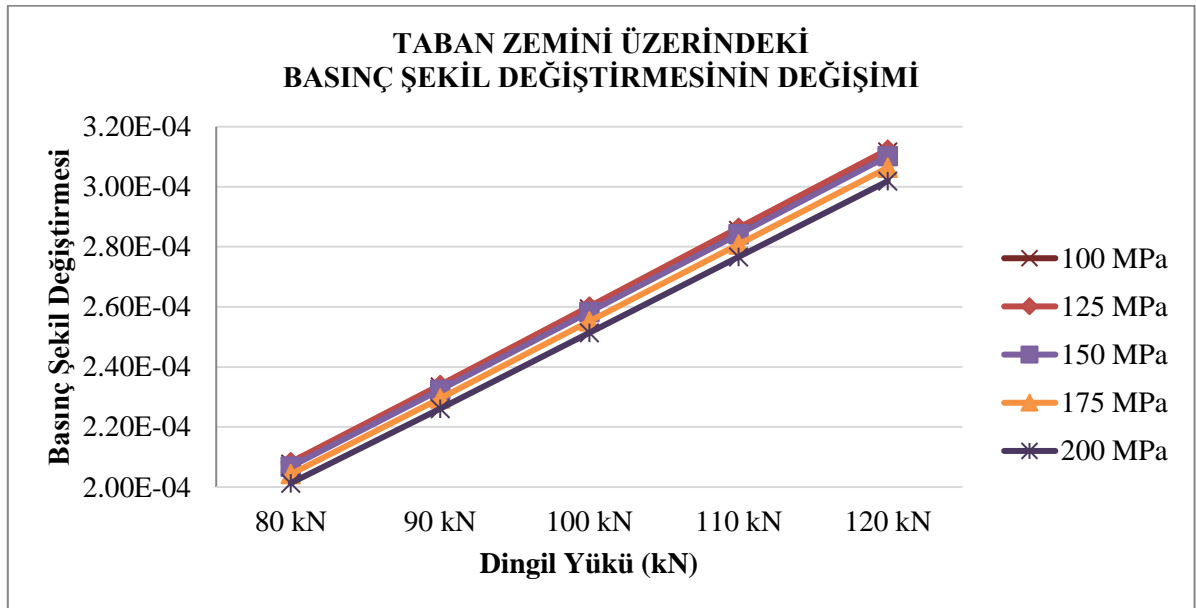
Şekil 4.25. Temel tabakasının elastisite modülü değişimine göre basınç şekil değişirmesi (2. Model).

Şekil 4.25’de görüldüğü üzere temel tabakasının elastisite modülünün artırılmasıyla basınç şekil değiştirmesindeki azalma %4.5-16 aralığındadır.



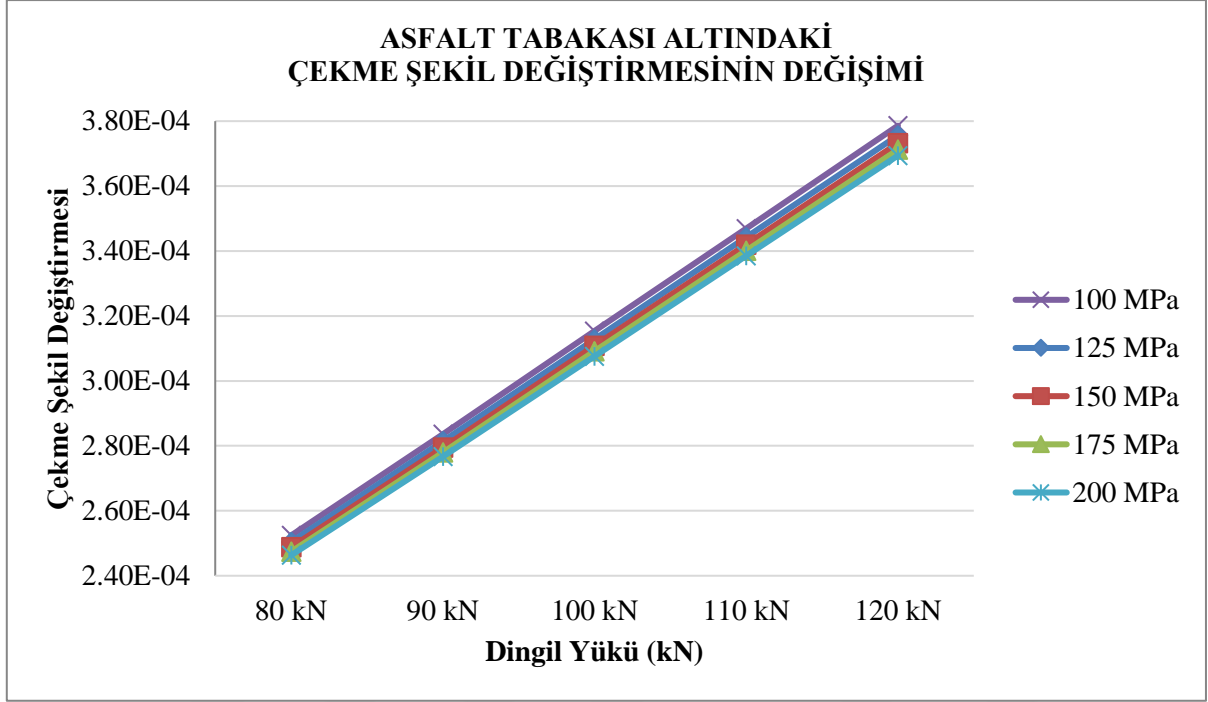
Şekil 4.26. Temel tabakasının elastisite modülü değişimine göre basınç çekme değişirmesi (2. Model).

Şekil 4.26’da görüldüğü üzere temel tabakasının elastisite modülünün artırılmasıyla çekme şekil değiştirmesindeki azalma % 10-30 aralığındadır.



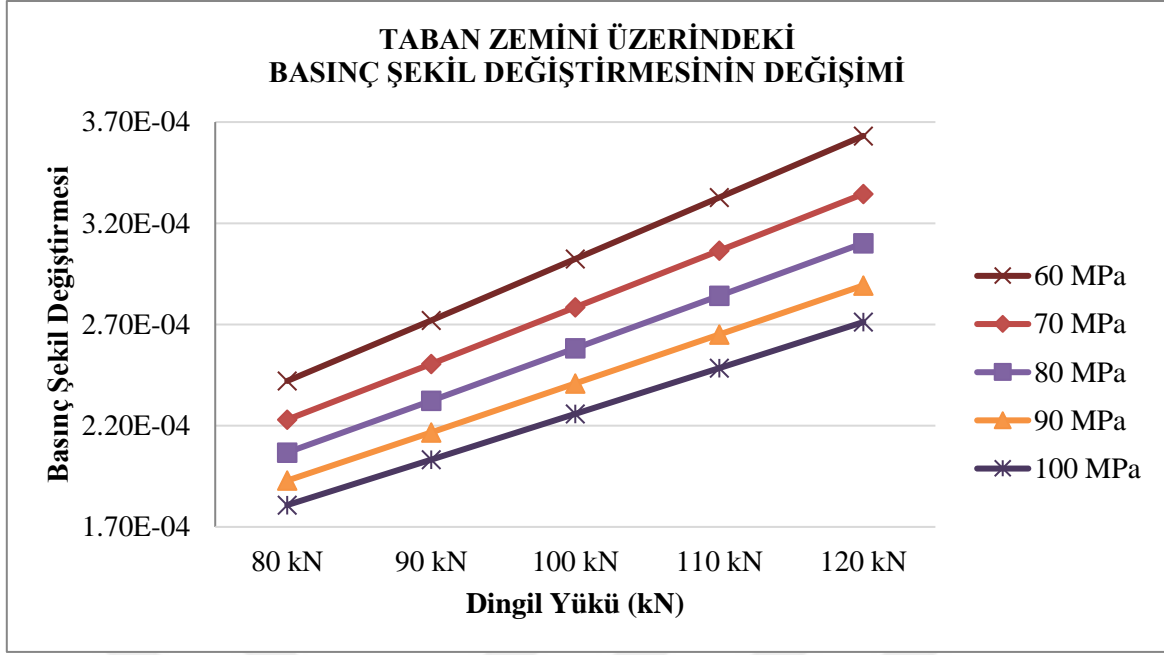
Şekil 4.27. Alt temel tabakasının elastisite modülü değişimine göre basınç şekil değiştirmesi (2. Model).

Şekil 4.28'e göre alt temel tabakasının elastisite modülünün artırılmasıyla basınç őkil değiştirme değerleri %0.4-3 aralığında azalmaktadır. Elastisite modülünün 100 MPa'dan 125 MPa'a çıkarılmasıyla basınç őkil değiştirmesi %2.5 oranında artmıştır. Bu durumla yalnızca alt temel tabakasında yapılan analizlerle karŐılaŐılmıŐtır.

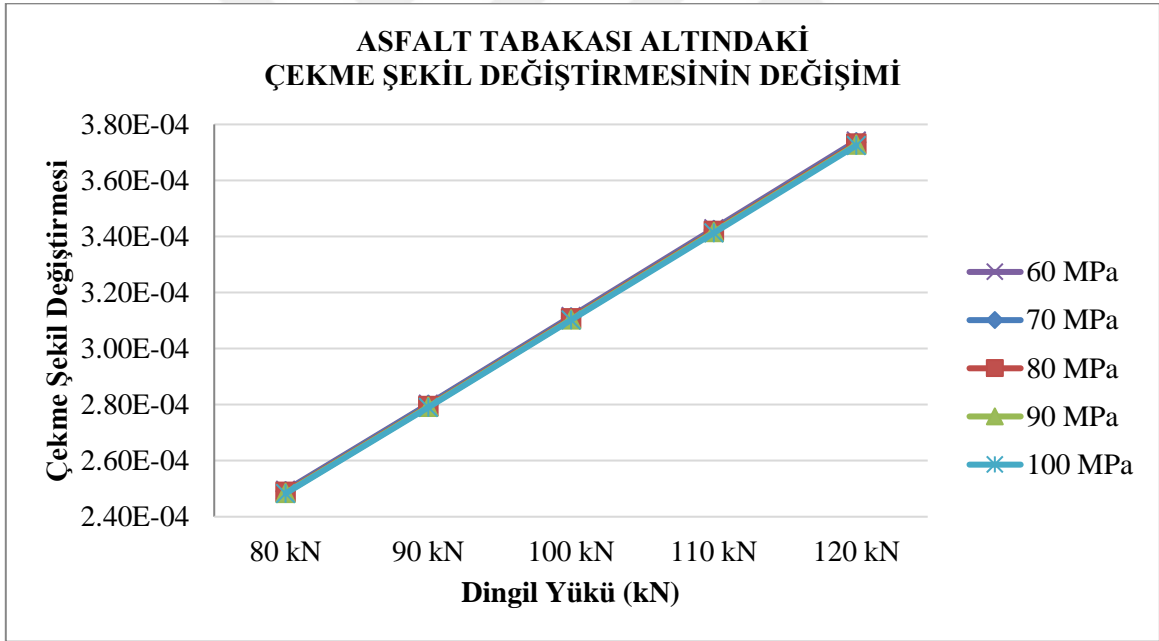


Şekil 4.28. Alt temel tabakasının elastisite modülü değişimine göre çekme őkil değiştirmesi (2. Model).

Şekil 4.28'de görüldüğü üzere alt temel tabakasının elastisite modülünün artırılmasıyla çekme őkil değiştirmesindeki azalma %0.7-2.5 aralığındadır.



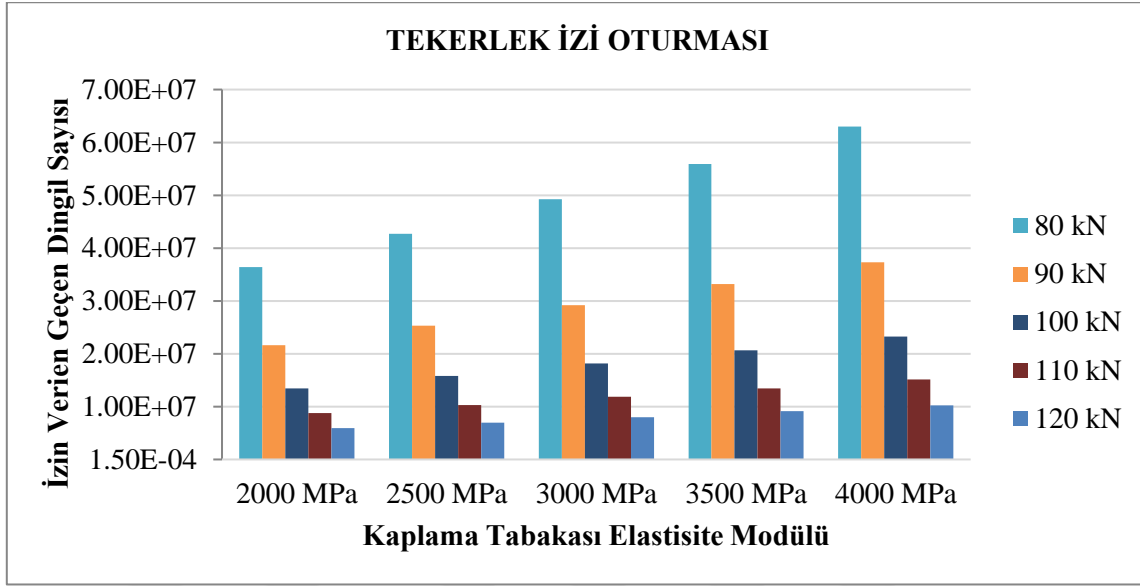
Şekil 4.29. Taban zemini elastisite modülü değişimine göre basınç şekil değişirmesi (2. Model).



Şekil 4.30. Taban zemininin elastisite modülü değişimine göre çekme şekil değişirmesi (2. Model).

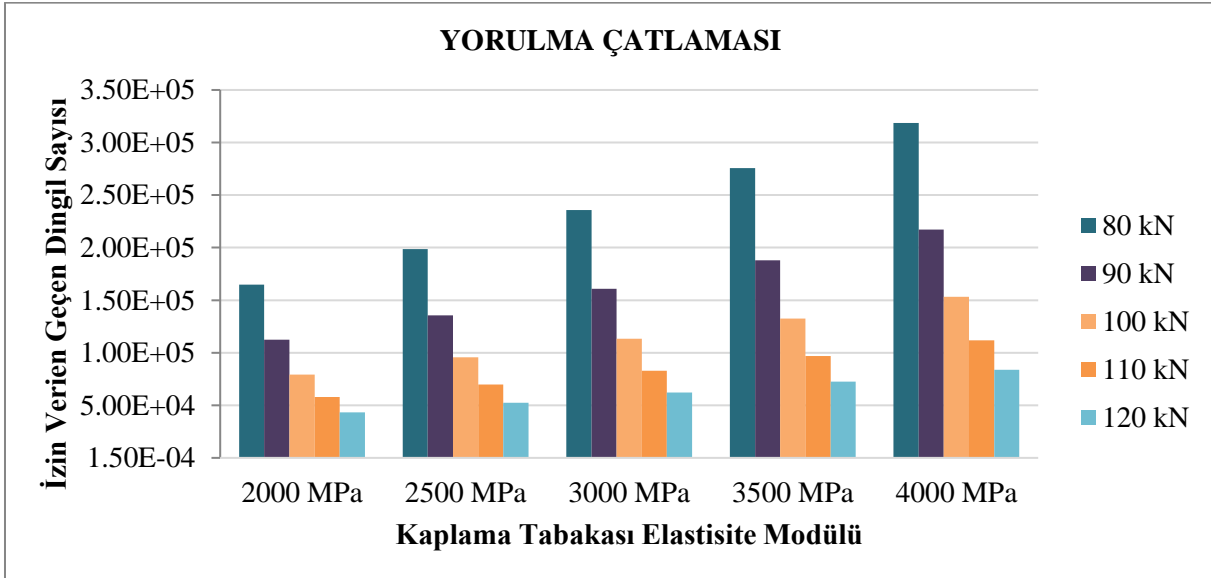
Şekil 4.29 ve 4.30'da görüldüğü üzere taban zemininin elastisite modülünün artırılmasıyla basınç şekil değişirmesindeki azalma %8-25 aralığındayken, çekme şekil değişirmesindeki azalma %10-44 aralığındadır. Dingil yükünün artırılmasıyla basınç ve çekme şekil değişirmesi değerleri ise artmıştır. Bu artış taban zemininde yapılan hesaplarda yok sayılacak kadar azdır. Kaplama tabakası, temel tabakası ve taban zemininin dingil yükünün artmasıyla basınç ve çekme şekil değişirmesindeki artış oranı %25-50 aralığındadır.

4.2.2. İzin Verilen Yük Tekrar Sayısı Hesabı



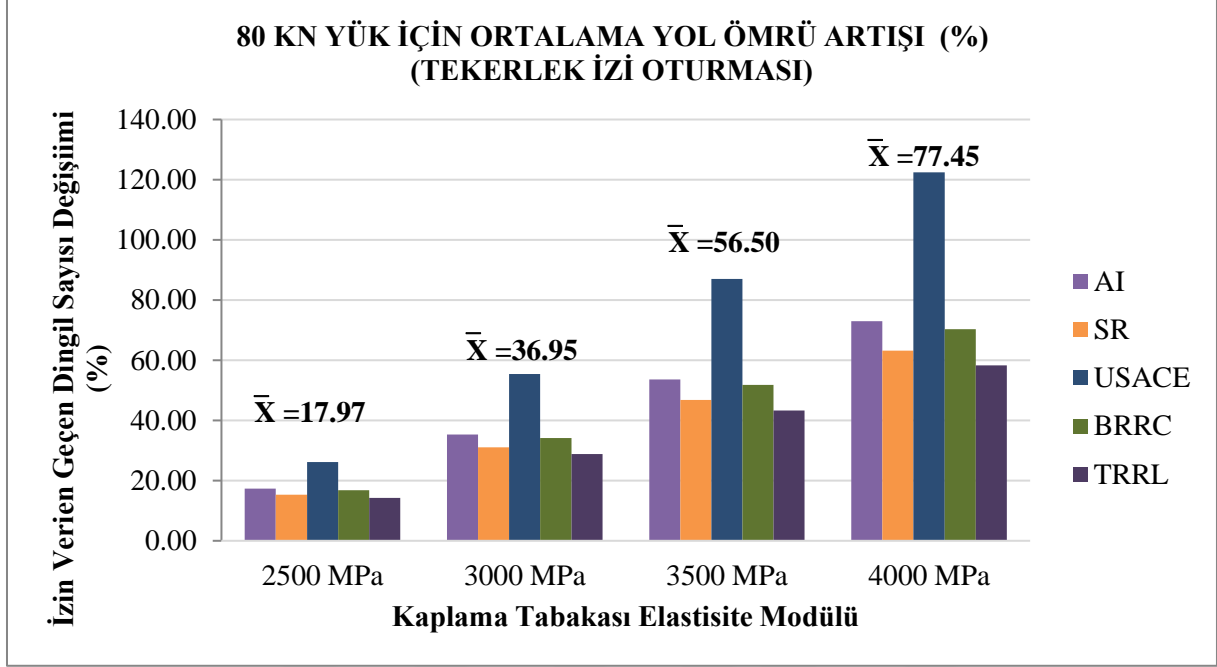
Şekil 4.31. Kaplama tabakasının elastisite modülü değişimine göre tekerlek izi oturması için izin verilen yük tekrar sayısı (2. Model).

Şekil 4.31’de görüldüğü üzere ikinci modelin kaplama tabakası üzerinde yapılan analiz sonuçlarına göre tekerlek izine bağlı yol ömrü değerleri kaplama tabakasının elastisite modülünün artmasıyla birlikte artış göstermiştir. %17-73 aralığında artışlar gözlenmiştir.

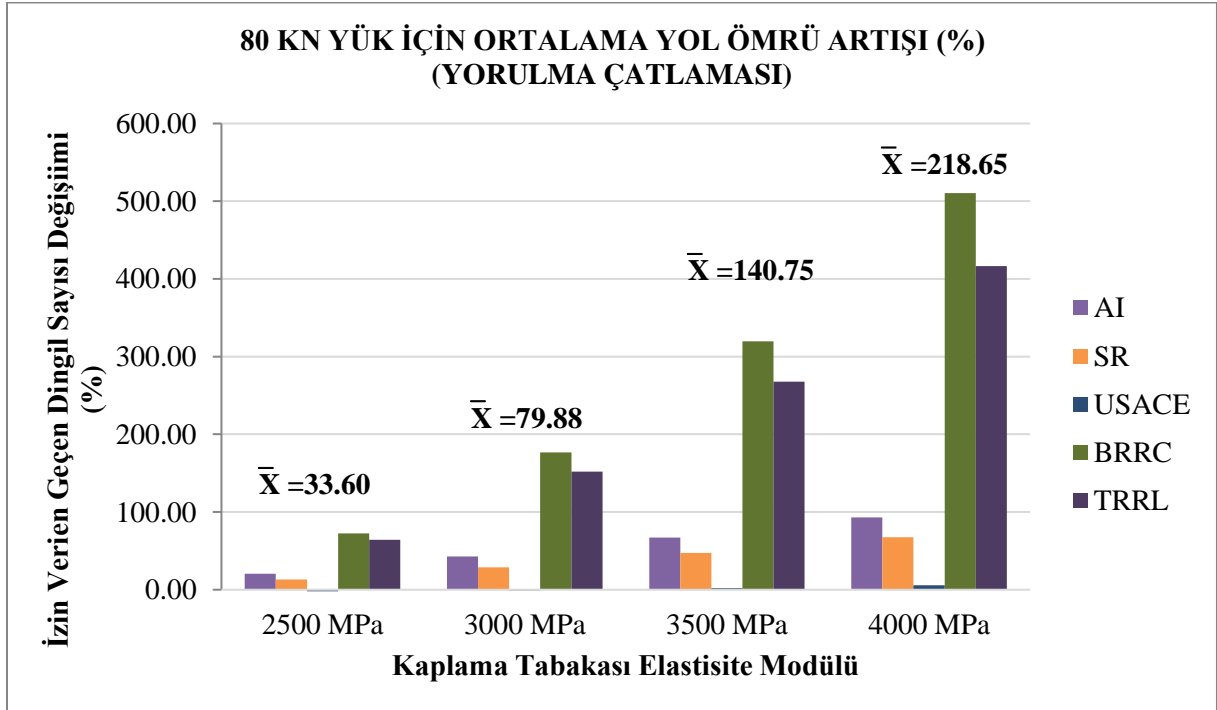


Şekil 4.32. Kaplama tabakasının elastisite modülü değişimine göre yorulma çatlama oluşumu için izin verilen yük tekrar sayısı (2. Model).

Şekil 4.32’de görüldüğü üzere yorulma çatlamasına bağlı yol ömrü değerleri de kaplama tabakasının elastisite modülünün artırılmasıyla birlikte artış göstermiştir. Bu artış %20-93 aralığında artışlar gözlenmiştir.

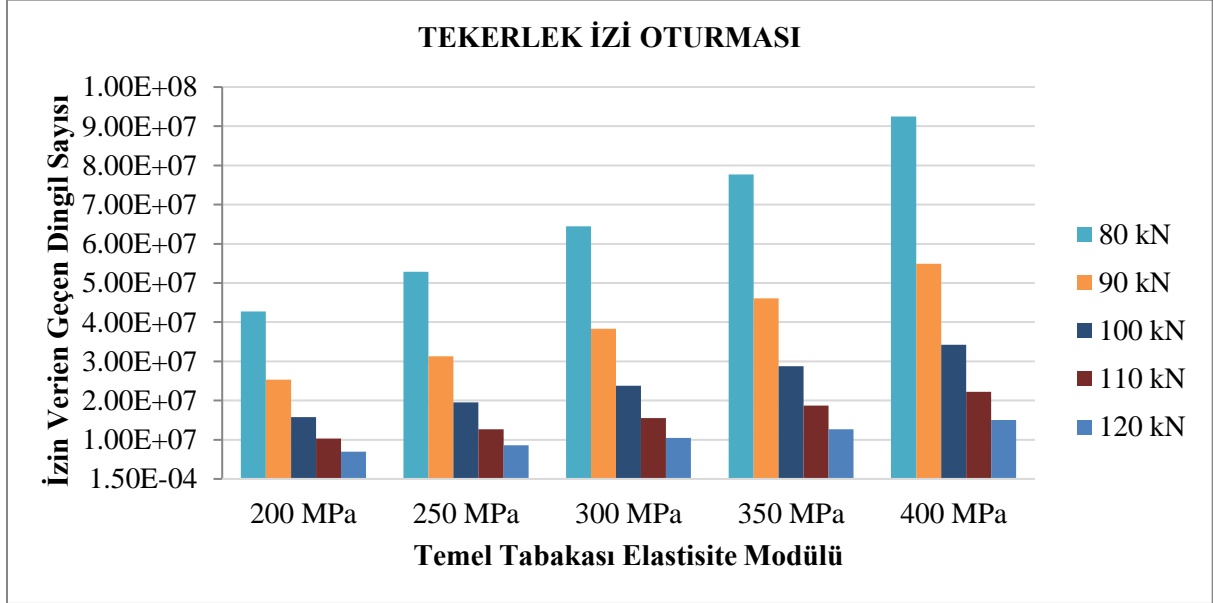


Şekil 4.33. Kaplama tabakasının elastisite modülü değişimine göre 80 kN dingil yükü altında izin verilen yük tekrar sayısının farklı kuruluşlara göre değişimi (%) (2. Model).



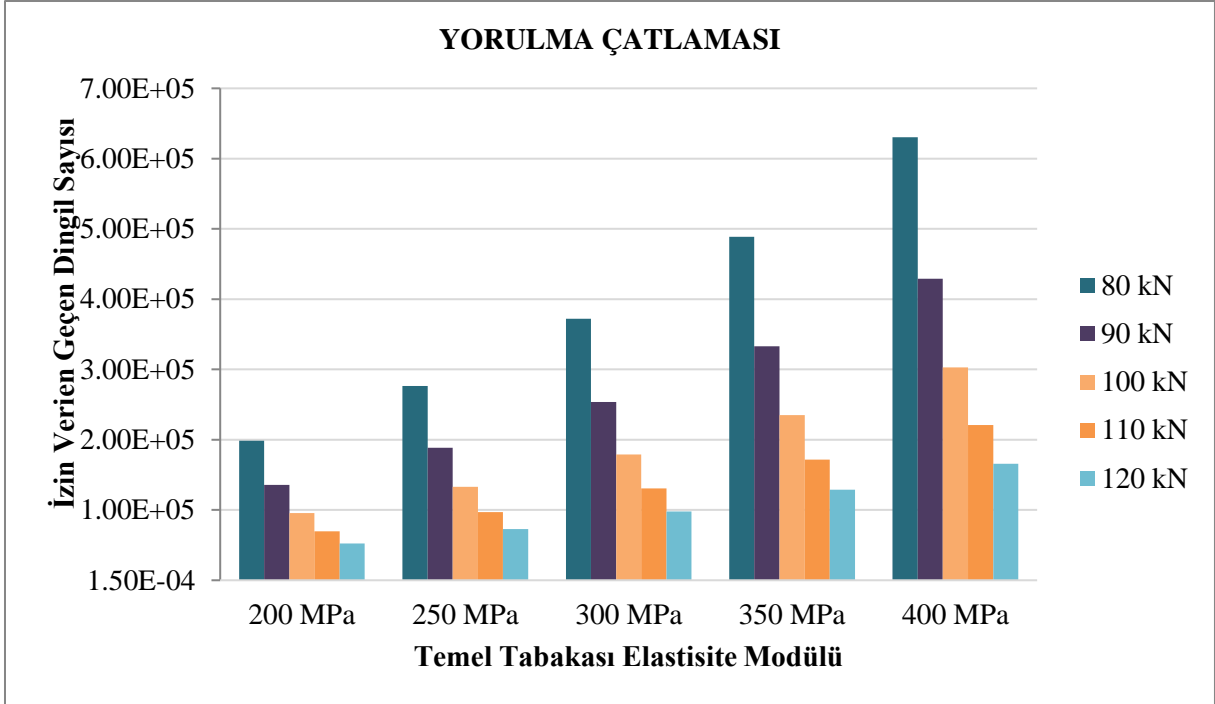
Şekil 4.34. Kaplama tabakasının elastisite modülü değişimine göre 80 kN dingil yükü altında izin verilen yük tekrar sayısının farklı kuruluşlara göre değişimi (%) (2. Model).

Şekil 4.33 ve 4.34'te kaplama tabakasının elastisite modülü arttıkça tekerlek izi oturması ve yorulma çatlama oluşumuna bağlı olarak yoldan geçmesine izin verilen dingil yükü sayılarındaki ortalama artış yüzdeleri görülmektedir. Bu grafiklere göre her bir bozulma türü için kaplama tabakası elastisite modülü değerinin artışı yoldan geçmesine izin verilen dingil yükü sayısını arttırmıştır.



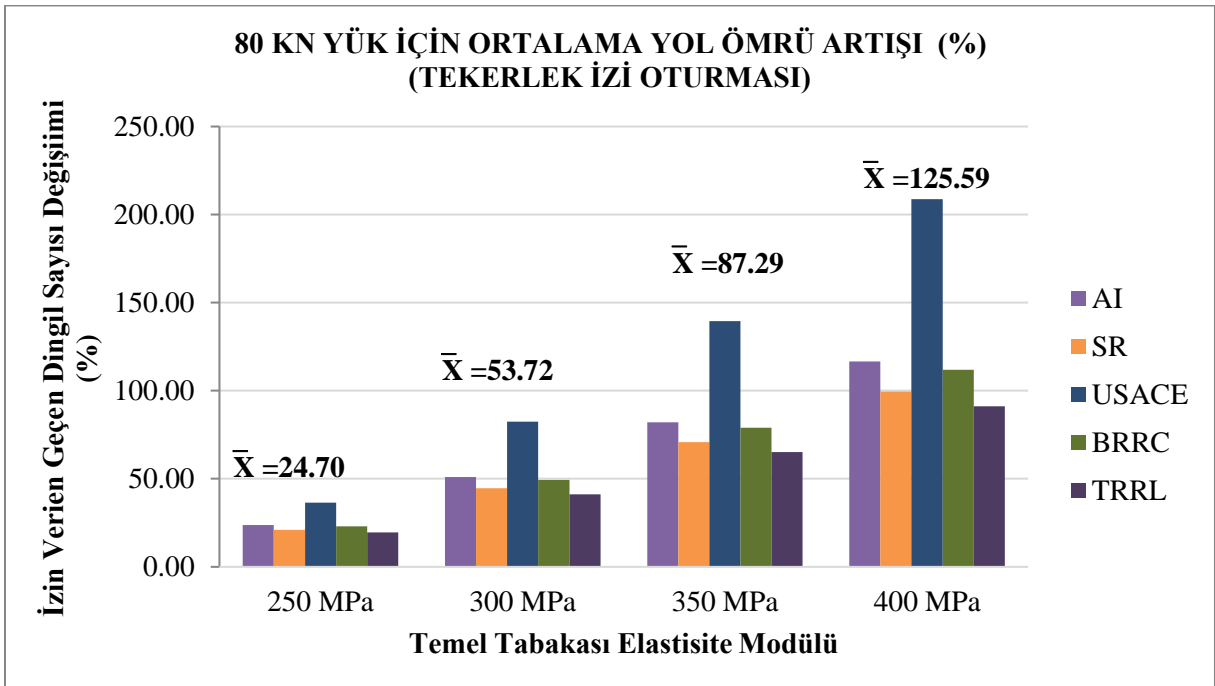
Şekil 4.35. Temel tabakasının elastisite modülü değişimine göre tekerlek izi oturması için izin verilen yük tekrar sayısı (2. Model).

Şekil 4.35'de görüldüğü üzere ikinci modelin temel tabakası üzerinde yapılan analiz sonuçlarına göre tekerlek izine bağlı yol ömrü değerleri kaplama tabakasının elastisite modülünün artırılmasıyla birlikte artış göstermiştir. Bu artış %24-117 aralığında gözlenmiştir.

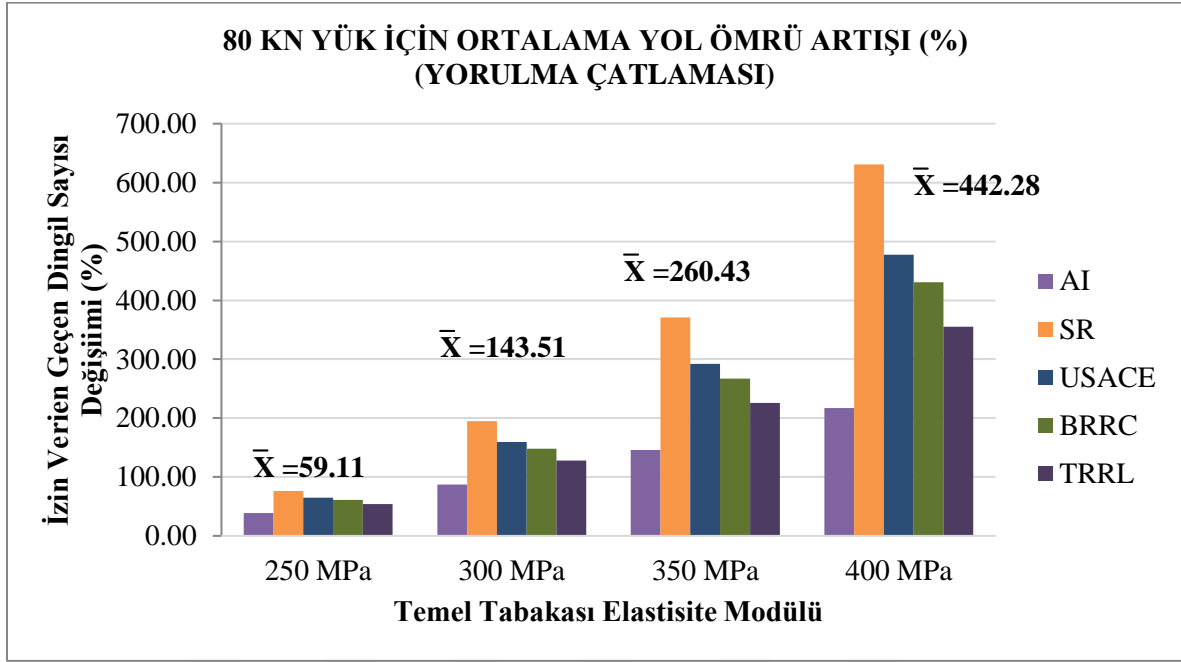


Şekil 4.36. Temel tabakasının elastisite modülü değişimine göre yorulma çatlama oluşumu için izin verilen yük tekrar sayısı (2. Model).

Şekil 4.36’da görüldüğü üzere yorulma çatlama başlangıcına bağlı yol ömrü değerleri de temel tabakasının elastisite modülünün artırılmasıyla birlikte artış göstermiştir. Bu artış %39-217 aralığında gözlenmiştir.

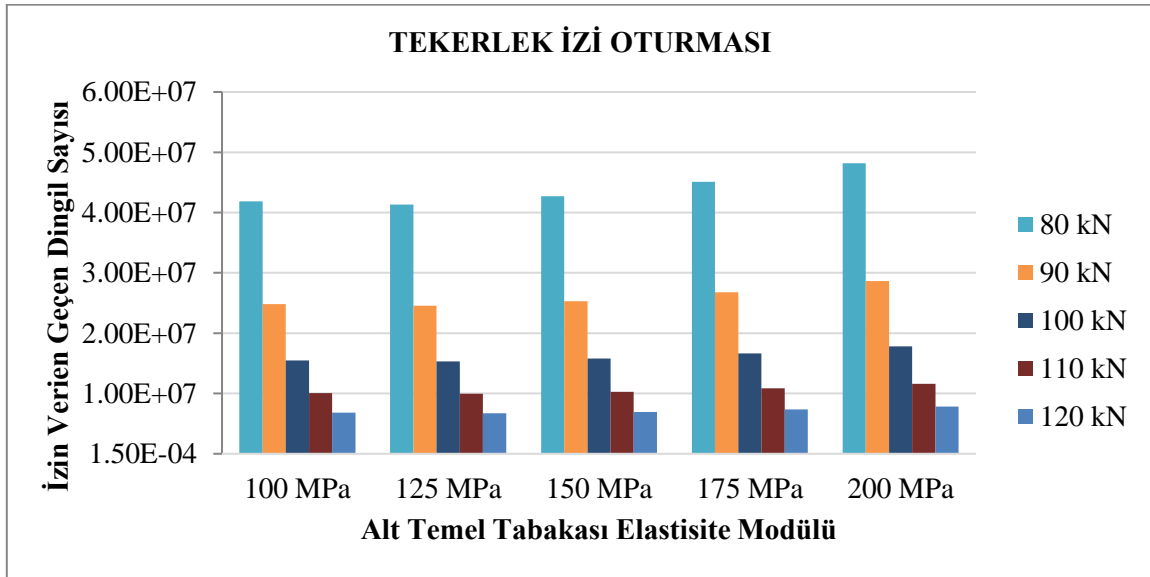


Şekil 4.37. Temel tabakasının elastisite modülü değişimine göre 80 kN dingil yükü altında izin verilen yük tekrar sayısının farklı kuruluşlara göre değişimi (%) (2. Model).



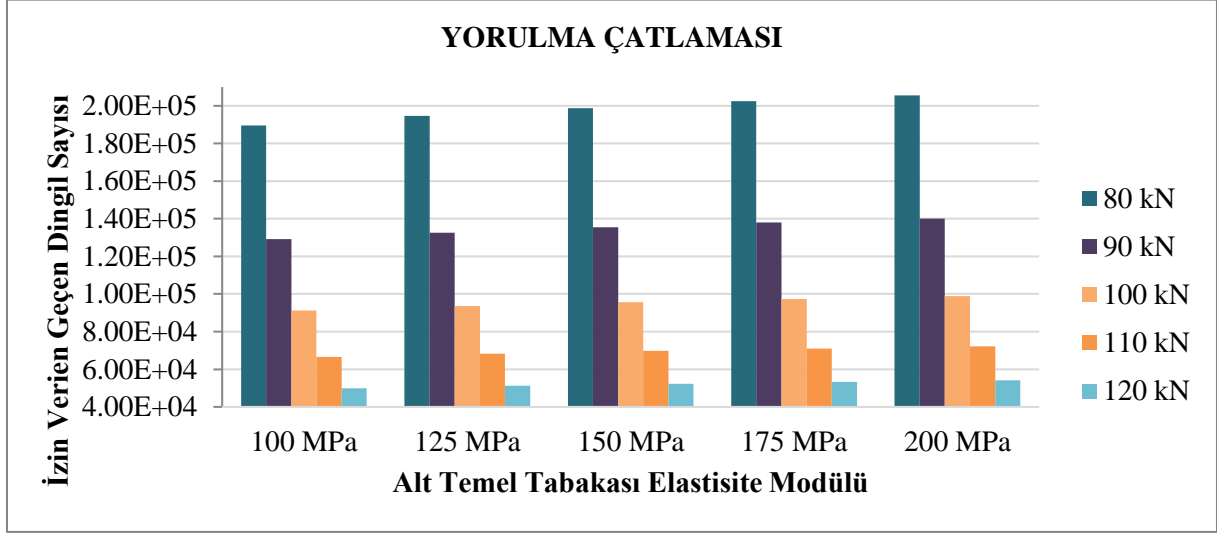
Şekil 4.38. Temel tabakasının elastisite modülü değişimine göre 80 kN dingil yükü altında izin verilen yük tekrar sayısının farklı kuruluşlara göre değişimi (%) (2. Model).

Şekil 4.37 ve 4.38’de temel tabakasının elastisite modülü arttıkça tekerlek izi oturması ve yorulma çatlama oluşumuna bağlı olarak yoldan geçmesine izin verilen dingil yükü sayılarındaki ortalama artış yüzdeleri görülmektedir. Bu grafiklere göre her bir bozulma türü için temel tabakası elastisite modülü değerinin artışı yoldan geçmesine izin verilen dingil yükü sayısını arttırmıştır.



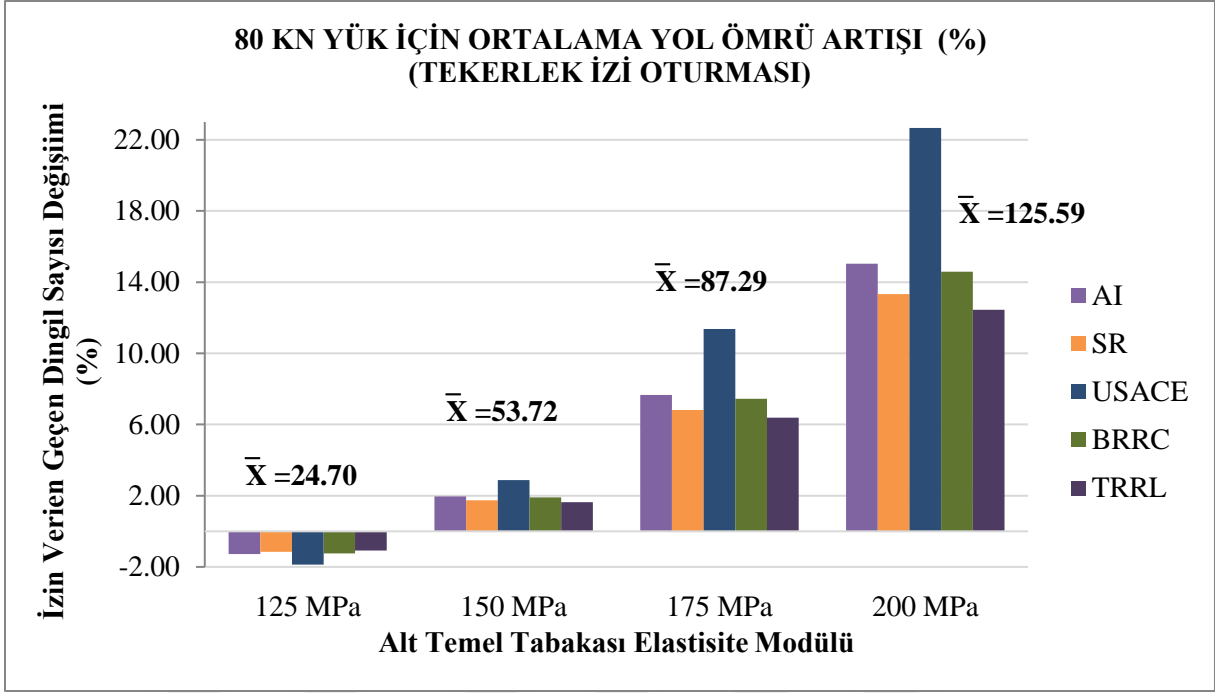
Şekil 4.39. Alt temel tabakasının elastisite modülü değişimine göre tekerlek izi oturması için izin verilen yük tekrar sayısı (2. Model).

Şekil 4.39’da görüldüğü üzere ikinci modelin alt temel tabakası üzerinde yapılan analiz sonuçlarına göre tekerlek izine bağlı yol ömrü değerleri alt temel tabakasının elastisite modülünün artırılmasıyla birlikte artış göstermiştir. %2-15 aralığında artışlar gözlenmiştir. Elastisite modülünün 100 MPa’dan 125 MPa’ya artırılmasıyla ise izin verilen dingil sayısı değerinde %1.28’lik bir azalma meydana gelmektedir.

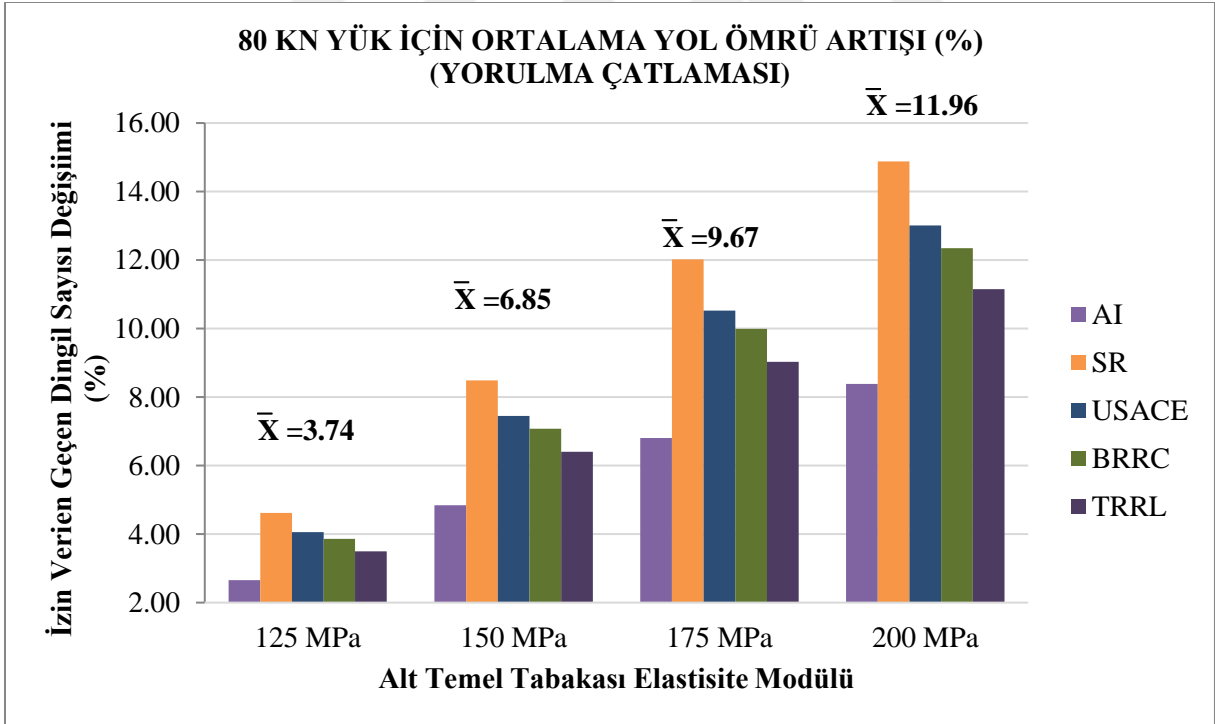


Şekil 4.40. Alt temel tabakasının elastisite modülü değişimine göre yorulma çatlama oluşumu için izin verilen yük tekrar sayısı (2. Model).

Şekil 4.40’da görüldüğü üzere yorulma çatlama oluşumu de alt temel tabakasının elastisite modülünün artırılmasıyla birlikte artış göstermiştir. Bu artış oranı %2.6-8.3 aralığında gözlenmiştir.



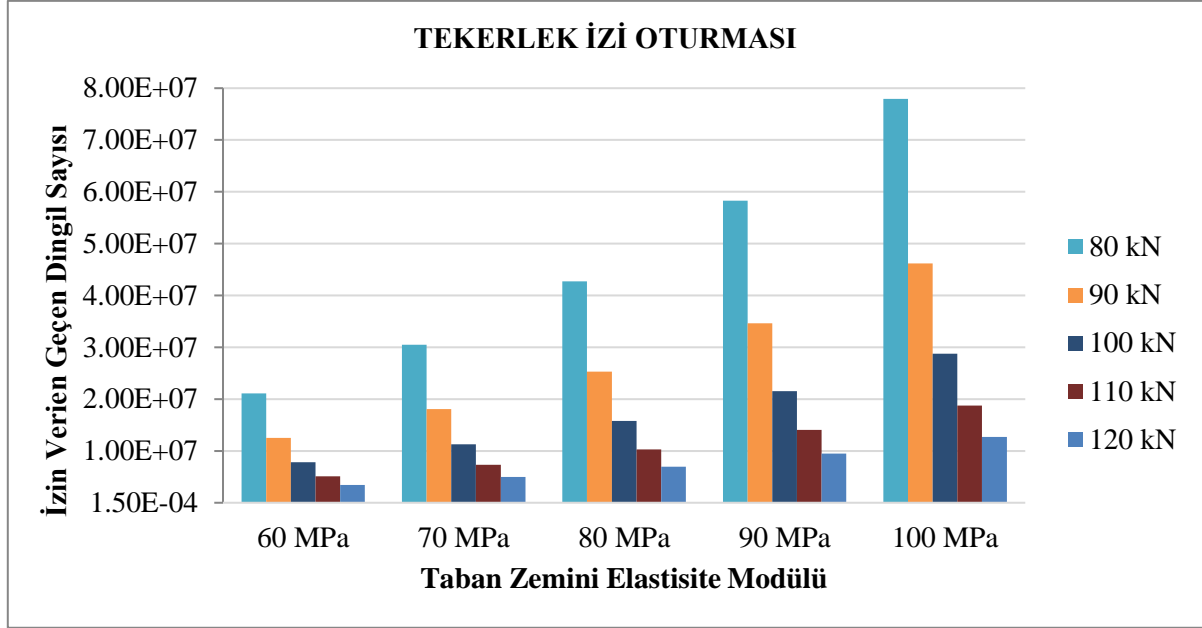
Şekil 4.41. Alt temel tabakasının elastisite modülü değişimine göre 80 kN dingil yükü altında izin verilen yük tekrar sayısının farklı kuruluşlara göre değişimi (%) (2. Model).



Şekil 4.42. Alt temel tabakasının elastisite modülü değişimine göre 80 kN dingil yükü altında izin verilen yük tekrar sayısının farklı kuruluşlara göre değişimi (%) (2. Model).

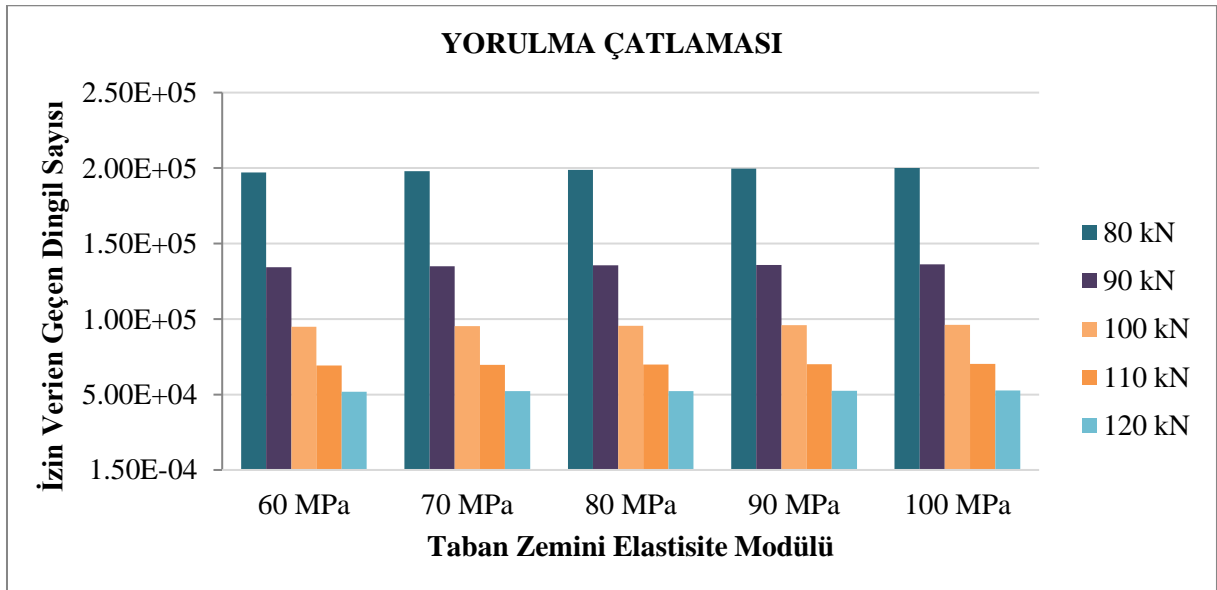
Şekil 4.41 ve 4.42’de alt temel tabakasının elastisite modülü arttıkça tekerlek izi oturması ve yorulma çatlama oluşumuna bağlı olarak yoldan geçmesine izin verilen dingil yükü sayılarındaki

ortalama artış yüzdeleri görülmektedir. Bu grafiklere göre her bir bozulma türü için alt temel tabakası elastisite modülü değerinin artışı yoldan geçmesine izin verilen dingil yükü sayısını arttırmıştır.



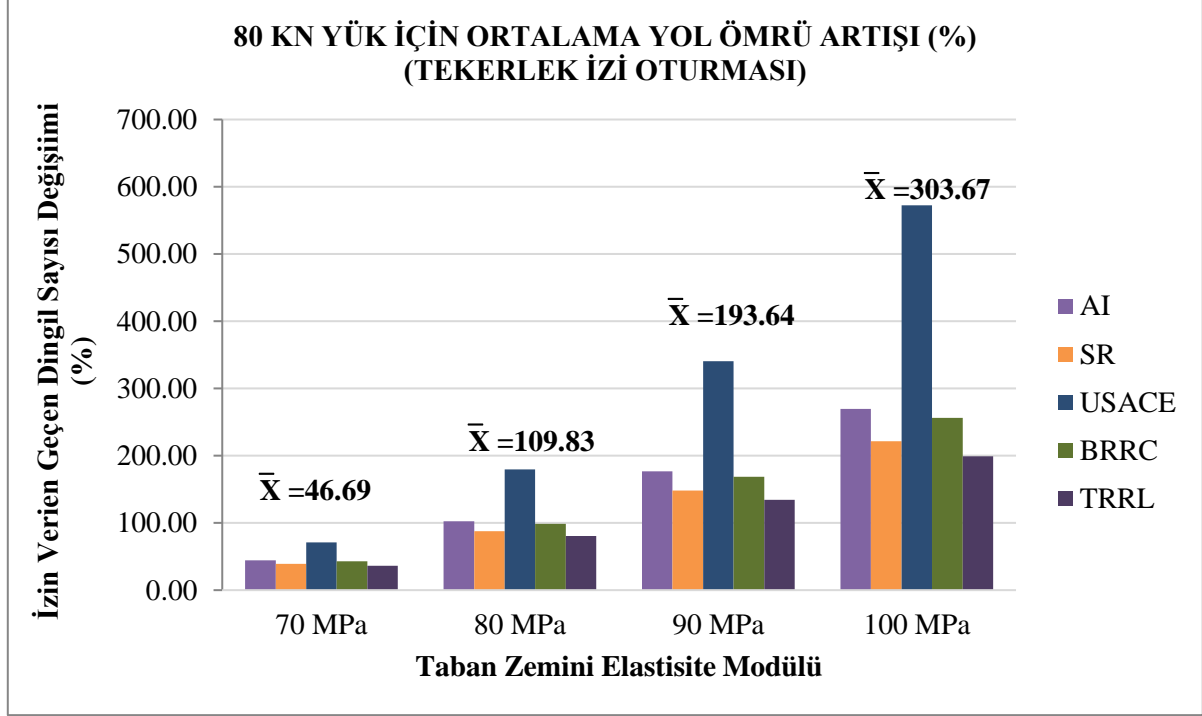
Şekil 4.43. Taban zemininin elastisite modülü değişimine göre tekerlek izi oturması için izin verilen yük tekrar sayısı (2. Model).

Şekil 4.43’de görüldüğü üzere ikinci modelin taban zeminini üzerinde yapılan analiz sonuçlarına göre, tekerlek izine bağlı yol ömrü değerleri taban zemininin elastisite modülünün artırılmasıyla birlikte artış göstermiştir. Bu artış oranı %45-270 aralığında gözlenmiştir.

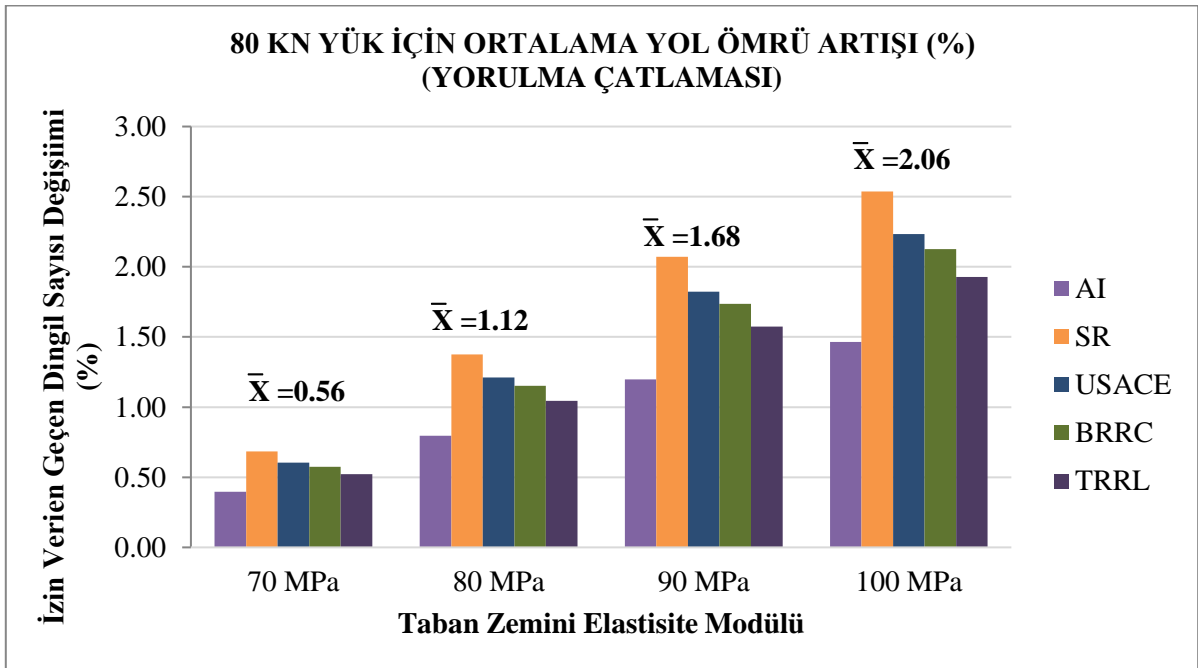


Şekil 4.44. Taban zemininin elastisite modülü değişimine göre yorulma çatlama oluşumu için izin verilen yük tekrar sayısı (2. Model).

Şekil 4.44’de görüldüğü üzere yorulma çatlamasına bağlı yol ömrü değerleri de taban zemininin elastisite modülünün artırılmasıyla birlikte artış göstermiştir. %0.4-1.47 aralığında artışlar gözlenmiştir.



Şekil 4.45. Taban zemininin elastisite modülü değişimine göre 80 kN dingil yükü altında izin verilen yük tekrar sayısının farklı kuruluşlara göre değişimi (%) (2. Model).



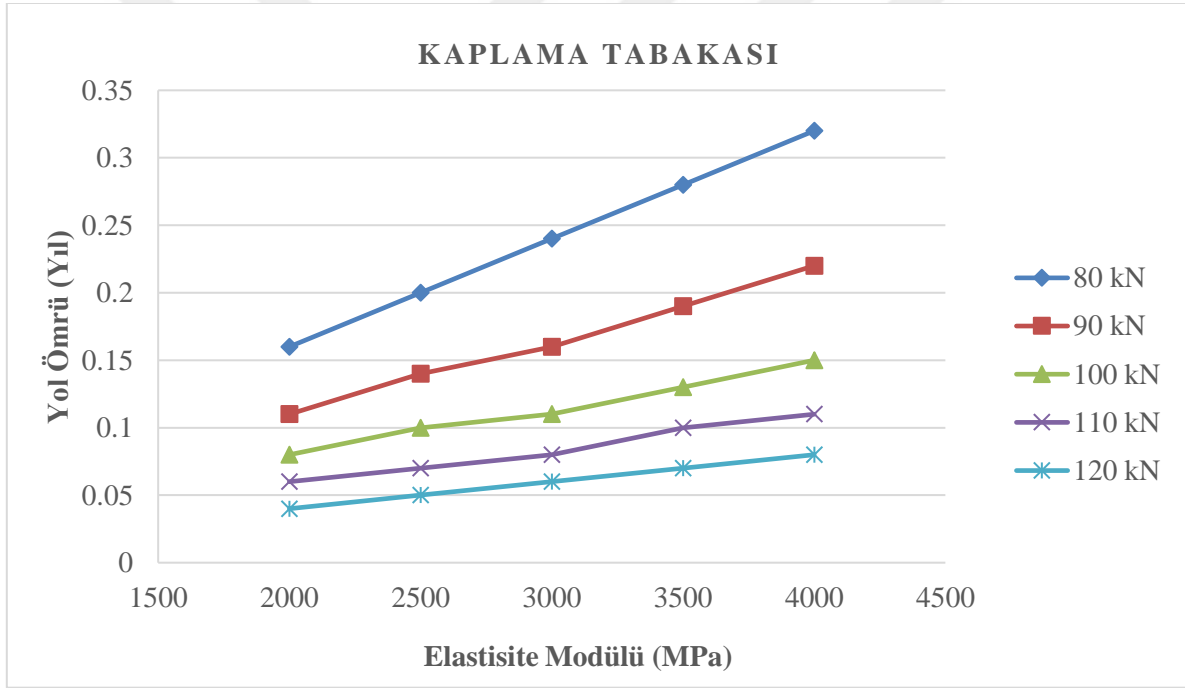
Şekil 4.46. Taban zemininin elastisite modülü değişimine göre 80 kN dingil yükü altında izin verilen yük tekrar sayısının farklı kuruluşlara göre değişimi (%) (2. Model).

Şekil 4.45 ve 4.46’da taban zemininin elastisite modülü arttıkça tekerlek izi oturması ve yorulma çatlama oluşumuna bağlı olarak yoldan geçmesine izin verilen dingil yükü sayılarındaki ortalama artış yüzdeleri görülmektedir. Bu grafiklere göre her bir bozulma türü için taban zemini elastisite modülü değerinin artışı yoldan geçmesine izin verilen dingil yükü sayısını arttırmıştır.

4.2.3. Yol Ömrü Hesabı

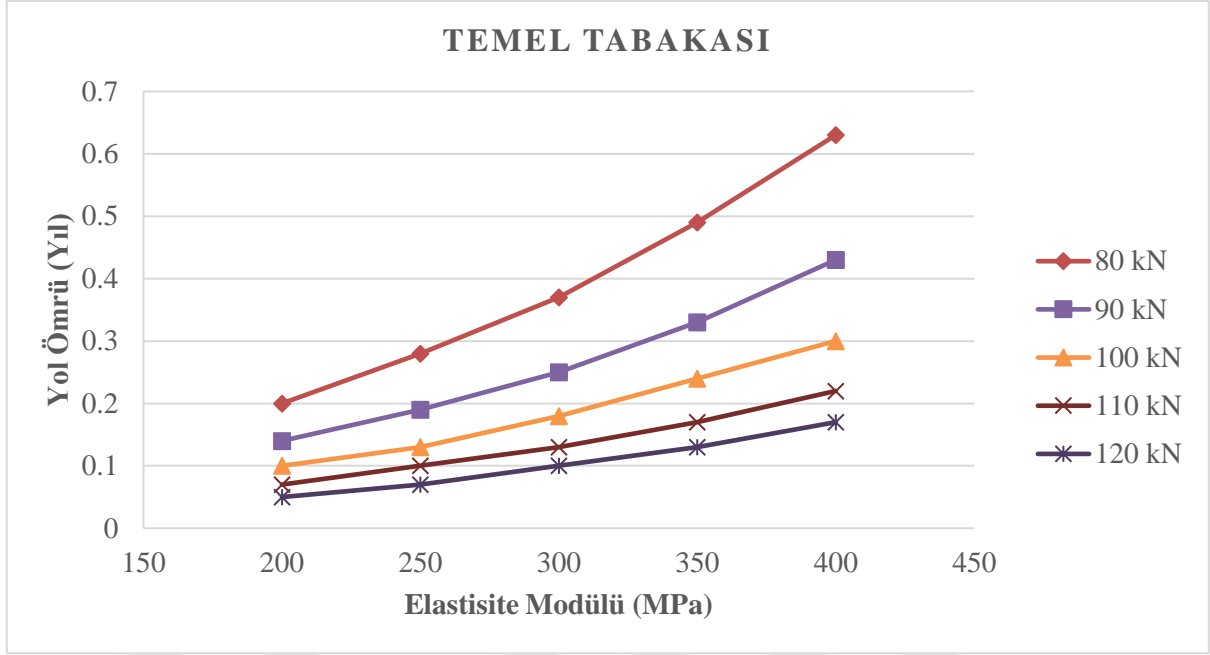
4.2.3.1. Yükleme ve Elastisite Modülü Değerlerinin Değiştirilmesi ile Hesap Yapılması

Birinci modelimizin kaplama tabakası, temel tabakası ve taban zemini elastisite modülü ve dingil yükü değerlerinin değiştirilmesiyle yapılan analizler sonucu aşağıdaki grafikler düzenlenmiştir.



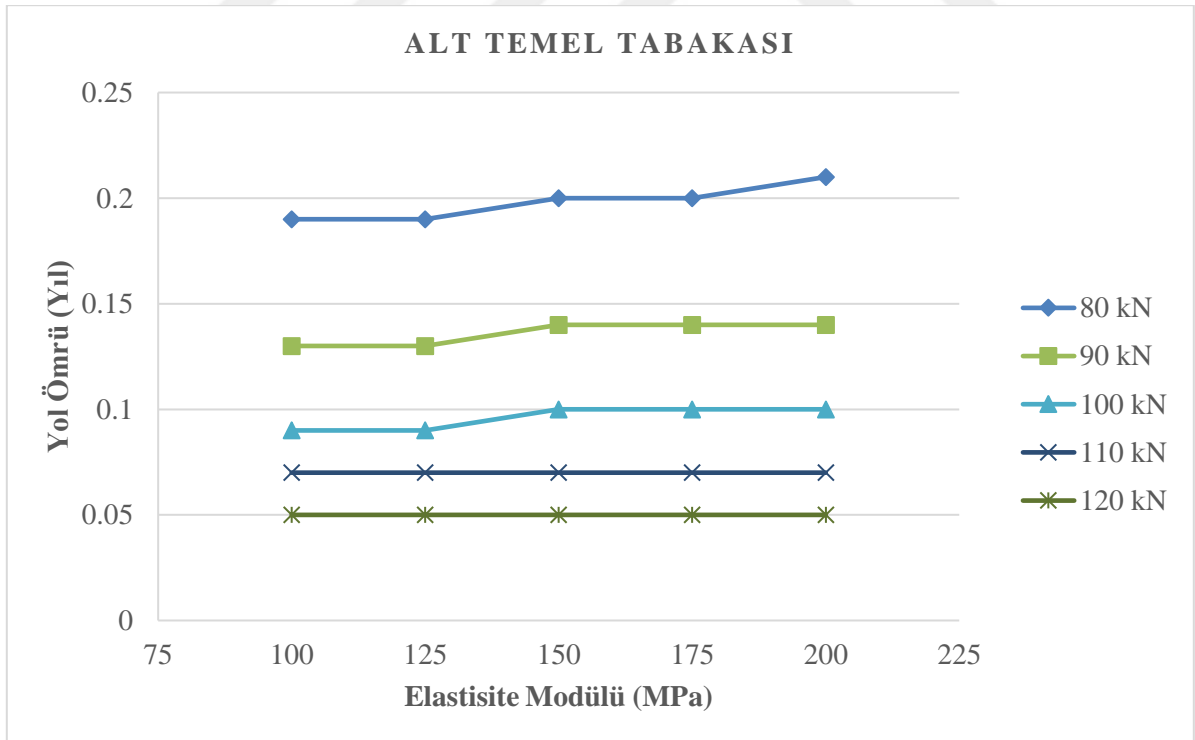
Şekil 4.47. Kaplama tabakasının elastisite modülü değişimine göre yol ömrünün değişimi (2. Model).

Şekil 4.47’ye göre kaplama tabakasının elastisite modülünün artırılmasıyla yıl cinsinden yol ömrünün %20-100 aralığında artış gösterdiğini görmekteyiz. Bu değişimler tüm dingil yükü değerleri için ortalama olarak aynı etkiyi göstermiştir.



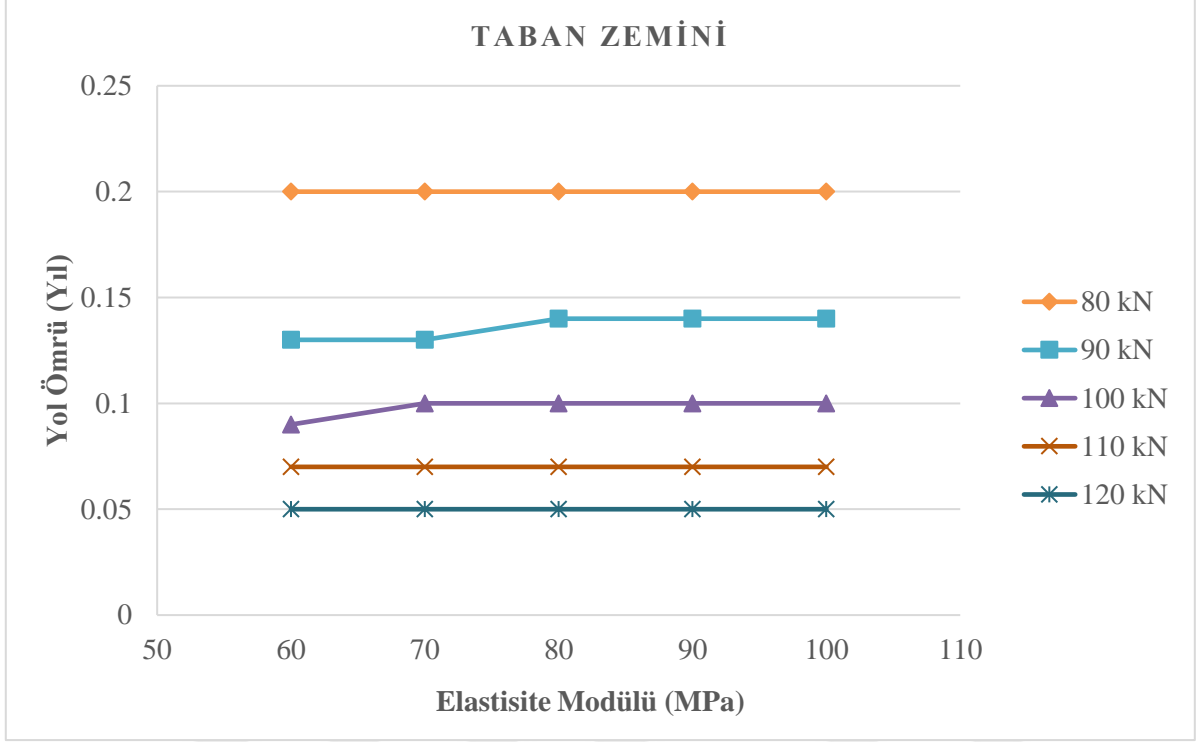
Şekil 4.48. Temel tabakasının elastisite modülü değişimine göre yol ömrünün değişimi (2. Model).

Temel tabakası elastisite modülünün artırılmasıyla yol ömrü %35-240 aralığında artış göstermiştir. Bu değişimler tüm dingil yükü değerleri için ortalama olarak aynı etkiyi göstermiştir.



Şekil 4.49. Alt temel tabakasının elastisite modülü değişimine göre yol ömrünün değişimi (2. Model).

Alt temel tabkasının elastisite modülünün artırılmasıyla yol ömründe %7 ve %11 oranında artışlar görülmüştür. 110 kN ve 120kN dingil yükü altında elastisite modülünün artırılmasının yol ömrüne herhangi bir etkisi olmamıştır.



Şekil 4.50. Taban zeminin elastisite modülü değişimine göre yol ömrünün değişimi (2. Model).

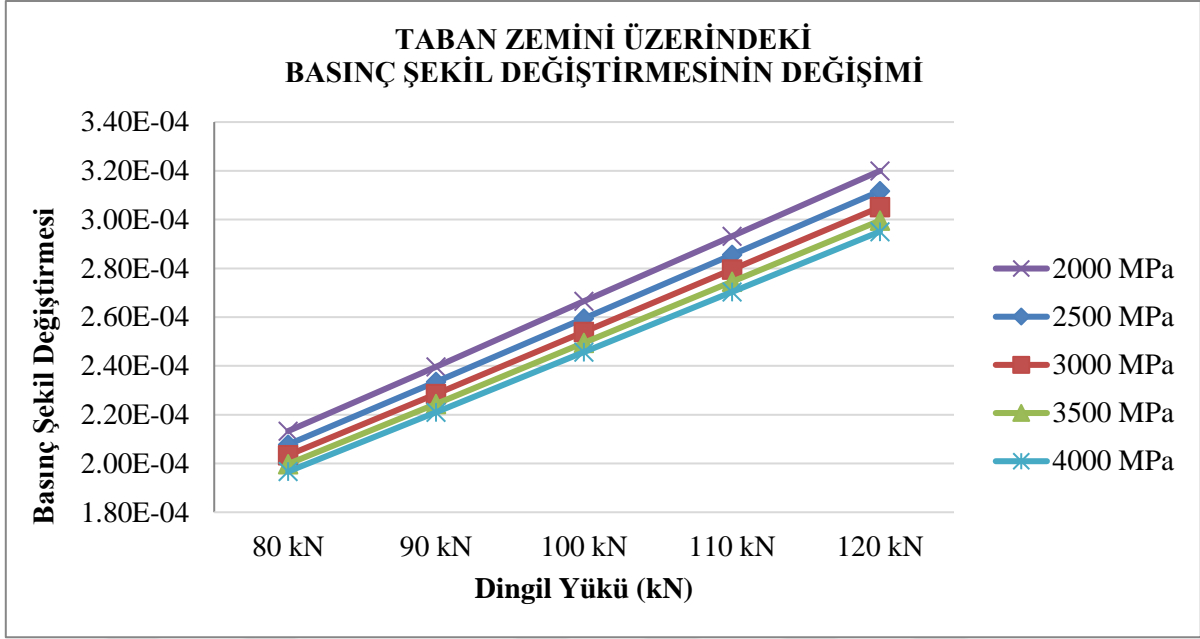
Taban zemininin elastisite modülünün artırılmasıyla yol ömründe %7 ve %11 oranında artışlar görülmüştür. 80kN, 110 kN ve 120kN dingil yükü altında elastisite modülünün artırılmasının yol ömrüne herhangi bir etkisi olmamıştır.

Tabakalar ve taban zemininin analiz sonuçları genel olarak değerlendirildiğinde elastisite modülü artışının etkisi en çok temel tabkasında görülmektedir.

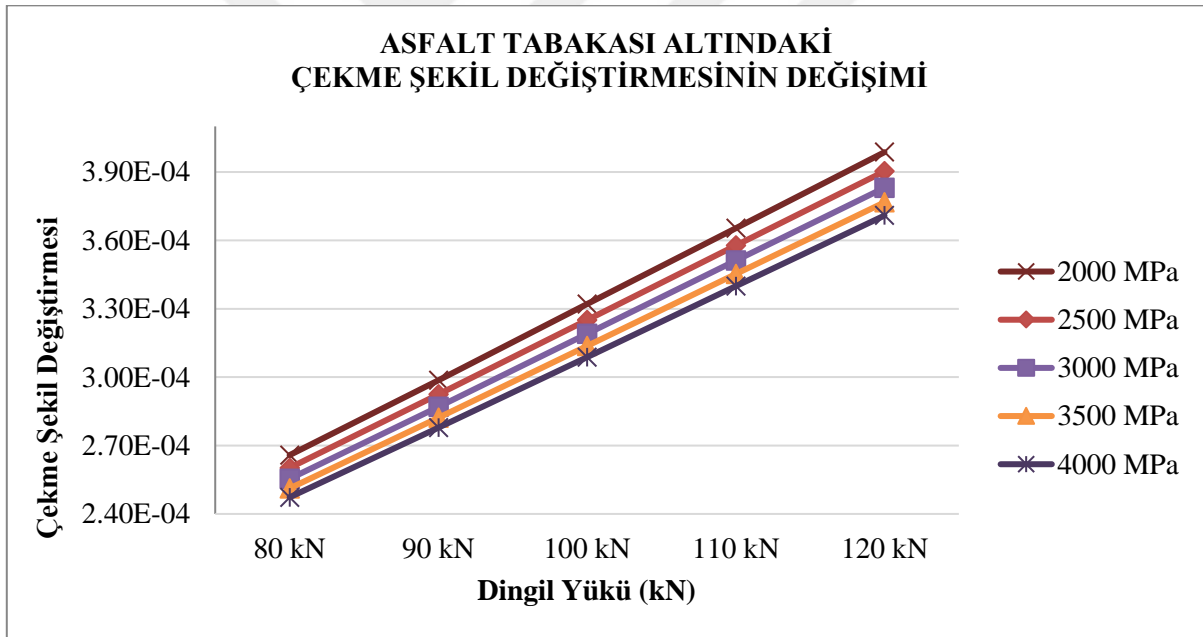
4.3. Üçüncü Model İçin Analiz Sonuçları

4.3.1. Basınç ve Çekme Şekil Değiştirmesi Hesabı

Grafikler incelendiğinde, elastisite modülünün artırılmasıyla basınç ve çekme şekil değiştirmelerinde azalma meydana geldiği gözlenmiştir.

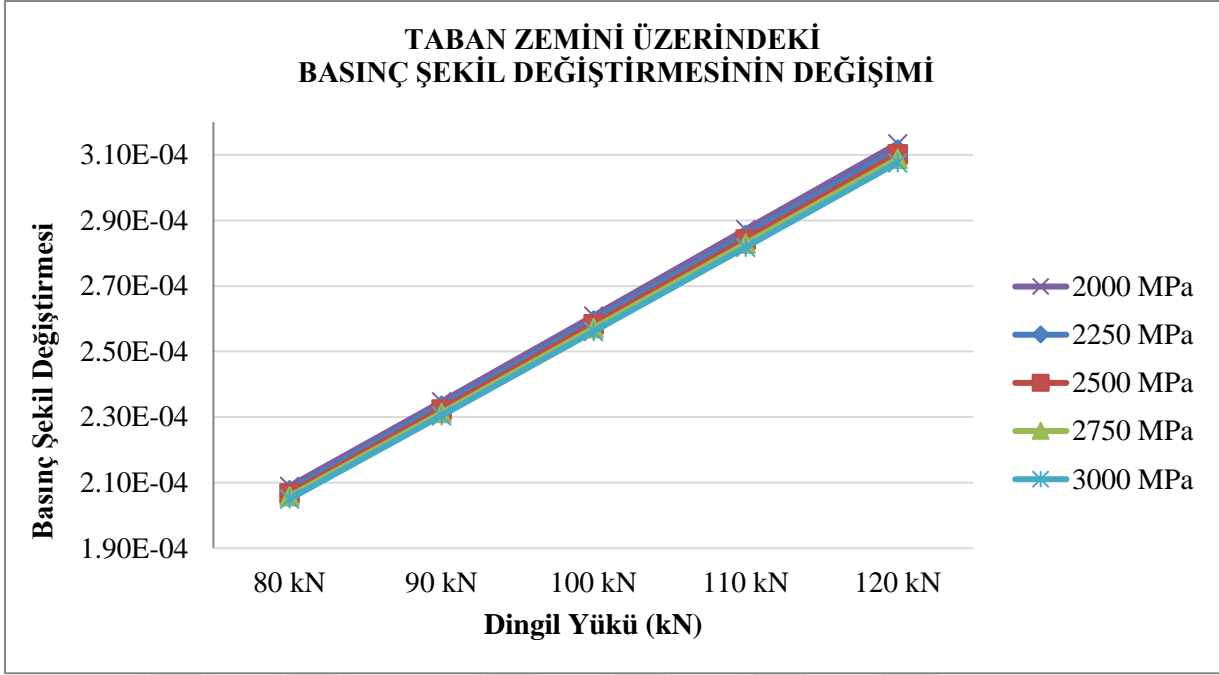


Şekil 4.51. Aşınma tabakasının elastisite modülü değişimine göre basınç şekil değişirgesi (3. Model).

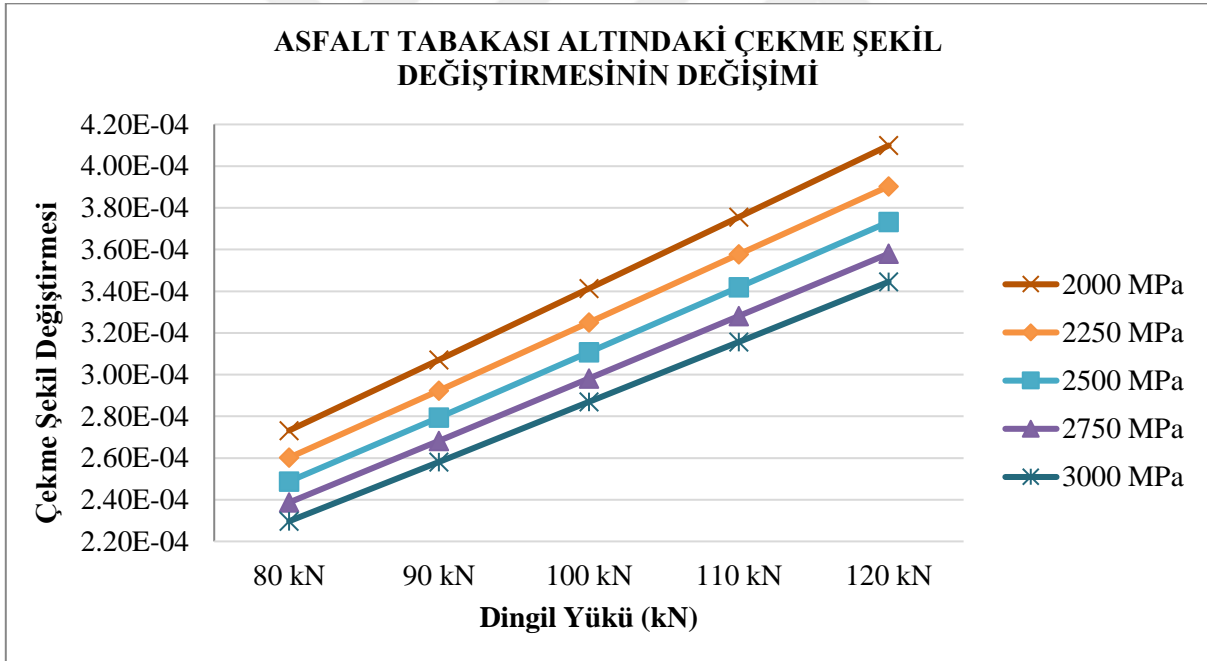


Şekil 4.52. Aşınma tabakasının elastisite modülü değişimine göre çekme şekil değişirgesi (3. Model).

Aşınma tabakasının elastisite modülünün artırılmasıyla basınç şekil değişirgesindeki azalma %2.5-8 aralığındayken, çekme şekil değişirgesindeki azalma %2-7 aralığındadır.

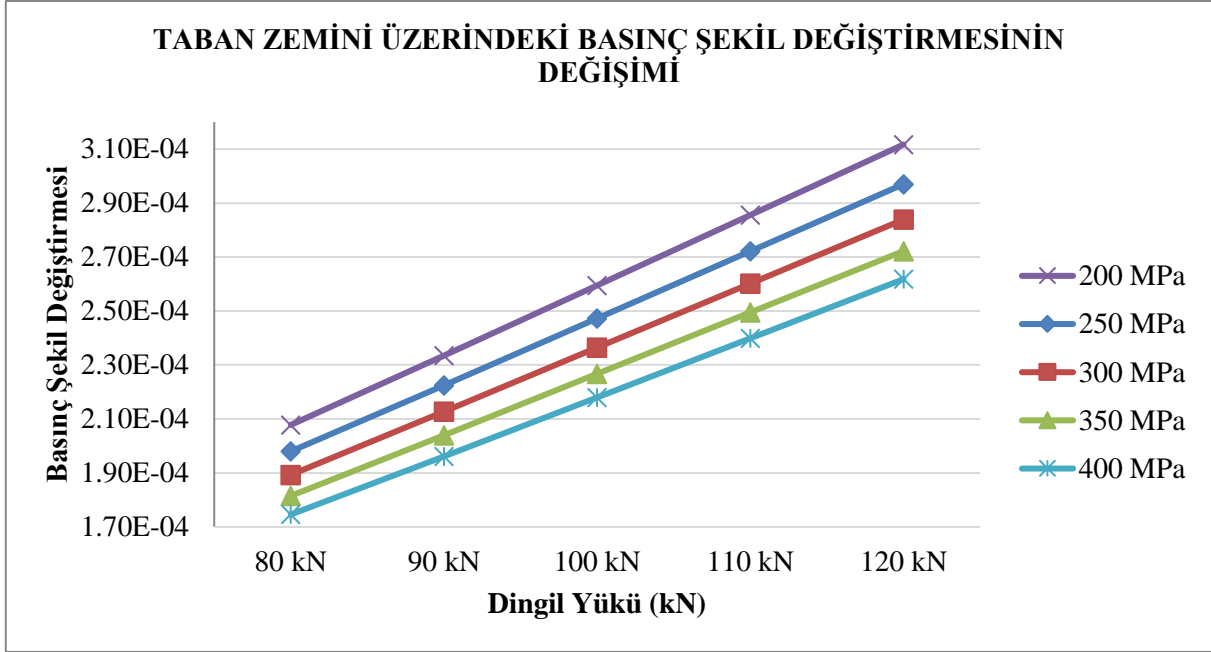


Şekil 4.53. Binder tabakasının elastisite modülü değişimine göre basınç şekil değişirmesi (3. Model).

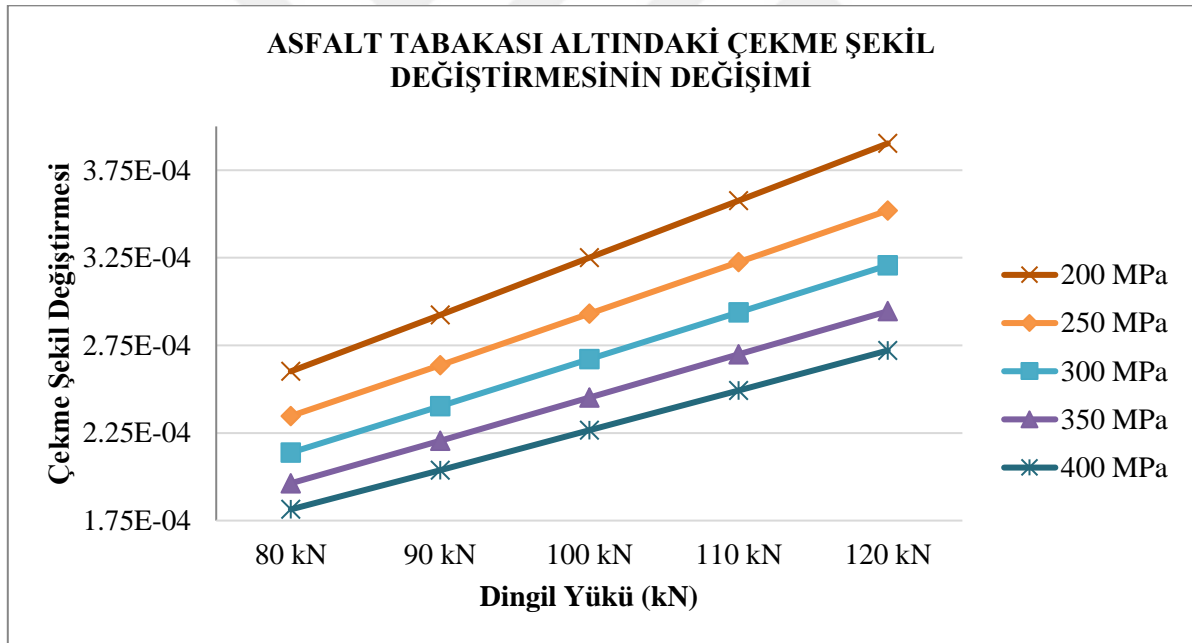


Şekil 4.54. Binder tabakasının elastisite modülü değişimine göre basınç şekil değişirmesi (3. Model).

Binder tabakasının elastisite modülünün artırılmasıyla basınç şekil değişirmesindeki azalma %0.5-1.9 aralığındayken, çekme şekil değişirmesindeki azalma %4.8-16 aralığındadır.

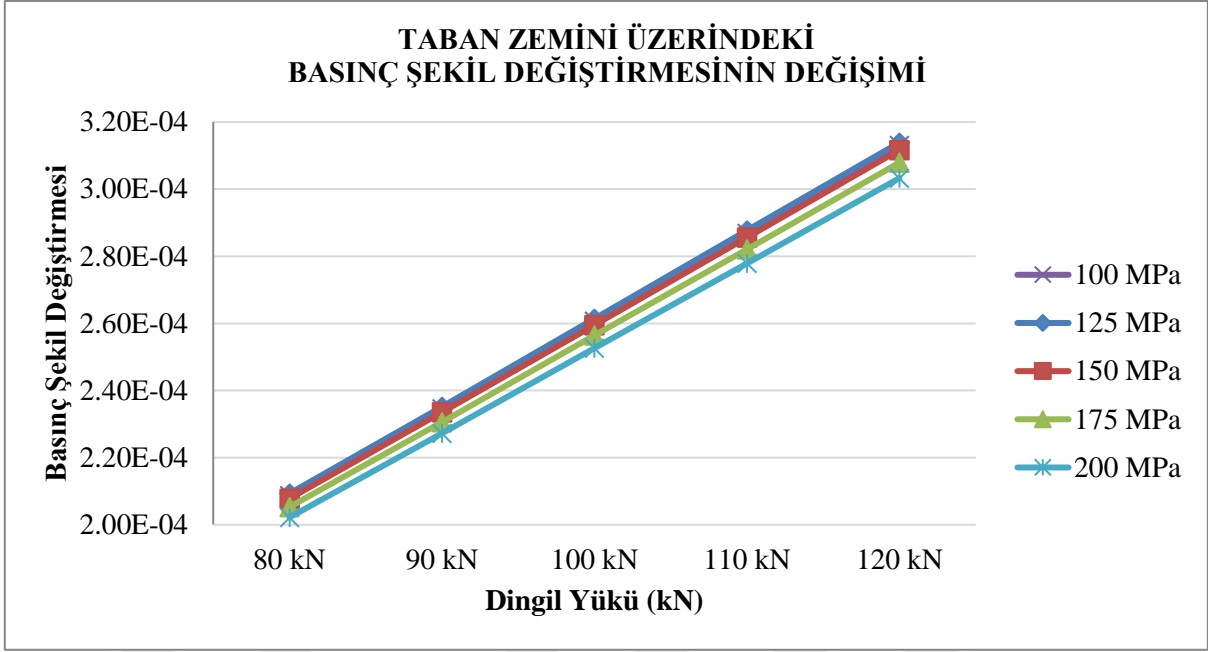


Şekil 4.55. Temel tabakasının elastisite modülü değişimine göre basınç şekil değişirmesi (3. Model).

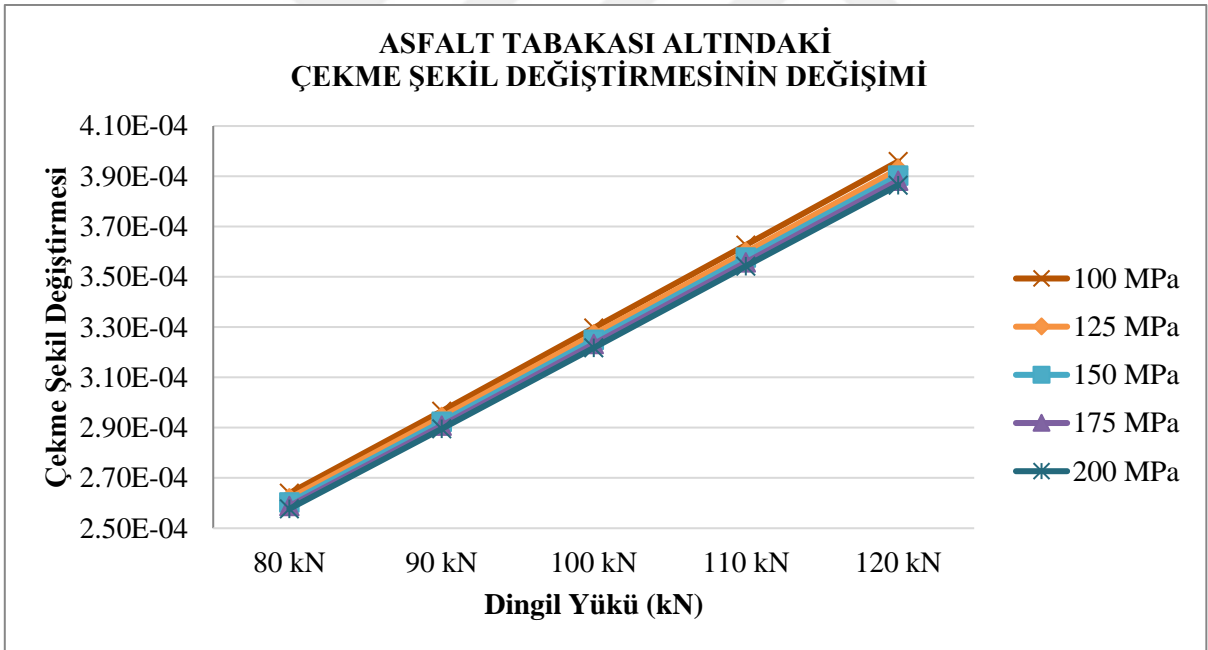


Şekil 4.56. Temel tabakasının elastisite modülü değişimine göre çekme şekil değişirmesi (3. Model).

Temel tabakasının elastisite modülünün artırılmasıyla basınç şekil değişirmesindeki azalma %4.7-16 aralığındayken, çekme şekil değişirmesindeki azalma % 10-30 aralığındadır.

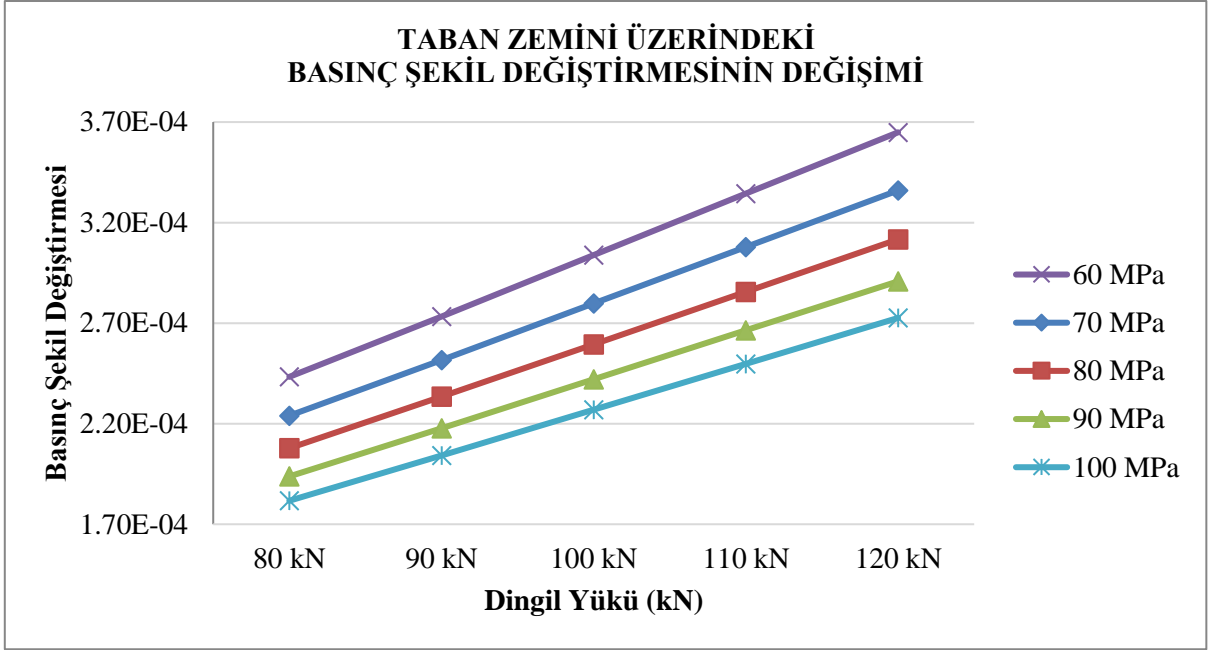


Şekil 4.57. Alt temel tabakasının elastisite modülü değişimine göre basınç Şekil değiştirmesi (3. Model).

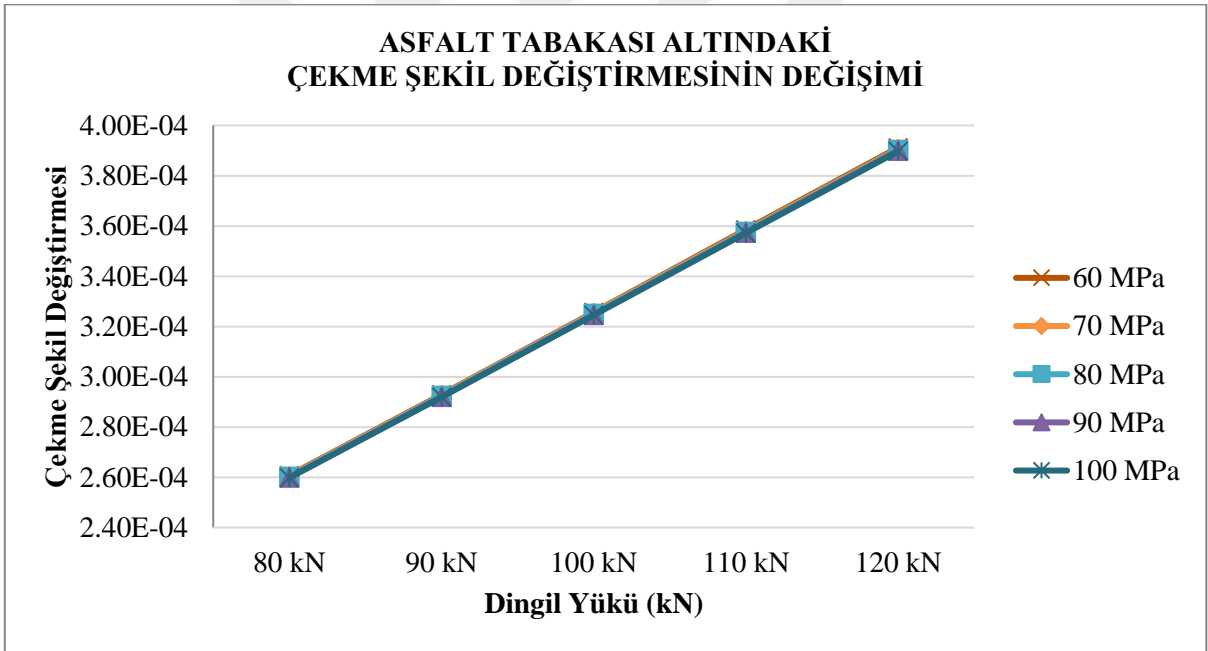


Şekil 4.58. Alt temel tabakasının elastisite modülü değişimine göre çekme Şekil değiştirmesi (3. Model).

Alt temel tabakasının elastisite modülünün artırılmasıyla basınç Şekil değiştirmesindeki azalma %0.5-3 aralığındayken, çekme Şekil değiştirmesindeki azalma %0.7-2.4 aralığındadır.



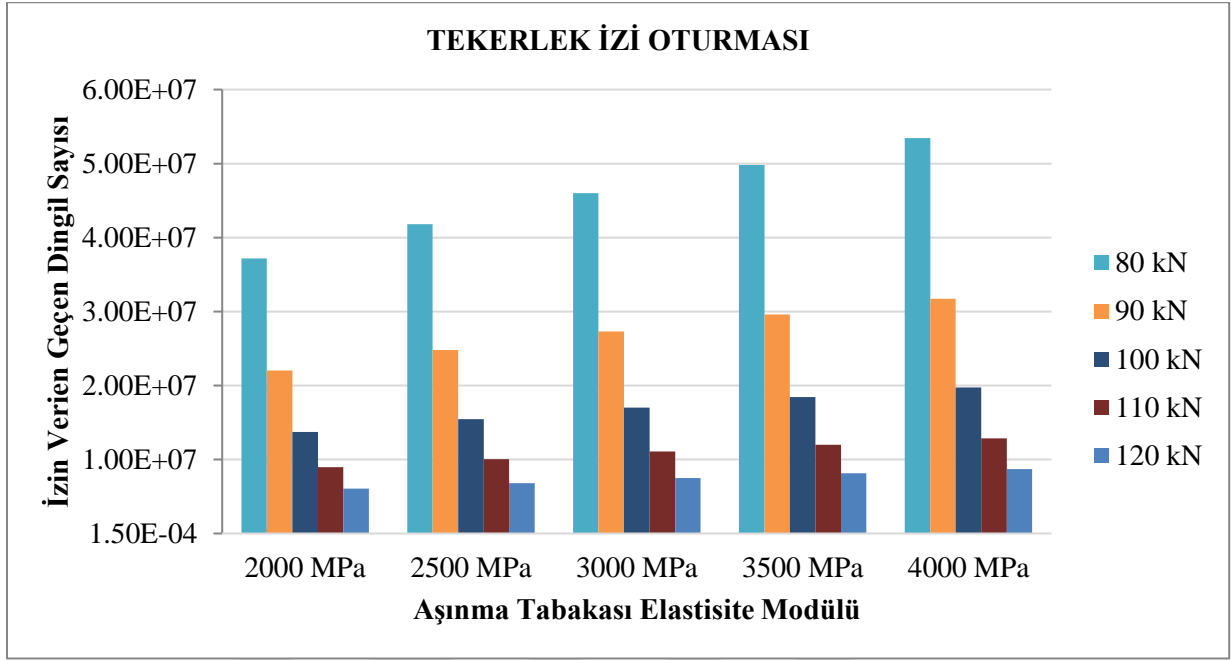
Şekil 4.59. Taban zemininin elastisite modülü değişimine göre basınç şekil değişirmesi (3. Model).



Şekil 4.60. Taban zemininin elastisite modülü değişimine göre basınç şekil değişirmesi (3. Model).

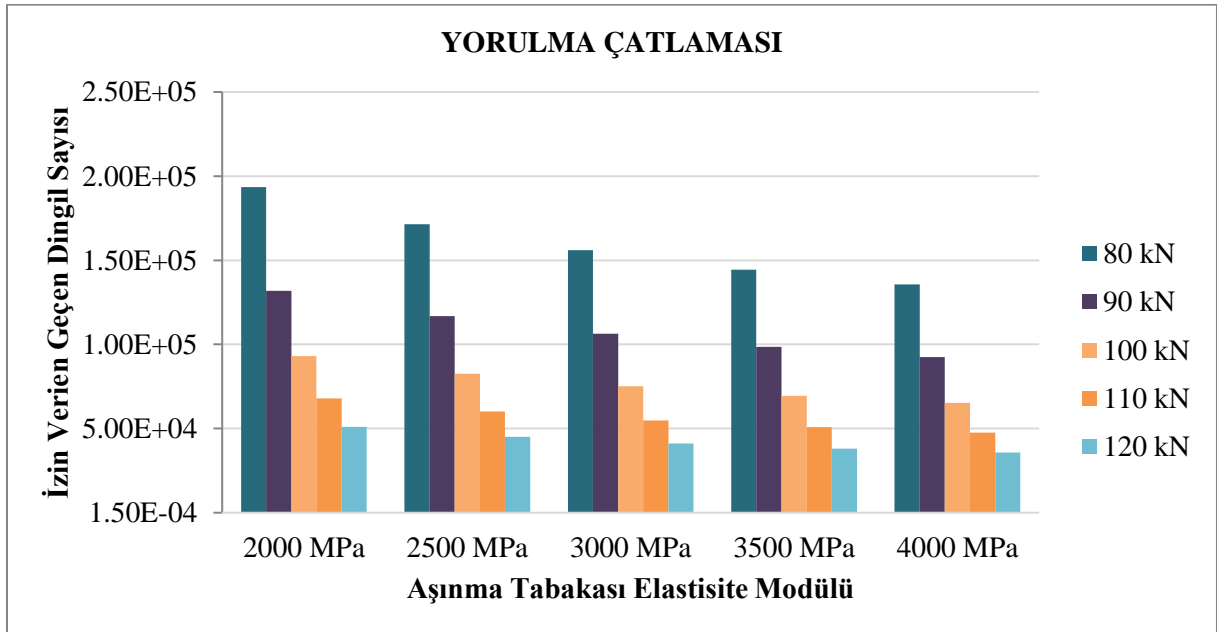
Taban zemininin elastisite modülünün artırılmasıyla basınç şekil değişirmesindeki azalma %8-25 aralığındayken, çekme şekil değişirmesindeki azalma %9-31 aralığındadır.

4.3.2. İzin Verilen Yük Tekrar Sayısı Hesabı



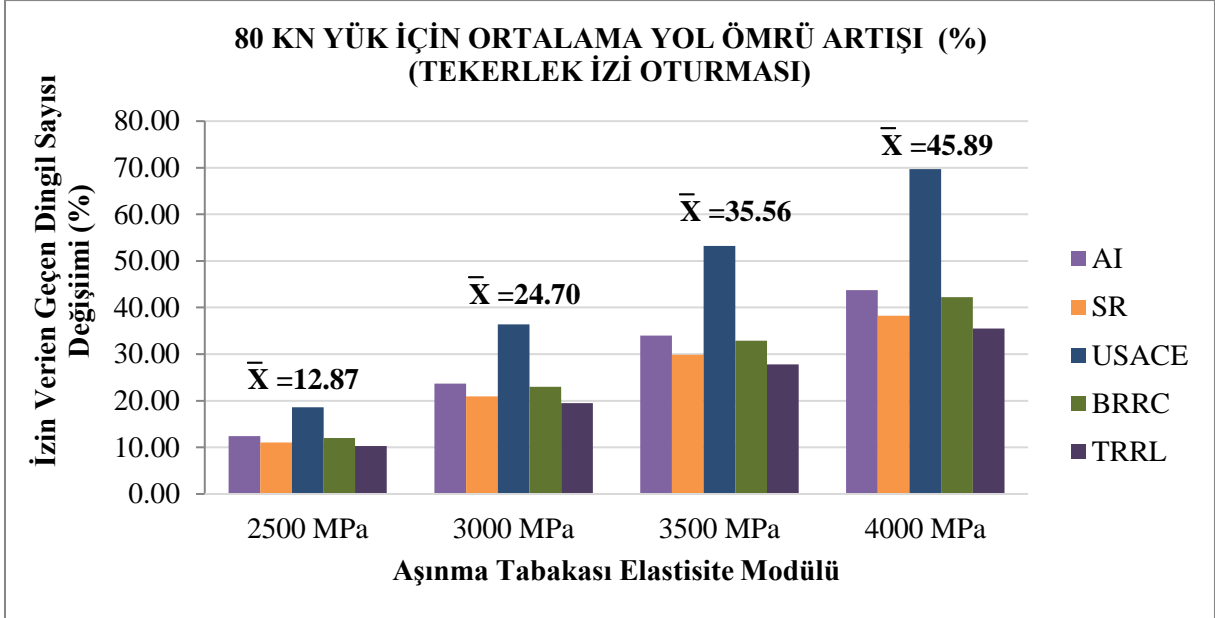
Şekil 4.61. Aşınma tabakasının elastisite modülü değişimine göre tekerlek izi oturması için izin verilen yük tekrar sayısı (3. Model).

Şekil 4.61’de görüldüğü üzere üçüncü modelin aşınma tabakası üzerinde yapılan analiz sonuçlarına göre tekerlek izine bağlı yol ömrü değerleri kaplama tabakasının elastisite modülünün artırılmasıyla birlikte artış göstermiştir. %12-43 aralığında artış gözlenmiştir.

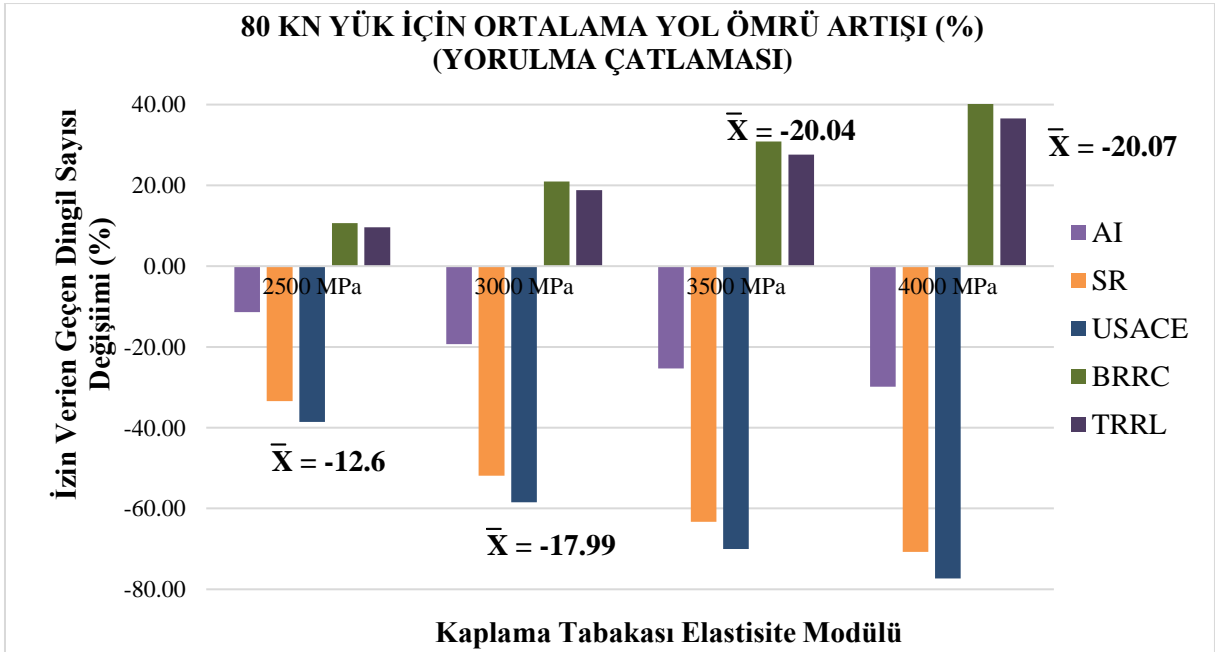


Şekil 4.62. Aşınma tabakasının elastisite modülü değişimine göre yorulma çatlama oluşumu için izin verilen yük tekrar sayısı (3. Model).

Şekil 4.62’de görüldüğü üzere yorulma çatlamaına bağlı yol ömrü değerleri de aşınma tabakasının elastisite modülünün artırılmasıyla birlikte azalış göstermiştir. %11-30 aralığında azalış gözlenmiştir.

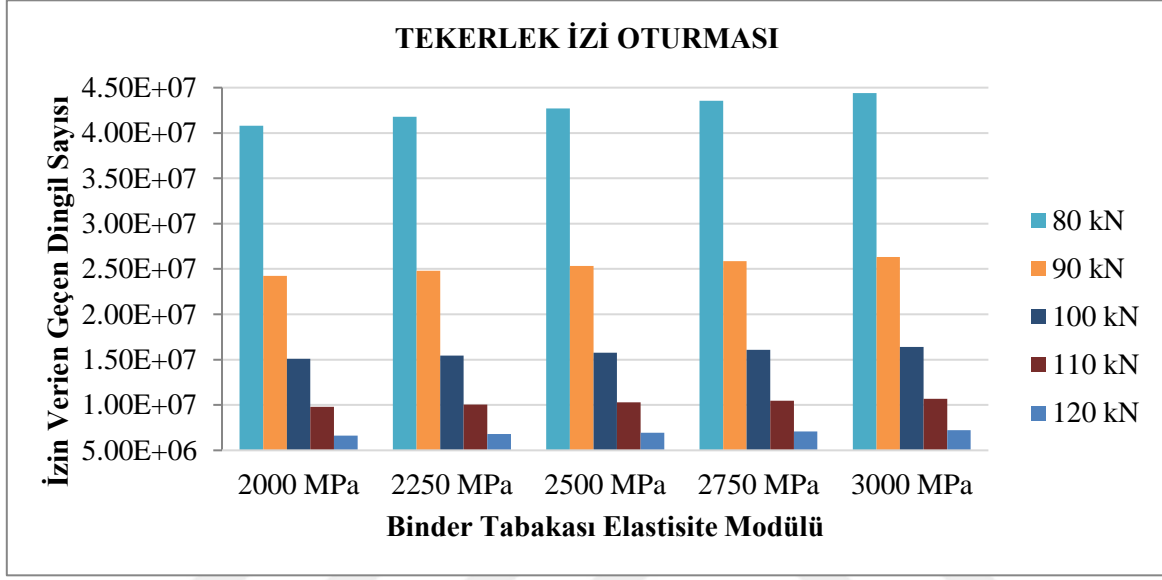


Şekil 4.63. Aşınma tabakasının elastisite modülü değişimine göre 80 kN dingil yükü altında izin verilen yük tekrar sayısının farklı kuruluşlara göre değişimi (%) (3. Model).

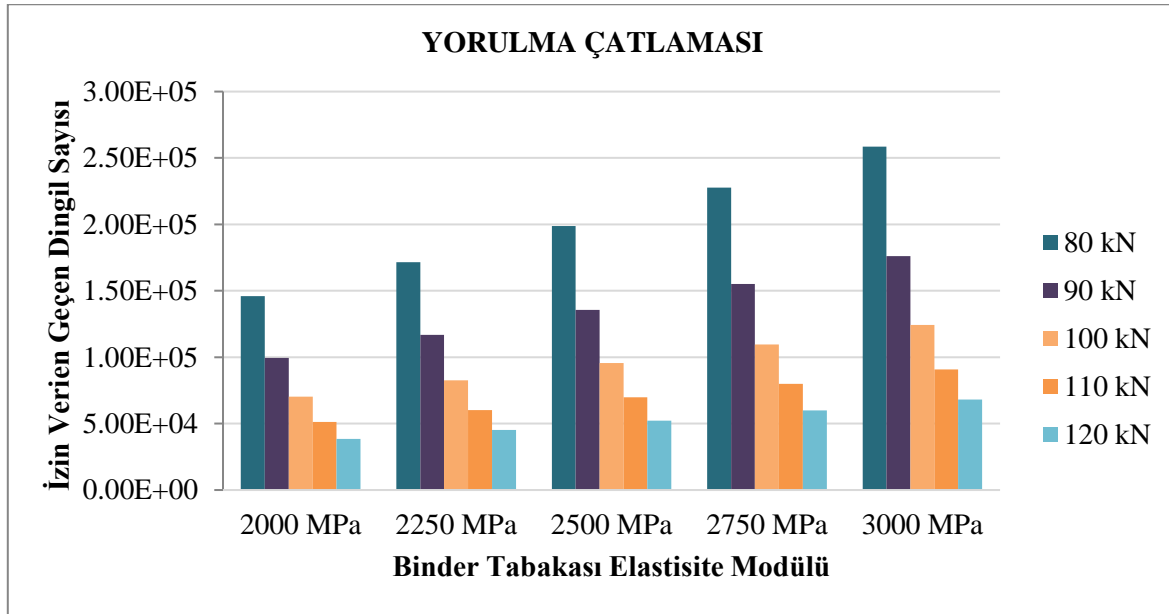


Şekil 4.64. Aşınma tabakasının elastisite modülü değişimine göre 80 kN dingil yükü altında izin verilen yük tekrar sayısının farklı kuruluşlara göre değişimi (%) (3. Model).

Şekil 4.63 ve 4.64’de aşınma tabakasının elastisite modülü arttıkça tekerlek izi oturması ve yorulma çatlama oluşumuna bağlı olarak yoldan geçmesine izin verilen dingil yükü sayılarındaki ortalama artış yüzdeleri görülmektedir. Bu grafiklere göre tekerlek izine bağlı hesaplarda her bir bozulma türü için aşınma tabakası elastisite modülü değerinin artışı yoldan geçmesine izin verilen dingil yükü sayısını artırırken, yorulma çatlama oluşumuna bağlı hesaplarda bazı kuruluşların hesaplarına göre azalmalar olduğunu görmekteyiz.

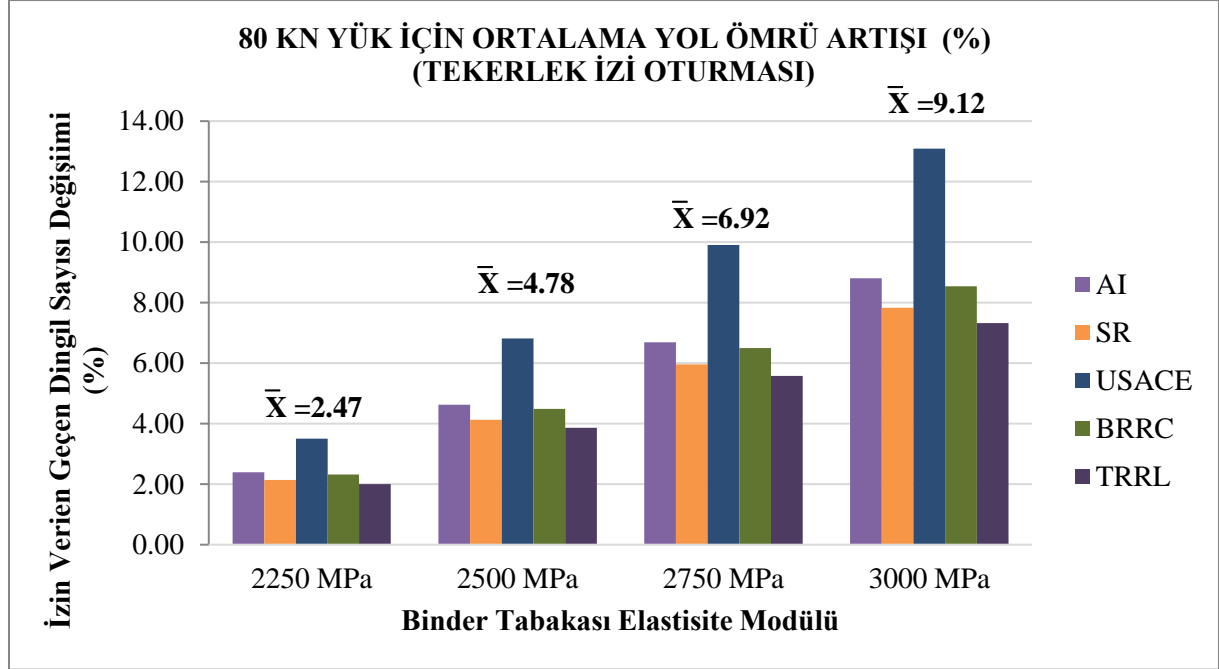


Şekil 4.65. Binder tabakasının elastisite modülü değişimine göre tekerlek izi oturması için izin verilen yük tekrar sayısı (3. Model).

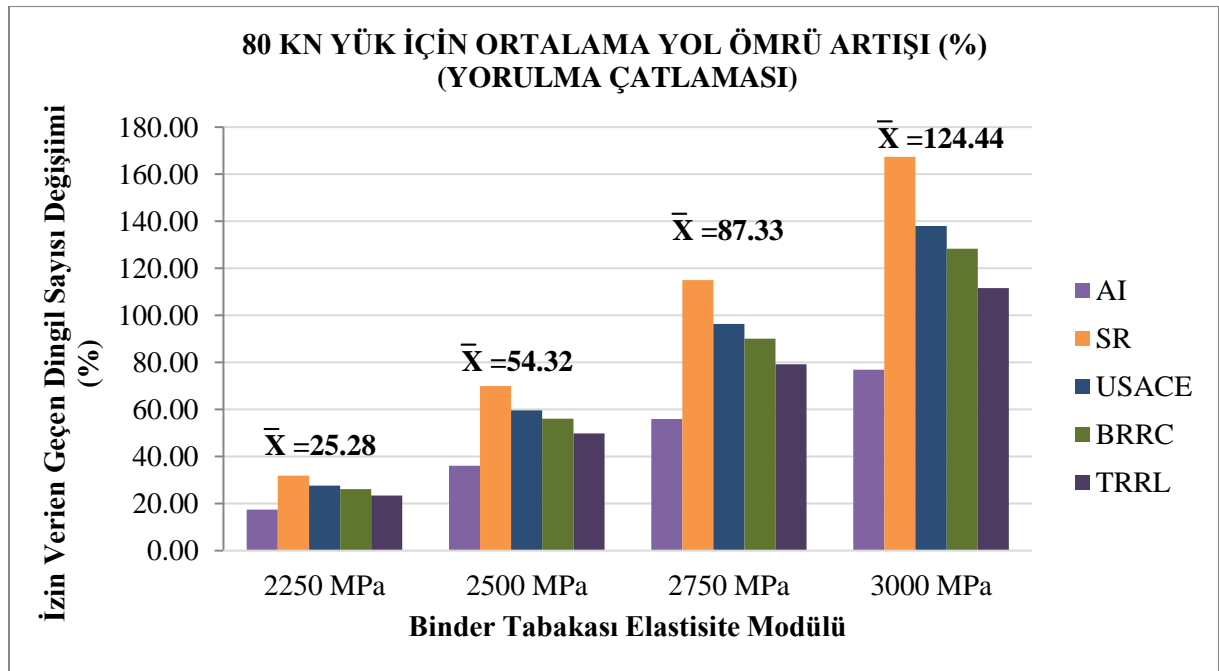


Şekil 4.66. Binder tabakasının elastisite modülü değişimine göre yorulma çatlama oluşumunu için izin verilen yük tekrar sayısı (3. Model).

Şekil 4.65 ve Şekil 4.66'da görüldüğü üzere tekerlek izine bağlı yol ömrü değerleri binder tabakasının elastisite modülünün artırılmasıyla birlikte artış göstermiştir. %2.4-8.8 aralığında artışlar gözlenmiştir. Yorulma çatlamaına bağlı yol ömrü değerleri de kaplama tabakasının elastisite modülünün artırılmasıyla birlikte artış göstermiştir. %17-80 aralığında artışlar gözlenmiştir.

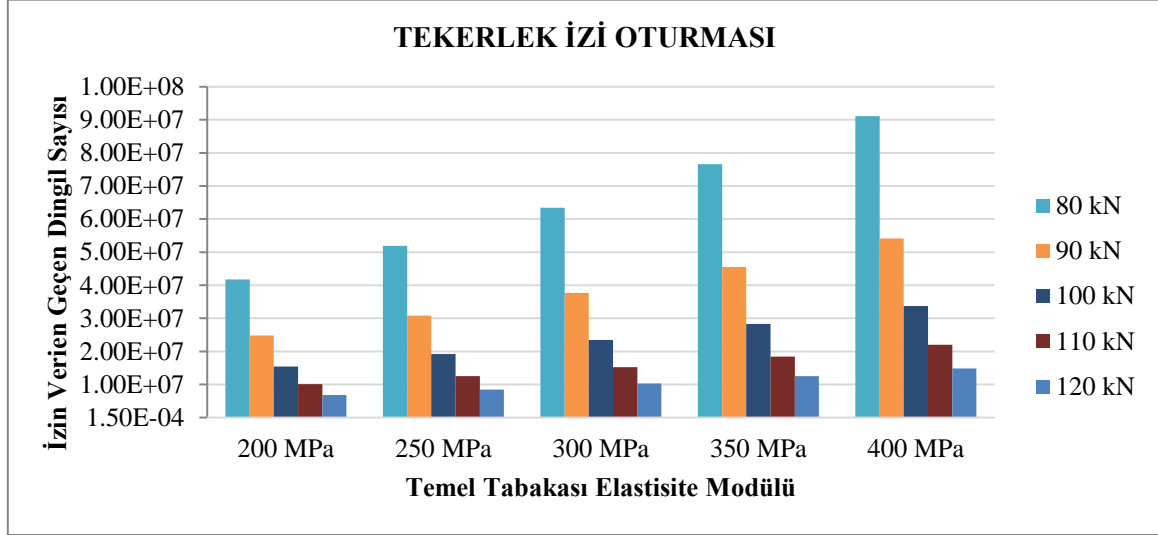


Şekil 4.67. Binder tabakasının elastisite modülü değişimine göre 80 kN dingil yükü altında izin verilen yük tekrar sayısının farklı kuruluşlara göre değişimi (%) (3. Model).



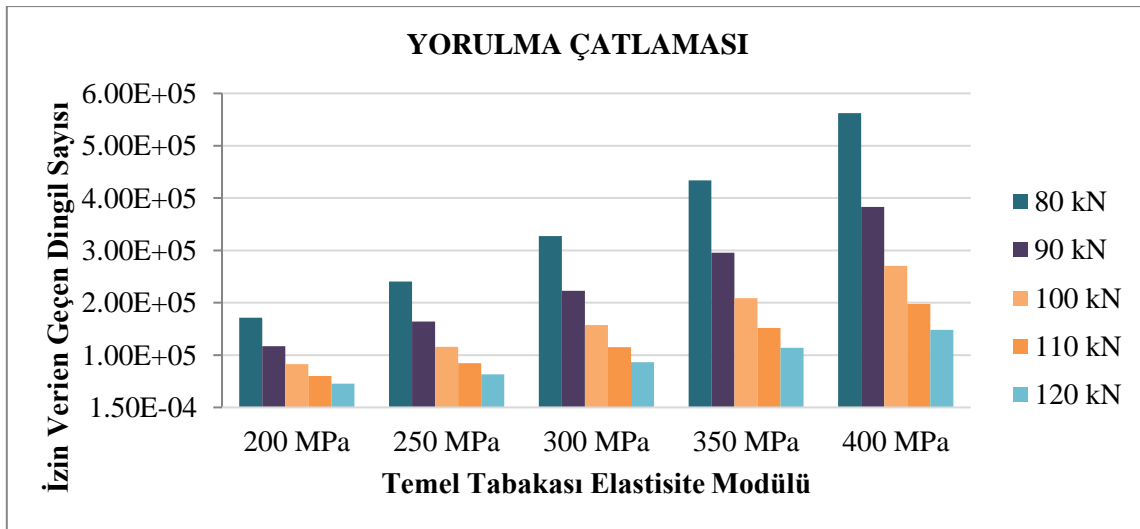
Şekil 4.68. Binder tabakasının elastisite modülü değişimine göre 80 kN dingil yükü altında izin verilen yük tekrar sayısının farklı kuruluşlara göre değişimi (%) (3. Model).

Şekil 4.67 ve 4.68’de binder tabakasının elastisite modülü arttıkça tekerlek izi oturması ve yorulma çatlama oluşumuna bağlı olarak yoldan geçmesine izin verilen dingil yükü sayılarındaki ortalama artış yüzdeleri görülmektedir. Bu grafiklere göre her bir bozulma türü için binder tabakası elastisite modülü değerinin artışı yoldan geçmesine izin verilen dingil yükü sayısını arttırmıştır.



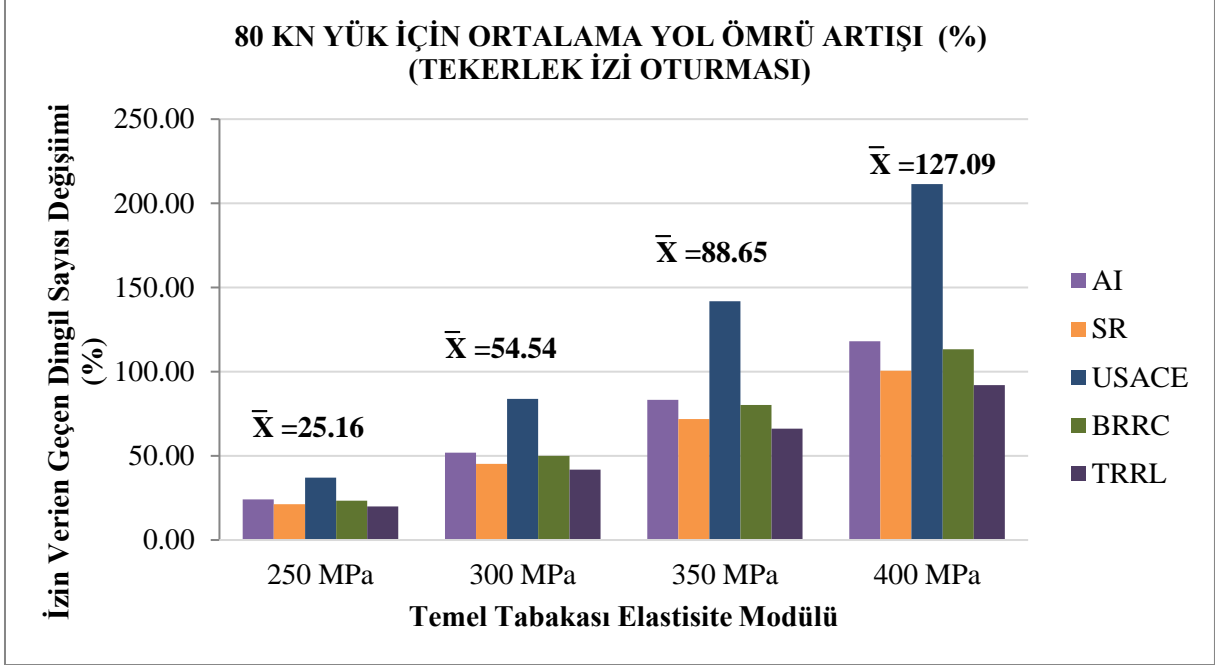
Şekil 4.69. Temel tabakasının elastisite modülü değişimine göre tekerlek izi oturması için izin verilen yük tekrar sayısı (3. Model).

Şekil 4.69’da görüldüğü üzere üçüncü modelin temel tabakası üzerinde yapılan analiz sonuçlarına göre, tekerlek izine bağlı yol ömrü değerleri temel tabakasının elastisite modülünün artırılmasıyla birlikte artış göstermiştir. %24-118 aralığında artışlar gözlenmiştir.

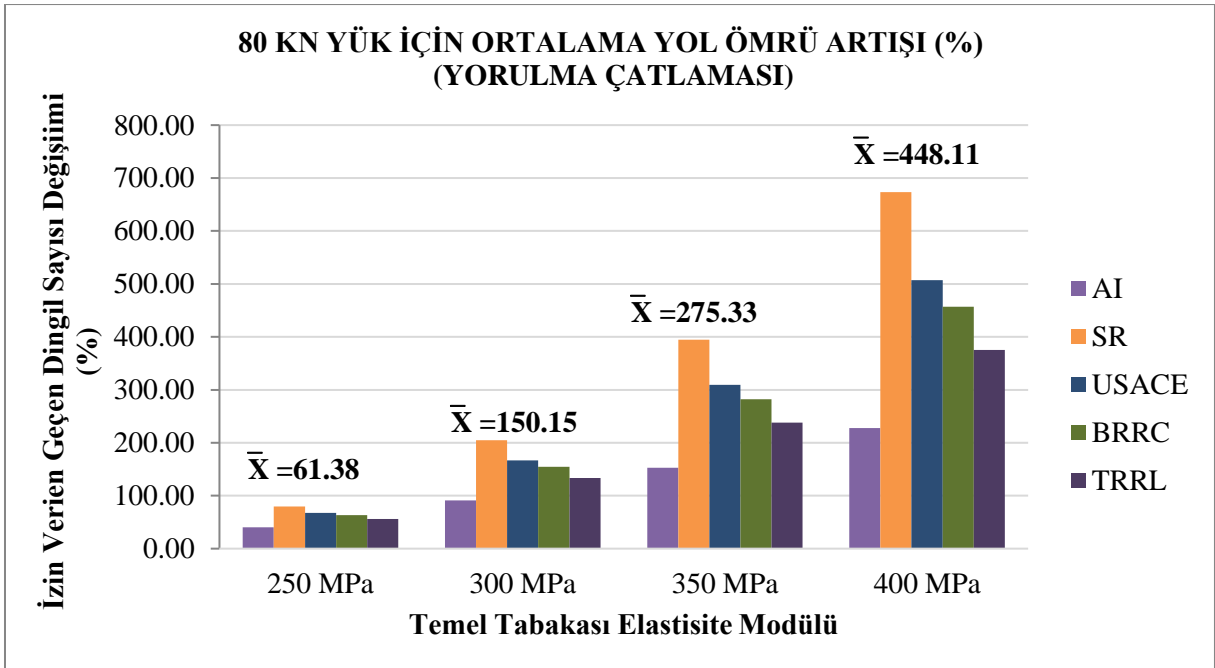


Şekil 4.70. Temel tabakasının elastisite modülü değişimine göre yorulma çatlama oluşumu için izin verilen yük tekrar sayısı (3. Model).

Şekil 4.70’de görüldüğü üzere yorulma çatlamaına bağlı yol ömrü değerleri de temel tabakasının elastisite modülünün artırılmasıyla birlikte artış göstermiştir. %40-228 aralığında artışlar gözlenmiştir.

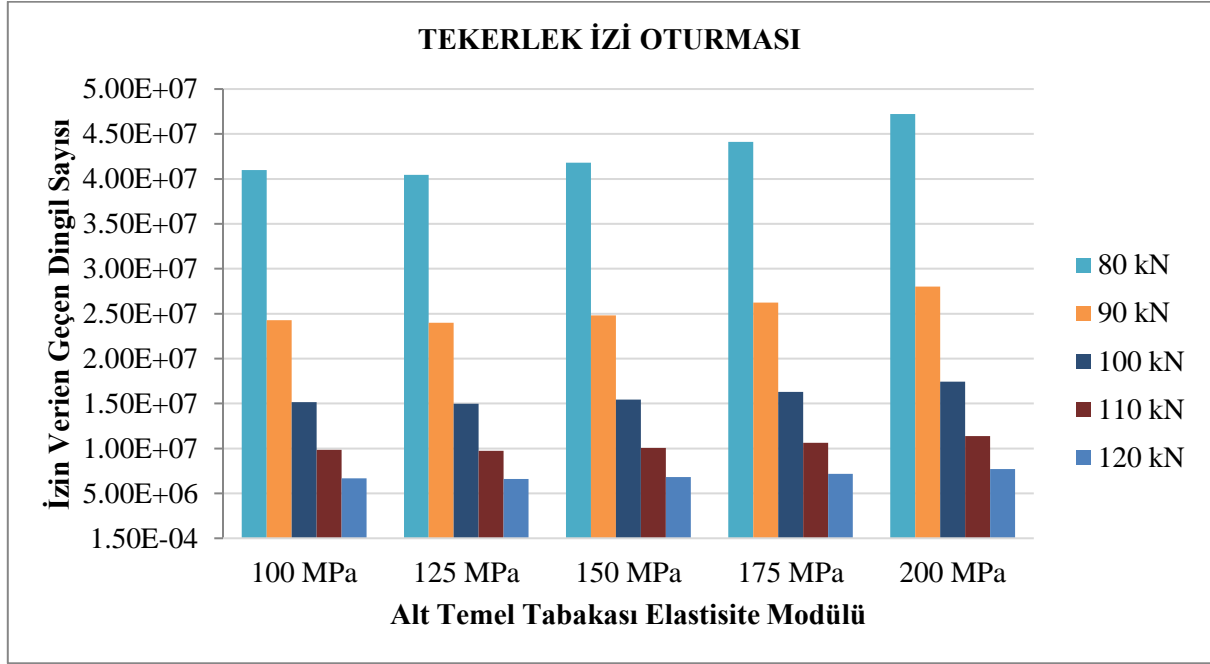


Şekil 4.71. Temel tabakasının elastisite modülü değişimine göre 80 kN dingil yükü altında izin verilen yük tekrar sayısının farklı kuruluşlara göre değişimi (%) (3. Model).



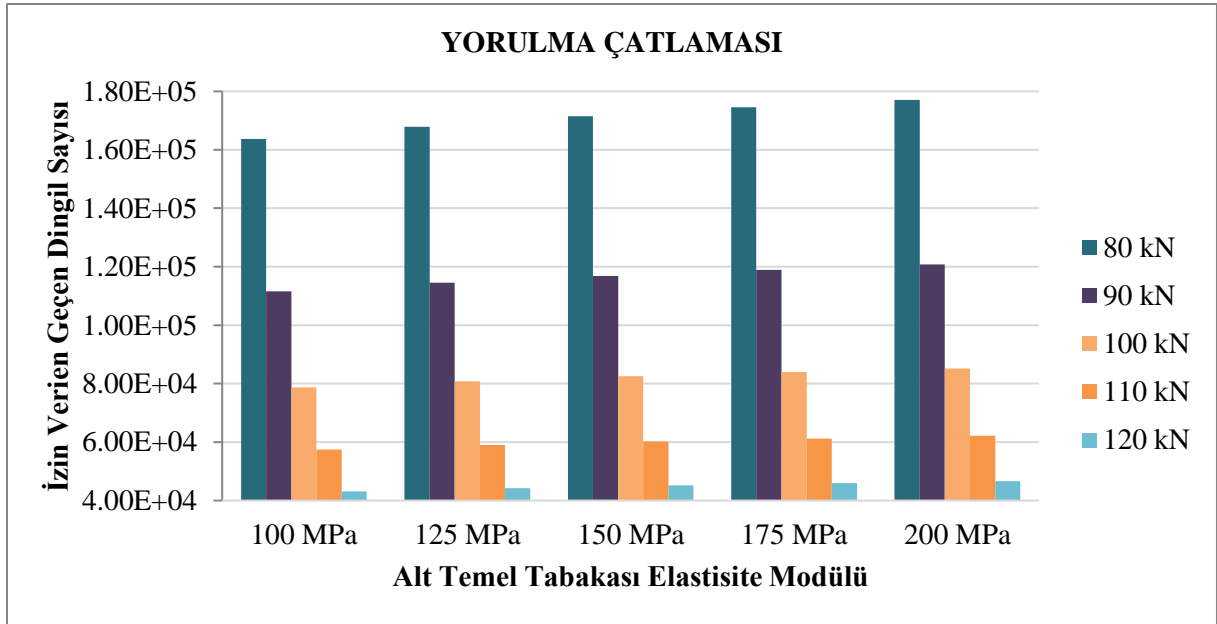
Şekil 4.72. Temel tabakasının elastisite modülü değişimine göre 80 kN dingil yükü altında izin verilen yük tekrar sayısının farklı kuruluşlara göre değişimi (%) (3. Model).

Őekil 4.71 ve 4.72’de temel tabakasının elastisite modülü arttıkça tekerlek izi oturması ve yorulma çatlaması oluŐumuna bağlı olarak yoldan gećmesine izin verilen dingil yuku sayılarındaki ortalama artış yuzdeleri görülmektedir. Bu grafiklere göre her bir bozulma türü temel tabakası elastisite modülü değerinin artışı yoldan gećmesine izin verilen dingil yuku sayısını arttırmıŐtır.



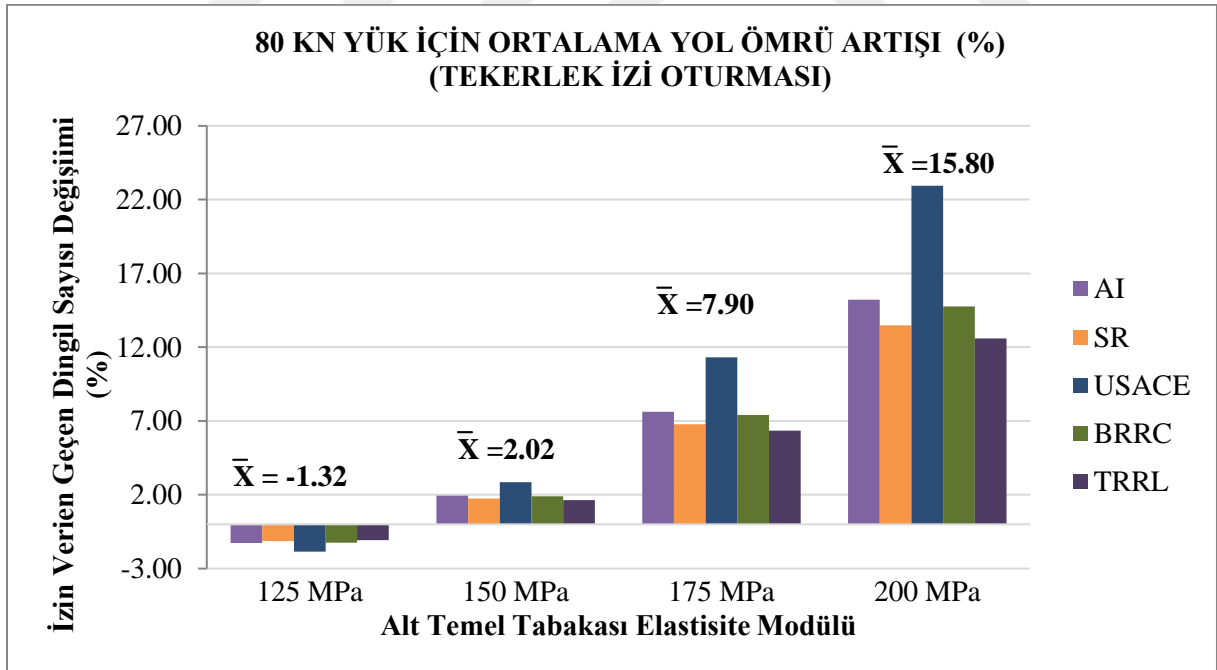
Şekil 4.73. Alt temel tabakasının elastisite modülü değişimine göre tekerlek izi oturması için izin verilen yuku tekrar sayısı (3. Model).

Şekil 4.73’de görüldüğü üzere üçüncü modelin alt temel tabakası üzerinde yapılan analiz sonuçlarına göre, tekerlek izine bağlı yol ömrü değerleri alt temel tabakasının elastisite modülünün artırılmasıyla birlikte artış göstermiştir. %2-15 aralığında artışlar gözlenmiştir. Elastisite modülünün 100 MPa’dan 125 MPa’a artırılmasıyla ise yol ömründe %1.28’lik bir azalma meydana gelmektedir.

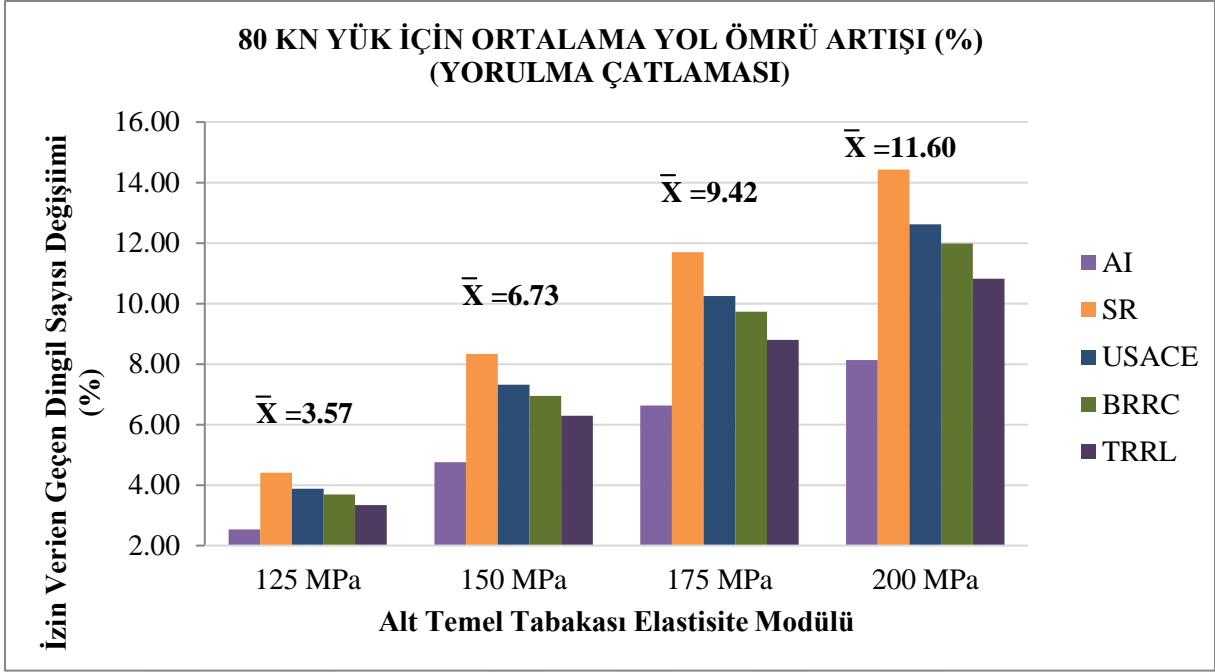


Şekil 4.74. Alt temel tabakasının elastisite modülü değişimine göre yorulma çatlama oluşumu için izin verilen yük tekrar sayısı (3. Model).

Şekil 4.74'e göre yorulma çatlama oluşumuyla ilgili yol ömrü değerleri de alt temel tabakasının elastisite modülünün artırılmasıyla birlikte artış göstermiştir. %2.5-8 aralığında artışlar gözlenmiştir.

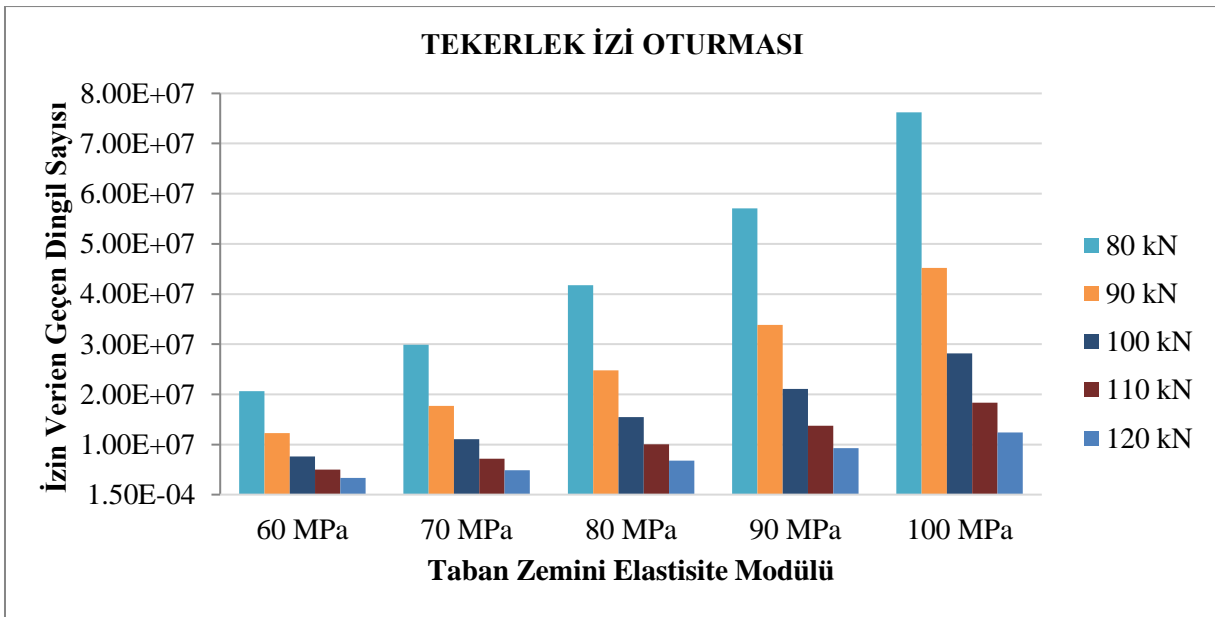


Şekil 4.75. Alt temel tabakasının elastisite modülü değişimine göre 80 kN dingil yükü altında izin verilen yük tekrar sayısının farklı kuruluşlara göre değişimi (%) (3. Model).



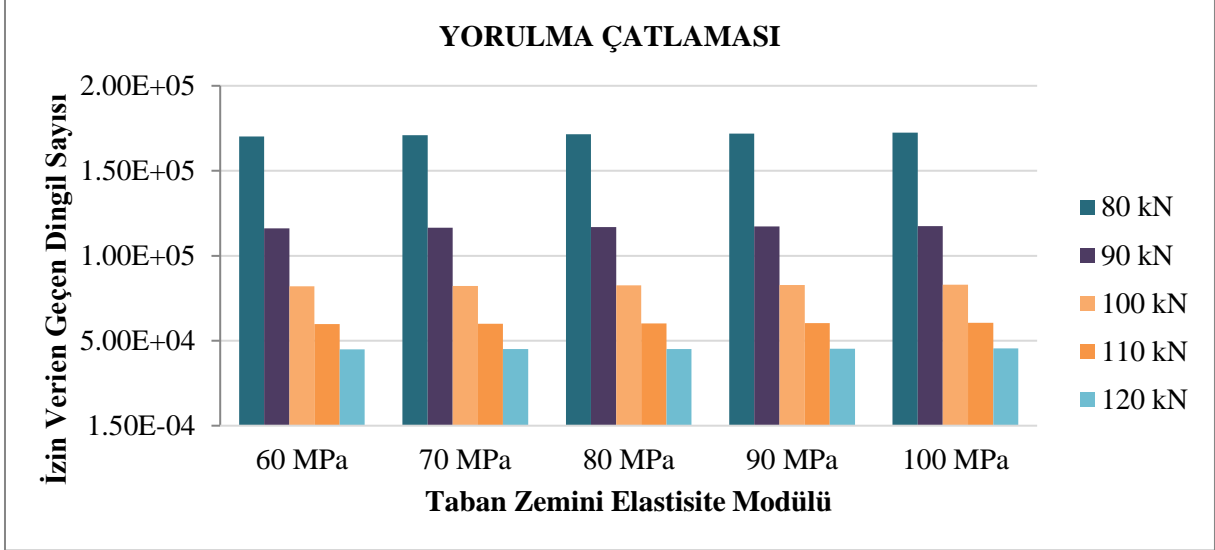
Şekil 4.76. Alt temel tabakasının elastisite modülü değişimine göre 80 kN dingil yükü altında izin verilen yük tekrar sayısının farklı kuruluşlara göre değişimi (%) (3. Model).

Şekil 4.75 ve 76'da alt temel tabakasının elastisite modülü arttıkça tekerlek izi oturması ve yorulma çatlama oluşumuna bağlı olarak yoldan geçmesine izin verilen dingil yükü sayılarındaki ortalama artış yüzdeleri görülmektedir. Bu grafiklere göre her bir bozulma türü için alt temel tabakası elastisite modülü değerinin artışı yoldan geçmesine izin verilen dingil yükü sayısını arttırmıştır.



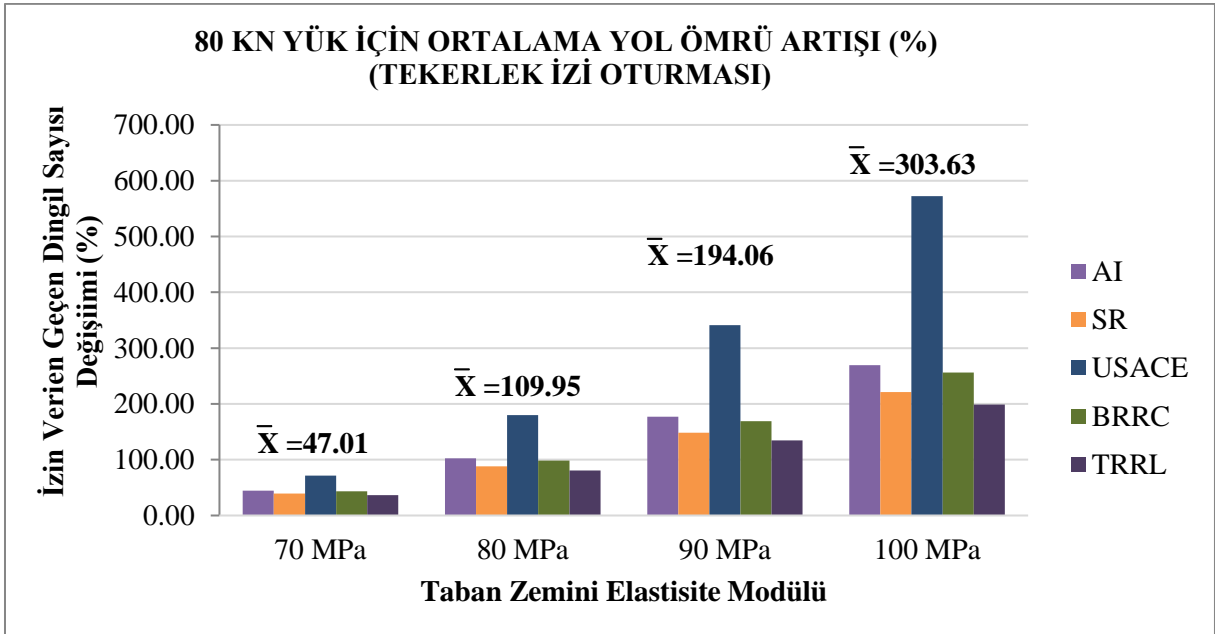
Şekil 4.77. Taban zemininin elastisite modülü değişimine göre tekerlek izi oturması için izin verilen yük tekrar sayısı (3. Model).

Şekil 4.77’de görüldüğü üzere üçüncü modelin taban zemini üzerinde yapılan analiz sonuçlarına göre, tekerlek izine bağlı yol ömrü değerleri taban zemininin elastisite modülünün artırılmasıyla birlikte artış göstermiştir. %45-270 aralığında artışlar gözlenmiştir.

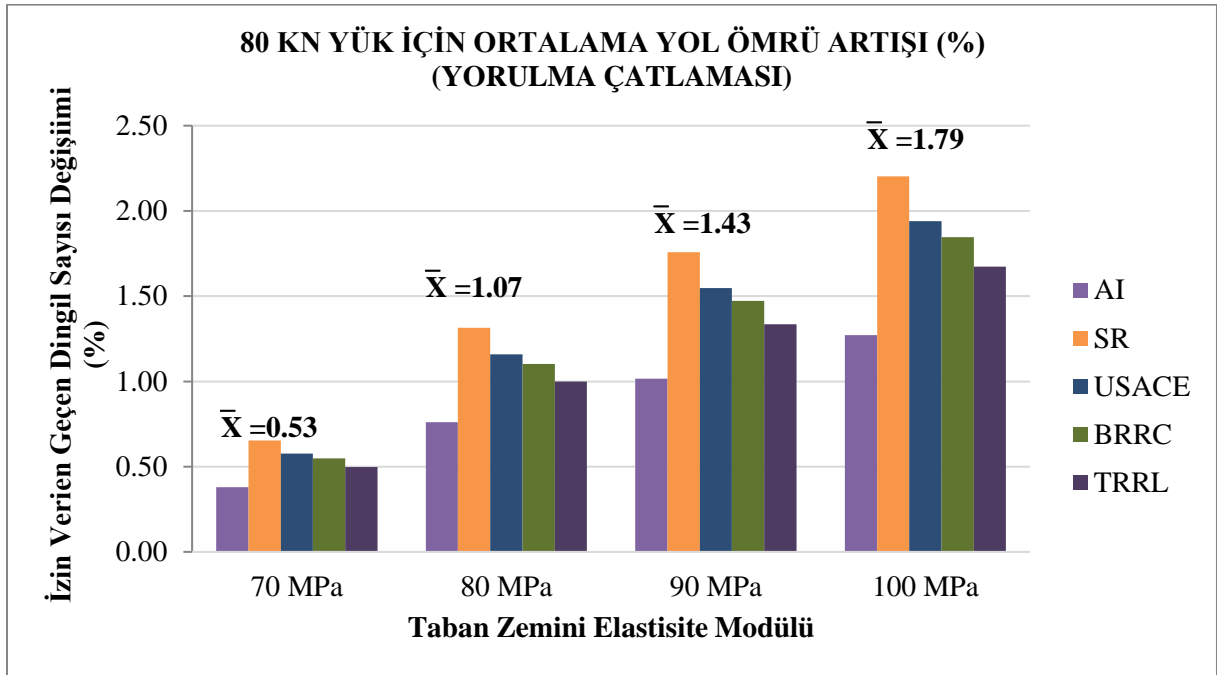


Şekil 4.78. Taban zemininin elastisite modülü değişimine göre yorulma çatlama oluşumu için izin verilen yük tekrar sayısı (3. Model).

Şekil 4.78’de görüldüğü üzere yorulma çatlama bağlı yol ömrü değerleri de taban zemininin elastisite modülünün artırılmasıyla birlikte artış göstermiştir. %0.38-1.27 aralığında artışlar gözlenmiştir.



Şekil 4.79. Taban zemininin elastisite modülü değişimine göre 80 kN dingil yükü altında izin verilen yük tekrar sayısının farklı kuruluşlara göre değişimi (%) (3. Model).



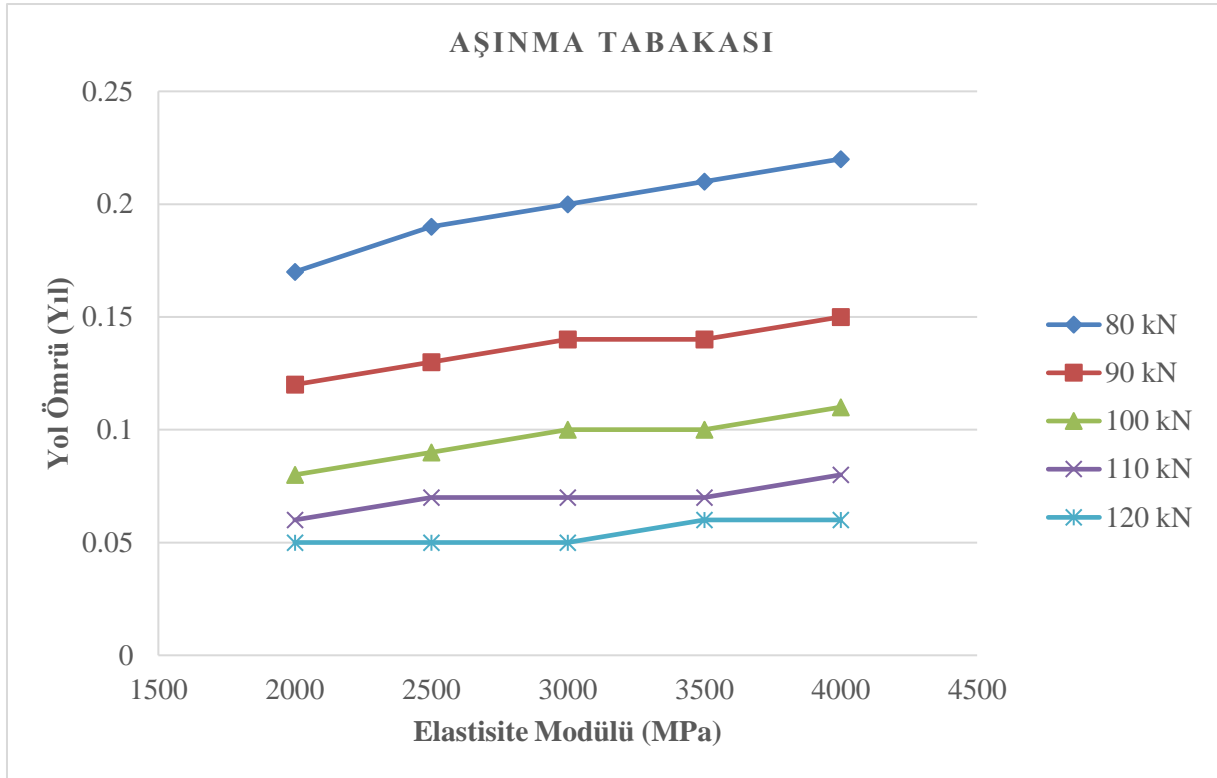
Şekil 4.80. Taban zemininin elastisite modülü değişimine göre 80 kN dingil yükü altında izin verilen yük tekrar sayısının farklı kuruluşlara göre değişimi (%) (3. Model).

Şekil 4.79 ve 4.80’de taban zemininin elastisite modülü arttıkça tekerlek izi oturması ve yorulma çatlama oluşumuna bağlı olarak yoldan geçmesine izin verilen dingil yükü sayılarındaki ortalama artış yüzdeleri görülmektedir. Bu grafiklere göre her bir bozulma türü için taban zemin elastisite modülü değerinin artışı yoldan geçmesine izin verilen dingil yükü sayısını arttırmıştır.

4.3.3. Yol Ömrü Hesabı

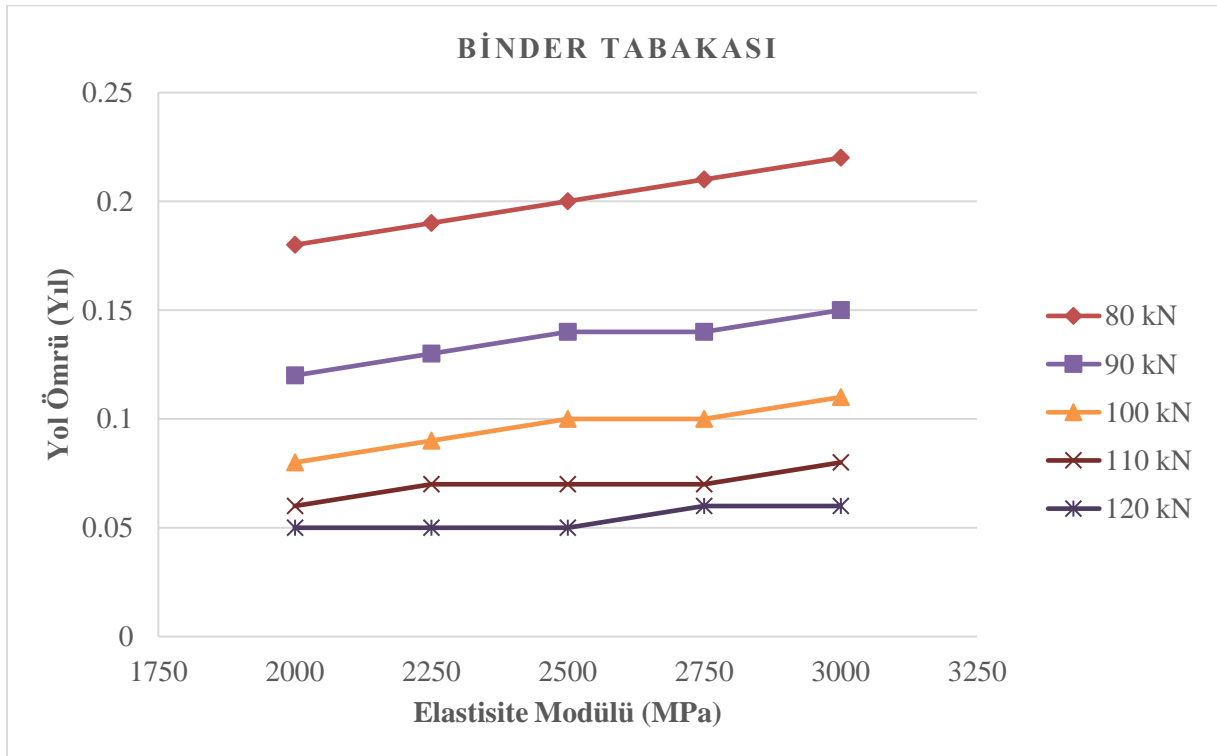
4.3.3.1. Yükleme ve Elastisite Modülü Değerlerinin Değiştirilmesi ile Hesap Yapılması

Üçüncü modelimizin aşınma tabakası, binder tabakası, temel tabakası, alt temel tabakası ve taban zemin elastisite modülü ve dingil yükü değerlerinin değiştirilmesiyle yapılan analizler sonucu aşağıdaki grafikler düzenlenmiştir.



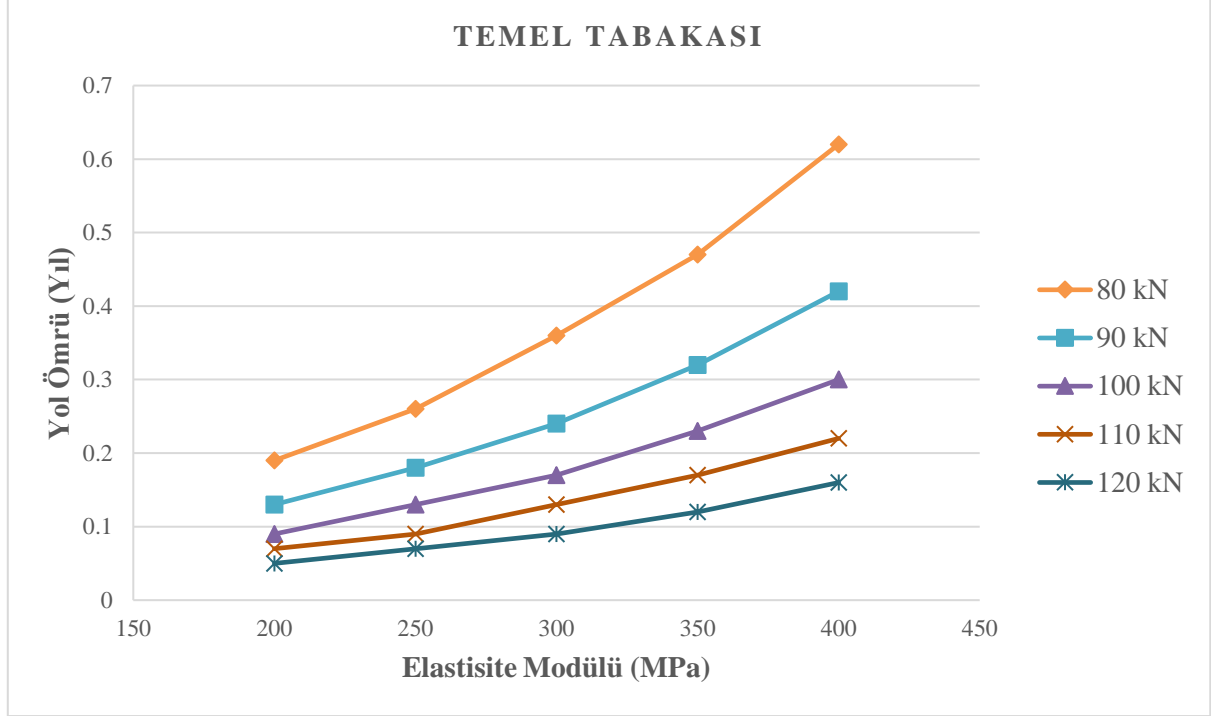
Şekil 4.81. Aşınma tabakasının elastisite modülü değişimine göre yol ömrünün değişimi (3. Model).

Grafikler incelendiğinde aşınma tabakasının elastisite modülünün artırılmasıyla, yol ömrü verilen dingil yükleri altında %11-38 aralığında artış göstermiştir.



Şekil 4.82. BİNDER tabakasının elastisite modülü değişimine göre yol ömrünün değişimi (3. Model).

Şekil 4.82'ye göre binder tabakasının elastisite modülünün artırılmasıyla, yol ömrü verilen dingil yükleri altında %5-38 aralığında artış göstermiştir.



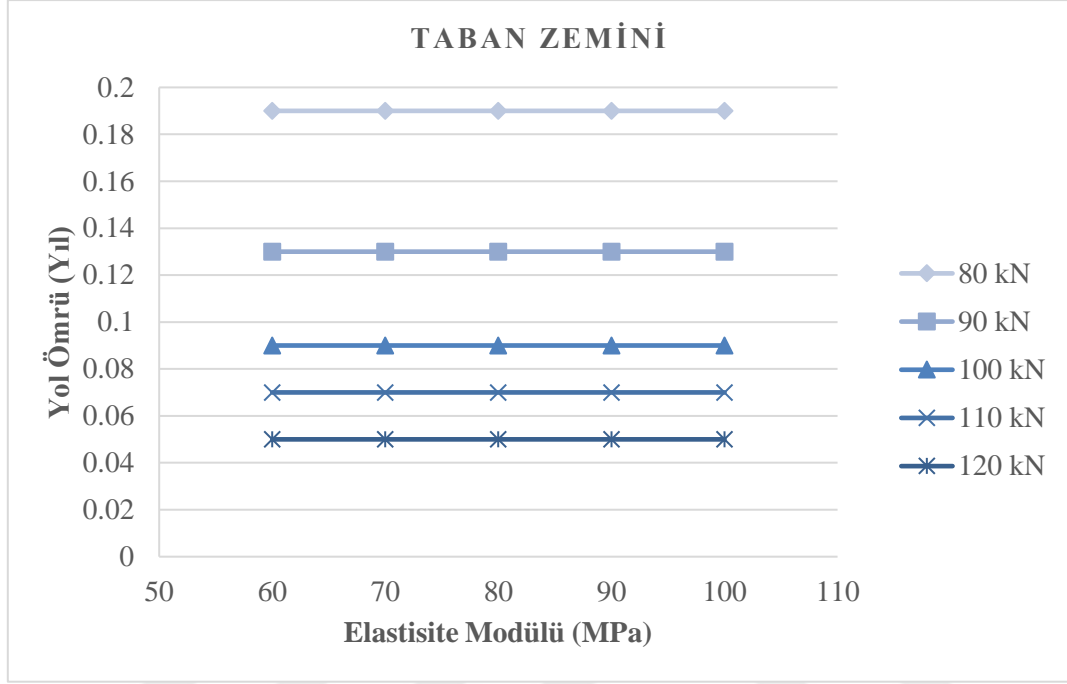
Şekil 4.83. Temel tabakasının elastisite modülü değişimine göre yol ömrünün değişimi (3. Model).

Şekil 4.83'e göre temel tabakasının elastisite modülünün artırılmasıyla yol ömrü verilen dingil yükleri altında %40-240 aralığında artış göstermiştir.



Şekil 4.84. Alt temel tabakasının elastisite modülü değişimine göre yol ömrünün değişimi (3. Model).

Şekil 4.84'e göre alt temel tabakasının elastisite modülünün artırılmasıyla yol ömründe %5-17 aralığında artışlar görülmüştür. 100kN ve 120 kN dingil yükü altında ise elastisite modülü değişimi yol ömrüne etki etmemiştir.



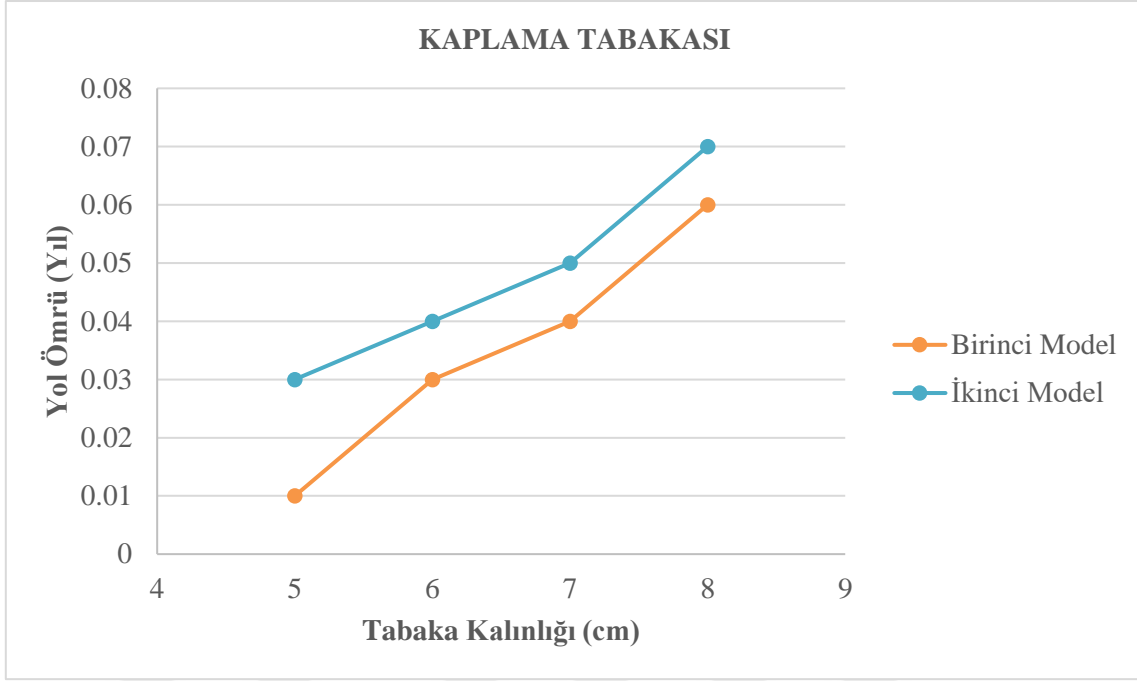
Şekil 4.85. Taban zemininin elastisite modülü değişimine göre yol ömrünün değişimi (3. Model).

Şekil 4.85'e göre aşınma tabakası, binder tabakası, temel tabakası, alt temel tabakası ve taban zeminini içeren üçüncü modelde taban zemininin elastisite modülünün artırılmasının yol ömrüne hiçbir etkisi olmadığı görülmektedir.

Tabakalar ve taban zemininin analiz sonuçlarını genel olarak değerlendirildiğinde elastisite modülü artışının etkisi en çok temel tabakasında görülmektedir.

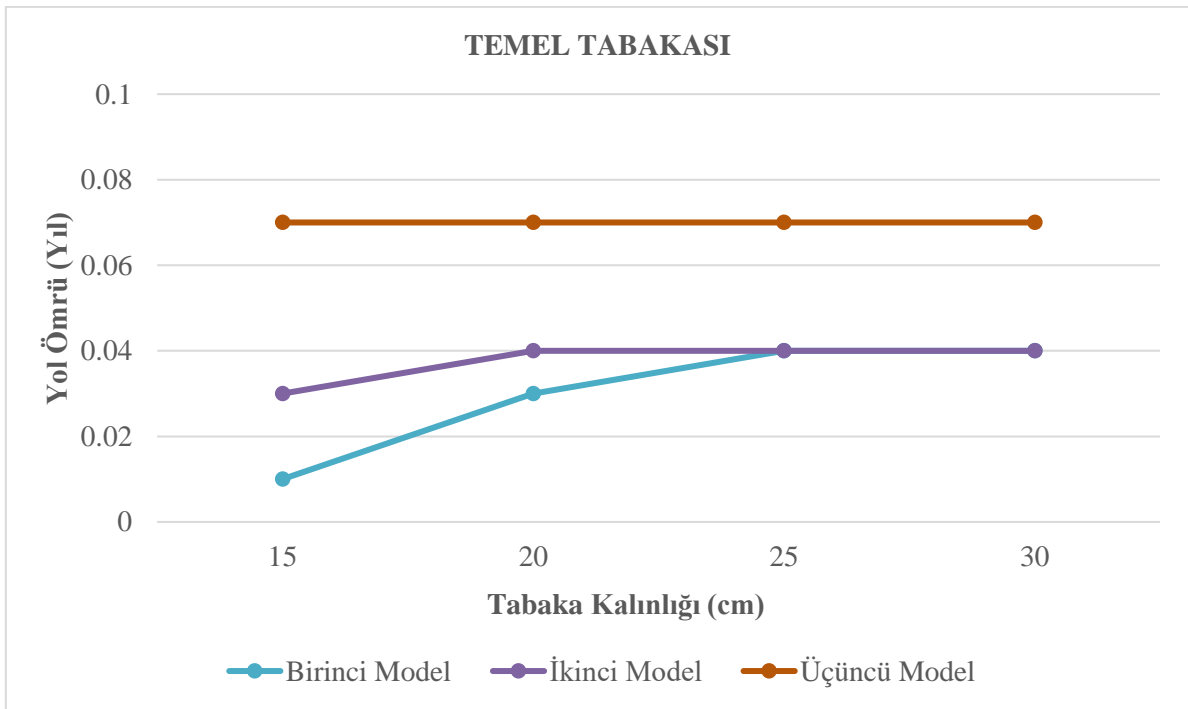
4.4. Tabaka Kalınlıklarının Değiştirilmesi ile Hesap Yapılması

Tabaka kalınlıklarının artırılması ile analiz yapılmasında dingil yükü 90 kN'da sabitlenmiştir. Kaplama tabakası için 5-6-7-8 cm alınan tabaka kalınlıkları, temel tabakası ve alt temel tabakası için 15-20-25-30 cm alınmıştır.



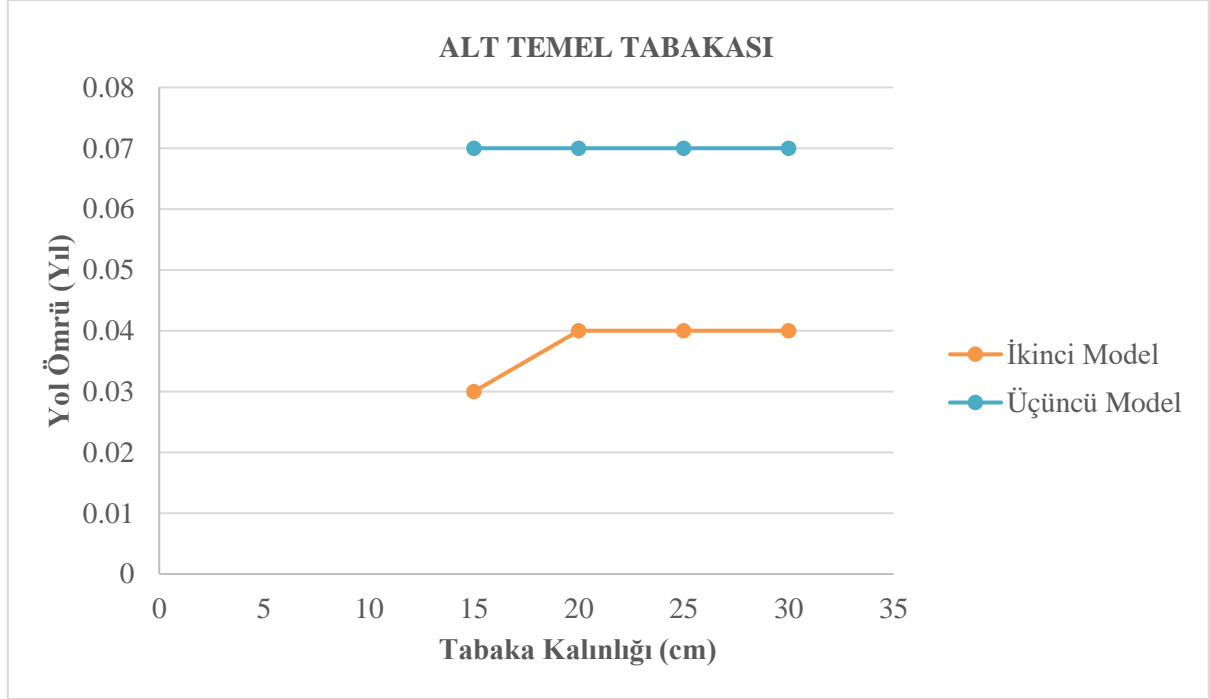
Şekil 4.86. Kaplama tabakası kalınlıklarının değişimine göre yol ömrünün değişimi.

Şekil 4.86'da görüldüğü üzere kalınlıkları artırılan kaplama tabakasındaki değişimler modeller arası karşılaştırılarak grafikte gösterilmiştir. Birinci modeldeki tabaka kalınlığının artışı yol ömrüne %200-500 aralığında bir artış sağlamıştır. İkinci modelde %33-133 aralığında artış görülmüştür.



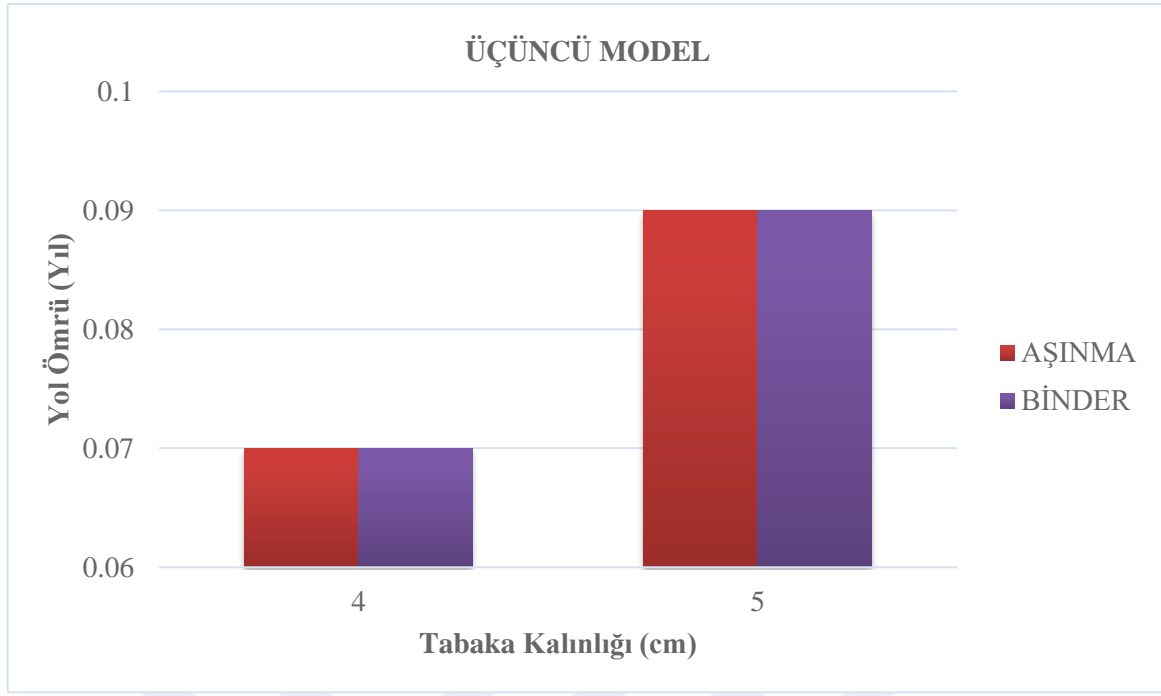
Şekil 4.87. Temel tabakası kalınlıklarının değişimine göre yol ömrünün değişimi.

Şekil 4.87’de görüldüğü üzere kalınlıkları artırılan temel tabakasındaki değişimler modeller arası karşılaştırılarak grafikte gösterilmiştir. Birinci modeldeki tabaka kalınlığının artışı yol ömrüne %200-300 aralığında bir artış sağlamıştır. İkinci modelde %33 oranında artış görülmüştür. Üçüncü modelde ise tabaka kalınlığının artışı yol ömrüne etki etmemiştir.



Şekil 4.88. Alt temel tabakası kalınlıklarının değişimine göre yol ömrünün değişimi.

Şekil 4.88’de görüldüğü üzere kalınlıkları artırılan alt temel tabakasındaki değişimler modeller arası karşılaştırılarak grafikte gösterilmiştir. İkinci modeldeki tabaka kalınlığının artışı yol ömrüne %33 artış sağlarken, üçüncü modeldeki tabaka kalınlığının artışı yol ömrüne etki etmemiştir.



Şekil 4.89. Tabaka kalınlıklarının değişimine göre yol ömrünün değişimi.

Şekil 4.89’da görüldüğü üzere üçüncü modelin aşınma ve binder tabakasının tabaka kalınlıklarının artırılmasıyla yol ömrü %29 artmıştır.

6. SONUÇLAR

Üç farklı esnek üstyapı kesiti için elastisite modülleri, dingil yükleri ve tabaka kalınlıkları değiştirilerek KENPAVE programı ile yapılan analizler sonucunda elde edilen veriler incelenerek sonuçlar sıralanmıştır.

❖ Kaplama tabakası, temel tabakası ve taban zemininden oluşan üstyapı kesiti için analiz sonuçları aşağıdaki gibidir:

• Elastisite modülü değişikliklerine bağlı olarak basınç ve çekme şekil değiştirmelerine bakıldığında, elastisite modülünün artışıyla basınç ve çekme şekil değiştirmelerinde azalma olmuştur.

➤ Kaplama ve temel tabakasının basınç şekil değiştirmesindeki azalma %5-18 aralığındayken, çekme şekil değiştirmesindeki azalma %9-31 aralığındadır.

➤ Taban zemininin basınç ve çekme şekil değiştirmesindeki azalma %0.7-2.3 aralığındadır. Elastisite modülü artışları daha çok çekme şekil değiştirmesine olumlu etki etmiştir. Taban zeminindeki elastisite modülü artışlarının etkisi yok sayılacak kadar küçüktür.

➤ Kaplama tabakası, temel tabakası ve taban zemininden oluşan üstyapı kesitindeki dingil yükü artışları ise tabakalar ve taban zemini için basınç ve çekme şekil değiştirmelerinde %25-50 aralığında artışlara sebep olmuştur.

• Yol ömrünü tekerlek izi ve yorulma çatlamaına bağlı izin verilen yük tekrar sayısı cinsinden hesapladığımız grafikler incelendiğinde elastisite modülünün artışıyla yol ömründe artışlar gözlenmiştir.

➤ Kaplama tabakasının elastisite modülünün artışıyla;

-Tekerlek izine bağlı yol ömründe %30-140 aralığında,

-Yorulma çatlamaına bağlı yol ömründe %19-89 aralığında artışlar meydana gelmiştir.

Karşılaştırıldığında tekerlek izine bağlı yol ömrünün, yorulma çatlamaına bağlı yol ömründen daha çok artış gösterdiğini görmekteyiz.

➤ Temel tabakasının elastisite modülü artışıyla;

-Tekerlek izine bağlı yol ömründe %26-152 aralığında,

-Yorulma çatlamaına bağlı yol ömründe %40-225 aralığında artışlar meydana gelmiştir.

Yorulma çatlamaına bağlı yapılan hesaplar tekerlek izine göre yapılan hesaplardan daha büyük oranlarda artış göstermiştir.

➤ Taban zemininin elastisite modülü artışıyla;

-Tekerlek izine bağlı yol ömründe %40-227 aralığında,

-Yorulma çatlamaına bağlı yol ömründe %2-8 aralığında artışlar meydana gelmiştir.

Tekerlek izine bağlı yapılan hesaplar yorulma çatlamaına göre yapılan hesaplardan çok daha büyük oranlarda artış göstermiştir.

- Kaplama tabakası, temel tabakası ve taban zemininin dingil yükü artışları ise tekerlek izine göre yapılan hesaplarda yol ömrünün %40-84, yorulma çatlama göre yapılan hesaplarda %32-74 aralığında azalmasına neden olmuştur.
- Yol ömrünü yıl cinsinden hesapladığımız grafikler incelendiğinde elastisite modülünün artışıyla yol ömründe artışlar gözlenmiştir.
 - Kaplama tabakasının elastisite modülünün artışıyla;
 - Yol ömrü %20-100 aralığında artış göstermiştir.
 - Temel tabakasının elastisite modülü artışıyla;
 - Yol ömrü %33-250 aralığında artış göstermiştir.
 - Taban zemininin elastisite modülü artışıyla;
 - Yol ömründe %5-17 aralığında artış göstermiştir.

Tabakalar ve taban zemininin analiz sonuçları genel olarak değerlendirildiğinde elastisite modülü artışının etkisi en çok temel tabakasında görülmektedir.

- Tabakalar ve taban zemininin dingil yükünün artırılmasıyla, yıl cinsinden yol ömründe %30-74 aralığında azalmalar görülmektedir.
- ❖ Kaplama tabakası, temel tabakası, alt temel tabakası ve taban zemininden oluşan üstyapı kesiti için analiz sonuçları aşağıdaki gibidir:
 - Elastisite modülü değişikliklerine bağlı olarak basınç ve çekme şekil değiştirmelerine bakıldığında, elastisite modülünün artışıyla basınç ve çekme şekil değiştirmelerinde azalma olmuştur.
 - Kaplama tabakasının basınç şekil değiştirmesindeki azalma %3.5-11 aralığındayken, çekme şekil değiştirmesindeki azalma %10-31 aralığındadır.
 - Temel tabakasının basınç şekil değiştirmesindeki azalma %4.5-16 aralığındayken, çekme şekil değiştirmesindeki azalma %10-30 aralığındadır.
 - Alt temel tabakasının basınç şekil değiştirmesindeki azalma %0.4-3 aralığındayken, çekme şekil değiştirmesindeki azalma %0.7-2.5 aralığındadır. Elastisite modülünün 100 MPa'dan 125 MPa'a çıkarılmasıyla basınç şekil değiştirmelerinin %2.5 oranında arttığı görülmektedir. Bu durumla yalnızca alt temel tabakasında yapılan işlemlerde karşılaşmıştır.
 - Taban zemininin basınç şekil değiştirmesindeki azalma %8-25 aralığındayken, çekme şekil değiştirmesindeki azalma %10-44 aralığındadır.

Elastisite modülü değişimleri daha çok çekme şekil değiştirmesine olumlu etki etmiştir. Alt temel tabakasındaki değişimlerin etkisiye yok sayılacak kadar küçüktür.
 - Kaplama tabakası, temel tabakası, alt temel tabakası ve taban zemininden oluşan üstyapı kesitindeki dingil yükü artışları ise tabakalar ve taban zemini için basınç ve çekme şekil değiştirmelerinde %25-50 aralığında artışlara sebep olmuştur.

- Yol ömrünü tekerlek izi ve yorulma çatlmasına bağlı izin verilen yük tekrar sayısı cinsinden hesapladığımız grafikler incelendiğinde elastisite modülünün artışıyla yol ömründe artışlar gözlenmiştir.

➤ Kaplama tabakasının elastisite modülünün artışıyla;

-Tekerlek izine bağlı yol ömründe %17-73 aralığında,

-Yorulma çatlmasına bağlı yol ömründe %20-93 aralığında artışlar meydana gelmiştir.

Karşılaştırıldığında yorulma çatlmasına bağlı yol ömrünün, tekerlek izine bağlı yol ömründen daha çok artış gösterdiğini görmekteyiz.

➤ Temel tabakasının elastisite modülü artışıyla;

-Tekerlek izine bağlı yol ömründe %24-117 aralığında,

-Yorulma çatlmasına bağlı yol ömründe %39-217 aralığında artışlar meydana gelmiştir.

Yorulma çatlmasına bağlı yapılan hesaplar tekerlek izine göre yapılan hesaplardan daha büyük oranlarda artış göstermiştir.

➤ Alt temel tabakasının elastisite modülü artışıyla;

-Tekerlek izine bağlı yol ömründe %2-15 aralığında artış meydana gelirken, elastisite modülünün 100 MPa'dan 125 MPa'a artırılmasıyla yol ömründe %1.28'lik bir azalma görülmektedir.

-Yorulma çatlmasına bağlı yol ömründe %2.6-8.3 aralığında artışlar meydana gelmiştir.

Yorulma çatlmasına bağlı yapılan hesaplar tekerlek izine göre yapılan hesaplardan daha büyük oranlarda artış göstermiştir.

➤ Taban zemininin elastisite modülü artışıyla;

-Tekerlek izine bağlı yol ömründe %45-270 aralığında,

-Yorulma çatlmasına bağlı yol ömründe %0.4-1.47 aralığında artışlar meydana gelmiştir.

Tekerlek izine bağlı yapılan hesaplar yorulma çatlmasına göre yapılan hesaplardan çok daha büyük oranlarda artış göstermiştir.

- Kaplama tabakası, temel tabakası, alt temel tabakası ve taban zemininin dingil yükü artışları ise tekerlek izine göre yapılan hesaplarda yol ömrünün %40-84 aralığında, yorulma çatlmasına göre yapılan hesaplarda %32-74 aralığında azalmasına neden olmuştur.

- Yol ömrünü yıl cinsinden hesapladığımız grafikler incelendiğinde elastisite modülünün artışıyla yol ömründe artışlar gözlenmiştir.

➤ Kaplama tabakasının elastisite modülünün artışıyla;

- Yol ömrü %20-100 aralığında artış göstermiştir.

➤ Temel tabakasının elastisite modülü artışıyla;

-Yol ömrü %35-240 aralığında artış göstermiştir.

➤ Alt temel tabakasının elastisite modülü artışıyla;

-Yol ömründe %7 ve %11 artış gösterirken, bazı dingil yükleri altında yol ömrü sabit kalmıştır.

➤ Taban zemininin elastisite modülü artışıyla;

- Yol ömründe %7 ve %11 artış gösterirken, bazı dingil yükleri altında yol ömrü sabit kalmıştır.

Tabakalar ve taban zemininin analiz sonuçları genel olarak değerlendirildiğinde elastisite modülü artışının etkisi en çok temel tabakasında görülmektedir.

- Tabakalar ve taban zemininin dingil yükünün artışıyla yıl cinsinden yol ömründe %30-76 aralığında azalmalar görülmektedir.
- ❖ Aşınma tabakası, binder tabakası, temel tabakası, alt temel tabakası ve taban zemininden oluşan üstyapı kesiti için analiz sonuçları aşağıdaki gibidir:
- Elastisite modülü değişikliklerine bağlı olarak basınç ve çekme şekil değiştirmelerine bakıldığında, elastisite modülünün artışıyla basınç ve çekme şekil değiştirmelerinde azalma olmuştur.
- Aşınma tabakasının basınç şekil değiştirmesindeki azalma %2.5-8 aralığındayken, çekme şekil değiştirmesindeki azalma %2-7 aralığındadır.
- Binder tabakasının basınç şekil değiştirmesindeki azalma %0.5-1.9 aralığındayken, çekme şekil değiştirmesindeki azalma %4.8-16 aralığındadır.
- Temel tabakasının basınç şekil değiştirmesindeki azalma %4.7-16 aralığındayken, çekme şekil değiştirmesindeki azalma %10-30 aralığındadır.
- Alt temel tabakasının basınç şekil değiştirmesindeki azalma %0.5-3 aralığındayken, çekme şekil değiştirmesindeki azalma %0.7-2.4 aralığındadır.
- Taban zemininin basınç şekil değiştirmesindeki azalma %8-25 aralığındayken, çekme şekil değiştirmesindeki azalma %9-31 aralığındadır.

Elastisite modülü değişimleri daha çok çekme şekil değiştirmesine olumlu etki etmiştir. Alt temel tabakasındaki değişimlerin etkisi yok sayılacak kadar küçüktür.

- Aşınma tabakası, binder tabakası, temel tabakası, alt temel tabakası ve taban zemininden oluşan üstyapı kesitindeki dingil yükü artışları ise tabakalar ve taban zemini için basınç ve çekme şekil değiştirmelerinde %25-50 aralığında artışlara sebep olmuştur.
- Yol ömrünü tekerlek izi ve yorulma çatlamasına bağlı izin verilen yük tekrar sayısı cinsinden hesapladığımız grafikler incelendiğinde, elastisite modülünün artışıyla yol ömründe artışlar gözlenmiştir.

- Aşınma tabakasının elastisite modülünün artışıyla;
 - Tekerlek izine bağlı yol ömründe %12-43 aralığında artış gözlenirken,
 - Yorulma çatlamasına bağlı yol ömründe %11-30 aralığında azalış meydana gelmiştir.
- Karşılaştırıldığında tekerlek izine bağlı yol ömrünün, yorulma çatlamasına bağlı yol ömründen

daha çok artış gösterdiğini görmekteyiz.

- Binder tabakasının elastisite modülünün artışıyla;
 - Tekerlek izine bağlı yol ömründe %2.4-8.8 aralığında,
 - Yorulma çatlamasına bağlı yol ömründe %17-80 aralığında artışlar meydana gelmiştir.

Karşılaştırıldığında yorulma çatlamaına bağlı yol ömrünün, tekerlek izine bağlı yol ömründen daha çok artış gösterdiğini görmekteyiz.

➤ Temel tabakasının elastisite modülü artışıyla;

-Tekerlek izine bağlı yol ömründe %24-118 aralığında,

-Yorulma çatlamaına bağlı yol ömründe %40-228 aralığında artışlar meydana gelmiştir.

Yorulma çatlamaına bağlı yapılan hesaplar tekerlek izine göre yapılan hesaplardan daha büyük oranlarda artış göstermiştir.

➤ Alt temel tabakasının elastisite modülü artışıyla;

-Tekerlek izine bağlı yol ömründe %2-15 aralığında artış meydana gelirken, elastisite modülünün 100 MPa'dan 125 MPa'a artırılmasıyla ise yol ömründe %1.28'lik bir azalma görülmektedir.

-Yorulma çatlamaına bağlı yol ömründe %2.5-8 aralığında artışlar meydana gelmiştir.

Tekerlek izine bağlı yapılan hesaplar, yorulma çatlamaına bağlı yapılan hesaplardan daha büyük oranlarda artış göstermiştir.

➤ Taban zemininin elastisite modülü artışıyla;

-Tekerlek izine bağlı yol ömründe %45-270 aralığında,

-Yorulma çatlamaına bağlı yol ömründe %0.38-1.27 aralığında artışlar meydana gelmiştir.

Tekerlek izine bağlı yapılan hesaplar yorulma çatlamaına göre yapılan hesaplardan çok daha büyük oranlarda artış göstermiştir.

- Aşınma tabakası, binder tabakası, temel tabakası, alt temel tabakası ve taban zemininin dingil yükü artışları ise tekerlek izine göre yapılan hesaplarda yol ömrünün %40-84 aralığında, yorulma çatlamaına göre yapılan hesaplarda %32-74 aralığında azalmasına neden olmuştur.

- Yol ömrünü yıl cinsinden hesapladığımız grafikler incelendiğinde elastisite modülünün artışıyla yol ömründe artışlar gözlenmiştir.

➤ Aşınma tabakasının elastisite modülünün artışıyla;

- Yol ömrü % 11-38 aralığında artış göstermiştir.

➤ Binder tabakasının elastisite modülünün artışıyla;

- Yol ömrü % 5-38 aralığında artış göstermiştir.

➤ Temel tabakasının elastisite modülü artışıyla;

-Yol ömrü % 40-240 aralığında artış göstermiştir.

➤ Alt temel tabakasının elastisite modülü artışıyla;

-Yol ömründe % 5-17 aralığında artış gösterirken, bazı dingil yükleri altında yol ömrü sabit kalmıştır.

➤ Taban zemininin elastisite modülü artışıyla;

- Yol ömrü sabit kalmıştır.

Tabakalar ve taban zemininin analiz sonuçlarını genel olarak değerlendirildiğinde elastisite modülü artışının etkisi en çok temel tabakasında görülmektedir.

- Tabakalar ve taban zemininin dingil yükünün artışıyla ise yıl cinsinden yol ömründe %28-75 aralığında azalmalar görülmektedir.
- ❖ 90 kN dingil yükü altında tabaka kalınlıklarının artırılmasıyla yapılan analizlerin sonuçları aşağıdaki gibidir:
 - Kaplama tabakalarının kalınlıklarının artışıyla;
 - Birinci modelde yol ömrüne %200-500 aralığında,
 - İkinci modelde %33-133 aralığında yol ömrü artışı sağlamıştır.
 - Temel tabakalarının kalınlıklarının artışıyla;
 - Birinci modelde %200-300 aralığında,
 - İkinci modelde %33 yol ömrü artışı sağlarken,
 - Üçüncü modelde yol ömrüne katkı sağlamamıştır.
 - Alt temel tabakalarının kalınlıklarının artışı;
 - İkinci modelde %33 yol ömrü artışı sağlarken,
 - Üçüncü modelde yol ömrüne katkı sağlamamıştır.
 - Aşınma ve binder tabakalarının kalınlıklarının artışıyla;
 - Üçüncü modelde %29 yol ömrü artışı sağlamıştır.

Genel değerlendirmeler:

- ✓ Tüm modellerdeki elastisite modülü artışları taban zeminlerinde benzer oranlarda yol ömrü artışına sebep olmuştur.
- ✓ Tabakalar arasında değişime en duyarlı olanı temel tabakasıdır.
- ✓ Tüm tabakalar için elastisite modülü artışları yol ömrü artışı sağlarken, alt temel bulunduran üstyapılarda artışla birlikte azalma da meydana gelmiştir.
- ✓ Dingil yükü artışları tüm üstyapı kesitleri için yakın oranlarda değişime sebep olmuştur.
- ✓ Tabaka kalınlığı artışına en duyarlı model birinci üstyapı modelidir.
- ✓ Elastisite modülü ile izafi mukavemet sayısı doğru orantılı olduğundan, yapılan yorumlar izafi mukavemet sayısı için de yapılabilir.
- ✓ Tabaka kalınlıklarının artırılması en çok birinci modelde katkı sağlamıştır.

KAYNAKLAR

Abut, Y., Çarakanat, F. ve Bozatalı, S. (2022). “Esnek üstyapılarda kalıcı deformasyon ve yorulmaya bağlı mekanistik bir modelleme ve duyarlılık analizi.” Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi, Cilt. 10, Sayı. 2, ss. 512-523.

Ağar, E., Süttaş İ., ve Öztaş G. (1998). Beton yollar. İTÜ Yayınları, İstanbul, Türkiye.

Ağar, E. (1999). Karayolu üstyapılarının tasarımı, Yüksek Lisans Ders Notları. (Basılmamış)

Asphalt Institute (1982). Research and development of the asphalt institute's thickness design manual, (Report No. 82-2), Kentucky, USA.

Ali, O. (2005). Evaluation of the Mechanistic Empirical Pavement Design Guide (NCHRP 1-37A), (Report No. UR 3002.1), National Research Council Canada, Canada.

American Association of State Highway and Transportation Officials (1993). AASHTO guide for design of pavement structures, Washington, USA.

Alexander, D. R. (1990). “In situ material characterization for pavement evaluation using surface wave techniques.” Third International Conference on Bearing Capacity of Roads and Airfields, Vol. 1-2, Trondheim, Norway, pp. 223-232.

Al-Ghafri, I. H., and Javid, M. (2018). “Comparative analysis of rigid pavement using Westergaard method and computer program.” Journal of Soft Computing in Civil Engineering, Vol. 2, No. 2, pp. 19-30.

Alzaim, M. (2019). Effect of modulus of bituminous layers and utilization of capping layer on weak pavement subgrades, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.

Arifi, U. (2021). The effect of vehicle velocity on viscoelastic response of flexible pavements, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.

Avcı, E. (2009). Sıcak iklimli bölgelerde kullanılan asfalt betonu karışım değişkenlerinin kaplama tabakası performansına etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, Türkiye.

Babu, B., Amarnath, M. S., and KS, S. K. (2013). "Analysis of HPCC pavements using KENPAVE fea software." *International Journal of Research in Engineering and Technology*, IC-RICE Conference Issue, pp. 248-251.

Bağdatlı, M., E., C. (2010). Esnek üstyapı kaplamalarındaki hasar özelliklerinin bakım maliyetleri üzerine etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Namık Kemal Üniversitesi, Tekirdağ, Türkiye.

Bakış, A. (2018). "Esnek ve rijit üstyapılarda kaplama kalınlığı ve üstyapı maliyetinin en küçük kareler yöntemiyle hesaplanması." *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, Cilt.10, Sayı. 2, ss. 110-118.

Baykara, S. (2022). Esnek ve rijit kaplama parametrelerinin üstyapı türü seçimi üzerine etkileri, Yüksek Lisans Tezi, İskenderun Teknik Üniversitesi, Hatay, Türkiye.

Behiry, A. E. A. E. M. (2012). "Fatigue and rutting lives in flexible pavement." *Ain Shams Engineering Journal*, Vol. 3 No. 4, pp. 367-374.

Berberoğlu, M. (2004). Shell ve AASHTO 93 yöntemlerindeki parametrelerin değişiminin sonuca etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.

Birinci, F., Kalyancıoğlu, Ş. F., Saltan, M. ve Tığdemir, M., (2003). Yol üstyapısı, Ders Notu, Samsun, Türkiye.

Bostancıoğlu, M. (2018). "Karayolu kaplamalarının sonlu elemanlar yöntemi ile analizinde gerilme-birim şekil değiştirme davranışına etki eden parametrelerin incelenmesi." *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, ss. 22-30.

Bostancıoğlu, M. (2020). "AASHTO-93 yönteminin mekanistik ampirik tasarım yöntemleri ile uyumunun belirlenmesi." *Türk Doğa ve Fen Dergisi*, Cilt. 9, Sayı. 2, ss. 64-75.

Bostancıoğlu, M. (2021A). "Mekanistik ampirik esnek üstyapı tasarım modellerinin tabaka kalınlık ve rijitlik oranlarına bağlı olarak karşılaştırılması." *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, Cilt. 11, Sayı. 1, ss. 91-102.

Bostancıoğlu, M. (2021B). "Granüler tabakaların fonksiyonel derecelendirilmesi ile esnek üstyapılarda yorulma ve tekerlek izinde oturma dayanımının artırılması." *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, Cilt. 26, Sayı. 2, ss. 557-572.

Brown, S. F., Pell P. S., And Stock A. F. (1977). "The application of simplified, fundamental design procedures for flexible pavement." 4th International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Vol.1, Michigan, USA, pp. 321-341.

Brown, S. F. (1980). "An introduction to the analytical design of bituminous pavements." Nottingham, England, p. 51.

Burmister Donald, M. (1943). "The theory of stresses and displacements in layered systems and application to the design of airport runways." Highway Research Board, Vol. 23, Illinois, USA, pp 126-148.

Burmister, D.M. (1945). "The general theory of stresses and displacements in layered soil systems." Journal of Applied Physics, Vol. 16, No. 2,3,5, pp.89-94.

Boussinesq, J. (1885). Application des potentiels à l'étude de l'équilibre et du mouvement des solides élastiques, principalement au calcul des déformations et des pressions que produisent, dans ces solides, des efforts quelconques exercés sur une petite partie de leur surface ou de leur intérieur; mémoire suivi de notes étendues sur divers points de physique, mathématique et d'analyse, Gauthier-Villars, Paris, Fransa.

Claussen, A. I. M., Edwards, J. M., Sommer, P., and Uge, P. (1977). "Asphalt pavement design-the shell method." In Volume I of proceedings of 4th International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements, Michigan, USA, pp. 39-74.

Carey, W. N. and Irick, P. (1962). The pavement serviceability-performance concept (Report No. 61E), Highway Research Board Special Report, pp.40-58.

Carvalho, R. L. (2006). Mechanistic-empirical design of flexible pavements: a sensitivity study. Master of Science, University of Maryland, Maryland, USA.

Chen, Y., (2009). Viscoelastic modeling of flexible pavement, Doctoral Dissertation, The Graduate Faculty of The University of Akron, Ohio, USA.

Dawid, R. and Piotr, J. (2018). "Analysis of pavement structure sensitivity to passage of oversized heavy duty vehicle in terms of bearing capacity." In IOP Conference Series, Materials Science and Engineering, IOP Publishing, Vol. 356, No. 1, pp. 012013.

Demir, M. C. (2001). Esnek yol üstyapılarında takviye tabakası tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.

Dündar, G. (1998). Esnek üstyapı tasarım yöntemlerinin karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.

Ekwulo, E. O. and Eme, D. B. (2009). "Fatigue and rutting strain analysis of flexible pavements designed using CBR methods." *African Journal of Environmental Science and Technology*, Vol. 3, No. 12, pp. 412-421.

Everett, S., R. (2015). Overweight vehicle permitting alternatives, Doctoral dissertation, Purdue University, West Lafayette, India.

Ghadimi, B., Nikraz, H., and Leek, C. (2014). "A comparison of different approaches in numerical modeling of pavement granular material." *Journal of Civil Engineering and Architecture*, Vol. 8, No. 4, pp. 446-455.

Ghanizadeh, A. R., and Ziaie, A. (2015). "NonPAS: a program for nonlinear analysis of flexible pavements." *International Journal of Integrated Engineering*, Vol. 7, No. 1, pp. 21-28.

Graczyk, M., Rafa, J., and Zofka, A. (2016). "The selected problems of multi-layer pavements–influence of composite impacts vehicles and climatic factors on the behavior of roads pavements." *Transportation Research Procedia*, Vol. 14, pp. 2487-2496.

Hadi, M. N., and Bodhinayake, B. C. (2003). "Non-linear finite element analysis of flexible pavements." *Advances in Engineering Software*, Vol. 34, No. 11-12, pp. 657-662.

Hafeez, I., Shan, A., Ali, A., and Ahmed, I. (2017). "Flexible pavement design evaluation using mechanistic-empirical approaches." *Technical Journal, University of Engineering and Technology*, Vol. 22, No. 2, pp. 27-33.

Haron, H. A. B., Arshad, A. K. B., and Rahman, Z. B. A. (2013). "Interaction between heavy vehicles' tyre inflation pressure and contact area on flexible pavement." *IEEE Symposium on Humanities, Science and Engineering Research, Selangor, MALAYSIA*, pp. 539-544.

Henderson, M. W. (2020). Effects of Subgrade-Compaction Moisture Content on Performance of Asphalt Roads in Minnesota. Minnesota.

Huang, Y. H. (2004). Pavement analysis and design, Pearson Prentice Hall, 2nd edition, Upper Saddle River, New Jersey, USA.

Inoue, T., & Matsui, K. (1990). "Structural analysis asphalt pavement by FWD and backcalculation of elastic layered model." Third International Conference on Bearing Capacity of Roads and Airfields, Norwegian Institute of Technology, Tapir Publishers, Trondheim, Norway, Vol. 1-2, pp. 425-434.

Jaritngam, S., Prachasaree, W., Somchainuek, O., Thongchim, P., Yandell, W. O., Taneerananon, P. "Analysis of stress, strain and deflection of pavements using finite element method." Journal of Society for Transportation and Traffic Studies, Vol. 1, No. 4, pp. 51-59.

Karavaşin, M., Dawson, A. R., and Holden, J. T. (1993). "Applicability of resilient constitutive models of granular material for unbound base layers." Transportation research record, No. 1406, pp. 98-107.

Karayolları Trafik Yönetmeliği. (1997). 20.12.2022 tarihinde erişildi.
<https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=8182&MevzuatTur=7&MevzuatTertip=5>

Khanal, S., Hein, D. K. and Olidis, C. (2016). "Modelling pavement response to superheavy load movement." Conference of the Transportation Association of Toronto, Toronto, Canada, Vol. 9, No. 11.

Kök, E. (2008). Karayolu ve havaalanı üstyapı tasarım yöntemleri, karşılaştırması ve Türkiye uygulamaları, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.

Kıyıldı, R., K. (2021). "Yapay sinir ağları ile Marshall stabilite değerinin tahmini." Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, Cilt. 10, Sayı. 2, ss. 627-633.

Lu, P., Bratlien, A., and Tolliver, D. (2014). "Understanding mechanistic-empirical pavement design guide (MEPDG) for North Dakota implementation." Upper Great Plains Transportation Institute North Dakota State University, Fargo, United States, p. 59.

Mashayekhi, M., Amini, A. A., Behbahani, H. and Nobakht, S., (2011). "Comparison of mechanistic-empirical and empirical flexible pavement design procedures of AASHTO: A case study." 5th International Conference Bituminous Mixtures and Pavements, Thessaloniki, Greece, pp. 319-328.

Mishra, A., and Patel, D. (2019). "Analysis of structural deformation in flexible pavement using KENLAYER programme." *International Research Journal of Engineering and Technology*, Vol. 6, No. 8, pp. 1168-1173.

Muniandy, R., Aburkaba, E. and Thamer, N., (2013). "Comparison of flexible pavement performance using KENLAYER and CHEV PC software program." *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, Vol. 7, No. 9, pp. 112-119.

Nidhi, M., and Nagakumar, M. S. (2013). "Applications of layered theory for the analysis of flexible pavements." *International Journal of Research in Engineering and Technology*, Vol. 2, No. 1, pp. 197-200.

Özcanan, S. ve Akpınar, M. V. (2014). "Esnek üstyapılarda kritik tekerlek ve aks konfigürasyonların mekanistik analizlere göre tespit edilmesi." *İMO Teknik Dergi*, Cilt. 25, Sayı. 121, ss. 6625-6654.

Özgan, E., Serin, S., Sargın, Ş., ve Arslan, İ. (2010). "Karayolu esnek üstyapısının projelendirilmesi; D655-01 karayolu örneği." *Ulusal Meslek Yüksekokulları Öğrenci Sempozyumu, Düzce, TÜRKİYE*.

Peterson, D. E. (1987). *Pavement management practices*, NCHRP Synthesis 135, Transportation Research Board, Washington, USA.

Porter, O. J. (1950). "Development of the original method for highway design." *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, Vol. 115, No. 1, pp. 461-467.

Priyanka, B. A., Lekha, B. M., Goutham, S., and Ravi Shankar, A. U. (2015). "KENPAVE analysis for low volume roads with reduced resilient modulus values." *2nd Conference on Transportation Systems Engineering and Management*, National Institute of Technology, Tiruchirappalli, India, pp. 140-147.

Rind, T. A., Memon, N. A., and Qureshi, A. S. (2017). "analysis and design of flexible pavement using empirical-mechanistic based software (KENPAVE)." In *International Conference on Sustainable Development in Civil Engineering*. Sindh, Pakistan, pp. 120-125.

Sahis, M. K., and Biswas, P. P. (2021). "Optimization of bituminous pavement thickness using mechanistic-empirical strain-based design approach." *Civil Engineering Journal*, Vol. 7 No. 5, pp. 804-815.

Sağlık A., ve Güngör, A. G. (2008). Esnek üstyapılar projelendirme rehberi, Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara, Türkiye.

Selvi, P. (2015). "Fatigue and rutting strain analysis on lime stabilized subgrades to develop a pavement design chart." *Transportation Geotechnics*, Vol. 2, pp. 86-98.

Schwartz, C. W., and Carvalho, R. L. (2007). Implementation of the NCHRP 1-37A design guide, Final Report, Volume 2: Evaluation of M-E Design Procedure, Maryland, USA.

Shook, J. F. (1982). "Thickness design of asphalt pavements-the Asphalt Institute method." 5th International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements, Vol. 1, pp. 17-44.

Strategic Highway Research Program (1993). Distress identification manual for the long-term pavement performance project, Transportation Research Board, Washington, USA.

Sulten, P. (2001). Kayma dirençli gürültü azaltıcı betonlar, Federal Otoyol Araştırma Enstitüsü, Almanya.

Terzi, S. (2004). Coğrafi bilgi sistemi yardımıyla karayolu üstyapı bakım yönetim modeli geliştirilmesi, Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, Türkiye.

Teja, T. V., Vineel, C., and ManiKumari, D. (2019). "Cost economics of geocell reinforced flexible pavements on soft soils by using kenpave software." *International Journal of Recent Technology and Engineering*, Vol. 8, No. 3, pp. 6186-6189.

Tanyıldızı, M. M. (2010). AASHTO Metodunda Rijit Üstyapı Beton Kaplama Kalınlığına Etki Eden Parametrelerin İrdelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye.

Tanyıldızı, M. M., ve Geçkil, T. (2019). "AASHTO metodunda rijit ve esnek üstyapıların projelendirilmesinde kullanılan parametrelerin incelenmesi." *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Cilt. 31, Sayı. 1, pp. 187-194.

Transportation Officials (1993). AASHTO guide for design of pavement structures, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, USA.

Tunç, A. (2007). Yol malzemeleri ve uygulamaları, 2. Baskı, Nobel Yayınevi, Ankara, Türkiye.

Türkiye İstatistik Enstitüsü, <https://data.tuik.gov.tr/Kategori/GetKategori?p=Ulastirma-ve-Haberlesme-112> [22.12.2022 tarihinde erişildi].

Tığdemir, M., (1999). Bitümlü malzemelerin mekanik özelliklerinin parametrik incelenmesi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Doktora Tezi, Isparta, Türkiye.

Umar, F., ve Ağar, E. (1991). Yol üstyapısı, Ders Notu, İstanbul Teknik Üniversitesi, 4.Baskı, İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul, Türkiye.

Vqyeux, K. (2001). “Renovation of two places at Dinant”. In 19th Belgian Road Congress, Belgium.

Whiteoak D., Lav A. H., Lav A. (2004), Shell bitüm el kitabı, Limited East Molesey Surrey, İstanbul, Türkiye.

Yamanlar, A. Ç. (2012). Farklı kaplama türlerinin yüzey doku özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, Türkiye.

Yağtu, İ. (2019). Rijit üstyapıların köy yollarında uygulanabilirliği: Eskipazar örneği, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Karabük, Türkiye.

Yılmazok, D., A. (2019). Proje lojistiği alanında faaliyet gösteren aşırı yüklü/aşırı büyük araçların karayolu üstyapısına etkisi ve kendinden tahrikli modüler taşıyıcı (SPMT) örneği, Yüksek Lisans Tezi, Konya Teknik Üniversitesi, Konya, Türkiye.

Yoder, E. J., and Witczak, M. W. (1975). Principles of pavement design, John Wiley & Sons, New York, USA.

Zhou, M., Rozvany, G. I., and Birker, T. (1992). “Generalized shape optimization without homogenization.” Structural Optimization Vol. 4, No. 3, pp. 250-252.