



**İSKENDERUN TEKNİK**  
ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**YÜKSEK  
LİSANS  
TEZİ**

**ESNEK VE RİJİT  
KAPLAMA PARAMETRELERİNİN  
ÜSTYAPI TÜRÜ SEÇİMİ  
ÜZERİNE ETKİLERİ**

**Sabır BAYKARA**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ  
ANABİLİM DALI**

**ŞUBAT 2022**



**ESNEK VE RİJİT KAPLAMA PARAMETRELERİNİN ÜSTYAPI TÜRÜ  
SEÇİMİ ÜZERİNE ETKİLERİ**

**Sabır BAYKARA**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**ŞUBAT 2022**

ESNEK VE RİJİT KAPLAMA PARAMETRELERİNİN ÜSTYAPI TÜRÜ SEÇİMİ  
ÜZERİNE ETKİLERİ  
(Yüksek Lisans Tezi)

Sabır BAYKARA

İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

Şubat 2022

ÖZET

Esnek kaplama veya rijit kaplama türlerinin seçiminde temel sorun maliyet olmaktadır. Türkiye'deki farklı durumlar için hangi üstyapının ideal olacağını tespit etmek için, ekonomik ve teknik özellikleri değerlendirmek, araştırmak ve karşılaştırmak gerekmektedir. Bu çalışmada üstyapı türleri karşılaştırılmaktadır. Esnek kaplama olarak Bitümlü sıcak karışım (BSK) ve Sathi kaplama, rijit kaplama olarak beton üstyapı kaplama kalınlıkları ve maliyetleri incelenmektedir. Kaplama kalınlığı ve maliyet karşılaştırması için esneklik modülü ( $M_R$ ), yatak katsayısı ( $k$ ) ve 8.2 ton standart dingil yükü tekerrür sayısı ( $T_{8.2}$ ) parametreleri kullanılmaktadır. Esnek kaplama için  $M_R$ , rijit kaplama için  $k$  parametresi ve  $T_{8.2}$  ise her iki kaplama türü için kullanılmaktadır. Verilen parametrelere göre esnek kaplama türlerinde  $M_R$  değeri arttıkça kaplama kalınlığı azalmaktadır. Rijit kaplamada  $k$  değeri arttıkça gözle görülür bir değişim olmamaktadır. Maliyet kıyaslaması yapıldığında esnek kaplamalarda  $M_R$  değeri arttıkça metrekare birim maliyet azalmaktadır. Rijit kaplamada  $k$  değeri arttıkça maliyet kıyaslamasında gözle görülür bir değişim olmamaktadır.  $T_{8.2}$  değeri arttıkça hem esnek kaplama hem de rijit kaplama için metrekare birim maliyet de aynı oranda artmaktadır. Hesaplanan maliyetlerde  $3 \times 10^6$   $T_{8.2}$  değerine kadar olan kaplamalarda en ekonomik kaplama türü sathi kaplama olarak belirlenmiştir.  $T_{8.2}$  değeri  $3 \times 10^6$  üzerine çıktığı durumda iyi zemin koşullarında ilk tercih olarak bitümlü sıcak karışım (BSK) veya rijit kaplama tercih edilebilir. Bu durumlara bağlı olarak düşük trafik akışının olduğu yollarda esnek kaplama türü olan sathi kaplamanın seçilmesi daha ekonomik olmaktadır. Trafik akışının yüksek olduğu yollarda rijit kaplamalar esnek kaplamalara göre daha ekonomik olmaktadır. Kaplama kalınlıklarının tahmin edilmesinde yapılan analizlerde ise Yapay Sinir Ağı (YSA) modeli ile Lineer Regresyon (LR) modeli karşılaştırılmıştır. Yapılan çalışmada lineer regresyon analizi için Hataların Kareleri Ortalaması (HKO), Ortalama Yüzde Hata (OYH) ve Korelasyon hesapları yapılmıştır. Çıkan sonuçlara göre esnek ve rijit kaplama kalınlıklarının tahmininde YSA analizi LR analiz modeline göre daha iyi sonuç vermiştir.

Anahtar : Üstyapı kaplamaları, kaplama maliyeti, kaplama kalınlığı,  
Kelimeler : esneklik modülü, yatak katsayısı, YSA, LR, korelasyon

Sayfa Sayısı : 79

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Mustafa ÇALIŞICI

THE EFFECTS OF FLEXIBLE AND RIGID PAVEMENT PARAMETERS ON THE  
SELECTION OF PAVEMENT TYPE

(M. Sc. Thesis)

Sabır BAYKARA

ISKENDERUN TECHNICAL UNIVERSITY  
INSTITUTE OF GRADUATE STUDIES

February 2022

ABSTRACT

The main problem in choosing asphalt pavement or rigid pavement types is cost. It is necessary to evaluate, research and compare which superstructure would be ideal for different situations in Turkey, as well as the economic and technical characteristics. In this study, pavement types are compared. Surface coating, flexible coating and rigid coating thicknesses and costs are examined. Modulus of elasticity ( $M_R$ ), bearing coefficient ( $k$ ) and 8.2 tons standard axle load repetition number ( $T_{8.2}$ ) parameters are used for coating thickness and cost comparison.  $M_R$  is used for flexible pavement,  $k$  parameter is used for rigid pavement and  $T_{8.2}$  is used for both pavement types. According to the values given, the coating thickness decreases as the  $M_R$  value increases in surface coating and flexible coating types. According to the values given, the coating thickness decreases as the  $M_R$  value increases in surface coating and flexible coating types. In rigid pavement, there is no visible change as the  $k$  value increases. When the cost comparison is made, the cost per square meter decreases as the  $M_R$  value increases. As the  $T_{8.2}$  value increases, the square meter unit cost also increases at the same rate. The most economical type of coating is surface coating for coatings up to  $3 \times 10^6 T_{8.2}$  in calculated costs. Bituminous hot mixture (BSK) can be chosen as the first choice in good ground conditions with a  $T_{8.2}$  value over  $3 \times 10^6$ . It is more economical to choose a flexible pavement type on the roads with low traffic flow. On roads with high traffic flow, rigid pavements are more economical than flexible pavements. In another study, Artificial Neural Network (ANN) model and the Linear Regression (LR) model were compared in the analyzes performed for the estimation of the pavement thicknesses. Mean Squares of Errors (MSE), Average Percent Error (APE) and Correlation calculations were made for linear regression analysis. According to the results, ANN analysis gave better results than LR analysis model in estimating flexible and rigid pavement thicknesses.

Key Words : Superstructure of pavements, pavement cost, pavement thickness, modulus of elasticity, bearing coefficient, ANN, LR, correlation

Page Number : 79

Supervisor : Assist. Prof. Dr. Mustafa ÇALIŞICI

## TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans tez konusunun belirlenmesinde, araştırılması ve yazımı sırasında sahip olduğu bilgi birikimi ve tecrübesi ile çalışmayı yönlendiren ve her türlü yardımı esirgemeyen saygıdeğer danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Mustafa ÇALIŞICI' ya ve çalışmaya yaptığı katkılarında dolaylı Ar. Gör. Bestami TAŐAR'a, her zaman yanımda olan ve her türlü desteği esirgemeyen aileme sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunarım.



**İÇİNDEKİLER**

	<b>Sayfa</b>
ÖZET .....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER .....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xi
ŞEKİLLERİN LİSTESİ .....	xiii
RESİMLERİN LİSTESİ .....	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvi
1. GİRİŞ.....	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	3
3. MATERYAL VE YÖNTEM .....	9
3.1. Tarihçe .....	9
3.2. Yol Tasarımı .....	10
3.2.1. AASHTO 86 tasarım yöntemi.....	10
3.2.2. Servis kabiliyeti.....	10
3.2.3. Analiz süresi.....	10
3.2.4. Bölge faktörü: R.....	10
3.2.5. CBR: Kaliforniya taşıma oranı.....	11
3.2.6. EDY: eşdeğer dingil yükü.....	11
3.2.7. Proje EDY değeri .....	11
3.2.8. Temel.....	11
3.2.9. Alttemel.....	11

	<b>Sayfa</b>
3.2.10. SN: Üstyapı sayısı .....	11
3.2.11. Zemin taşıma değeri .....	12
3.2.12. Dingil eşdeğerlik faktörü.....	12
3.2.13. Taşıt eşdeğerlik faktörü.....	12
3.3. Sathi Kaplamalı Üstyapıların Projelendirilmesi.....	12
3.4. Asfalt Betonu Kaplamalı Üstyapıların Projelendirilmesi .....	14
3.5. Dünyada Beton Yollar.....	17
3.6. Türkiye’de Beton Yollar .....	20
3.7. Esnek Üstyapıyı Oluşturan Tabakalar ve Görevleri.....	21
3.8. Esnek Üstyapı Tabakaları .....	22
3.8.1. Taban zemini .....	22
3.8.2. Alttemel tabakası.....	23
3.8.3. Temel tabakası .....	23
3.8.4. Granüler temel tabakası.....	23
3.8.5. Plentmiks temel tabakası.....	23
3.8.6. Çimento bağlayıcılı granüler temel tabakası.....	24
3.8.7. Proje EDY değeri .....	24
3.8.8. Rolled asfalt temel tabakası .....	24
3.8.9. Bitümlü temel.....	24
3.8.10. Bitümlü makadam temel .....	24
3.8.11. Kaplama tabakası .....	24
3.9. Rijit Üstyapı Tasarımında Çevresel Etkenler ve Trafik.....	25
3.9.1. Rijit üstyapı tasarımını etkileyen çevresel faktörler.....	25
3.9.2. Rijit üstyapı tasarımını etkileyen trafik faktörleri .....	26

	<b>Sayfa</b>
3.9.3. İnşa sürecinde dikkat edilmesi gereken noktalar .....	26
3.9.4. Rijit üstyapı-esnek üstyapı karşılaştırılması.....	27
3.10. Esnek Üstyapılarda Bozulmaya Sebep Olan ve Bozulmayı Hızlandıran Etmenler.....	28
3.11. Esnek Üstyapılarda Proje ve Yapım Hatasından Meydana Gelen Bozulma Tipleri .....	28
3.12. İmalâttan Hemen Sonra Oluşan Bozulmalar .....	29
3.12.1. Terleme: Kusma.....	29
3.12.2. Erken tekerlek izi problemi.....	31
3.12.3. Tekerek profil izi oluşması .....	32
3.12.4. Düşük sıcaklık çatlakları: Enine çatlaklar .....	32
3.12.5. Soyulma .....	34
3.13. Uzun Vadede Oluşan Bozulmalar .....	34
3.13.1. Çatlaklar.....	34
3.13.2. Küçük çukurlar .....	35
3.14. AASHTO Projelendirme Denklemindeki Kaplama Parametreleri ve Rijit Üstyapı Beton Kaplama Kalınlığına Etkisi.....	36
3.14.1. Efektif zemin yatak katsayısı .....	39
3.14.2. Betonun elastisite modülü.....	40
3.14.3. Betonun kopma modülü: Eğilmede çekme mukavemeti .....	40
3.14.4. Yük transfer katsayısı .....	41
3.14.5. Drenaj katsayısı.....	41
3.14.6. Servis yeteneği indeksi .....	42
3.15. Lineer Regresyon(LR) .....	42
3.16. Yapay Sinir Ağları (YSA).....	43



	<b>Sayfa</b>
4. ARAŞTIRMA VE BULGULAR .....	44
4.1. Sathi Kaplamada Kalınlıklar ve Maliyet .....	44
4.2. Esnek Kaplamada Kalınlıklar ve Maliyet .....	49
4.3. Rijit Kaplamada Kalınlıklar ve Maliyet .....	53
4.4. LR ve YSA ile Kaplama Kalınlıkları Tahmini .....	61
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	72
KAYNAKLAR .....	75
DİZİN .....	79

## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

<b>Çizelge</b>	<b>Sayfa</b>
Çizelge 3.1. Taşıt eşdeğerlik faktörleri.....	12
Çizelge 3.2. Sathi kaplamalı esnek üstyapılar için projelendirme abağı .....	13
Çizelge 3.4. Trafik kategorilerine göre AASHTO tipi beton kaplama tabakaları .....	17
Çizelge 3.5. Trafik kategorilerine göre Almanya tipi beton kaplama tabakaları.....	18
Çizelge 3.6. Trafik kategorilerine göre Belçika tipi beton kaplama tabakaları .....	18
Çizelge 3.7. Tavsiye edilen yük transfer katsayıları .....	41
Çizelge 3.8. Tavsiye edilen drenaj katsayıları .....	41
Çizelge 4.1. Sathi kaplama kalınlığının $M_R$ ve $T_{8,2}$ değerine göre değişimi.....	45
Çizelge 4.2. KGM 2021 birim fiyatlarına göre maliyet tablosu .....	47
Çizelge 4.3. Sathi kaplamanın 5000 psi $M_R$ değerinin $T_{8,2}$ ( $10^6$ ) değerlerine göre metrekare birim maliyet değişimi .....	48
Çizelge 4.4. $T_{8,2}$ değeri ve değişen $M_R$ değerlerine göre metrekare başına maliyet.....	49
Çizelge 4.5. $M_R$ ve $T_{8,2}$ 'ye göre esnek kaplama alttemel kalınlıklarının değişimi (cm).	49
Çizelge 4.6. Esnek kaplama 2021 KGM birim fiyat ve metrekare başına düşen maliyet tablosu .....	51
Çizelge 4.7. Esnek üstyapı kaplamanın alttemel kalınlık maliyetleri (TL).....	51
Çizelge 4.8. $k$ ve $T_{8,2}$ değerlerine göre rijit kaplama plaka kalınlıkları .....	54
Çizelge 4.9. Rijit kaplama birim fiyat tablosu.....	56
Çizelge 4.10. $k$ ve $T_{8,2}$ değerlerine göre metrekare birim maliyet (TL).....	57
Çizelge 4.11. Beton kaplama kalınlığının LR test sonuçları.....	62
Çizelge 4.12. Beton kaplama LR test sonuçlarına göre regresyon analiz sonuçları.....	63
Çizelge 4.13. Beton kaplama kalınlığının YSA test sonuçları.....	65
Çizelge 4.14. Beton kaplama YSA test sonuçlarına göre regresyon analiz sonuçları....	65
Çizelge 4.15. Esnek kaplama kalınlığının LR test sonuçları.....	67

<b>Çizelge</b>	<b>Sayfa</b>
Çizelge 4.16. Esnek kaplama LR test sonuçlarına göre regresyon analiz sonuçları.....	68
Çizelge 4.17. Esnek kaplama kalınlığının YSA test sonuçları.....	70
Çizelge 4.18. Esnek kaplama YSA test sonuçlarına göre regresyon analiz sonuçları...	70



## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Bitümlü sıcak karışım tabakaları için tabaka katsayısı seçim abağı.....	15
Şekil 3.2. Kalınlıkların kontrolü .....	16
Şekil 3.3. Uygulamadaki beton kaplama tipleri.....	17
Şekil 3.4. Esnek üstyapı kesiti .....	16
Şekil 3.5. Tipik esnek üstyapı numunesi .....	16
Şekil 3.6. Beton kaplama kalınlığının tayini.....	39
Şekil 4.1. $M_R$ 5000 psi ve $T_{8,2}$ değerlerine göre sathi kaplama alttemel kalınlık değişimi .....	40
Şekil 4.2. 3 milyon $T_{8,2}$ değerinin $M_R$ değerlerine göre değişimi.....	41
Şekil 4.3. 5000 $M_R$ değeri ve $T_{8,2}$ değerlerinde sathi kaplama metrekare birim maliyeti.....	42
Şekil 4.4. $T_{8,2}$ değeri ve değişen $M_R$ değerlerine göre metrekare maliyet değişimi.....	43
Şekil 4.5. Esnek kaplamada sabit $M_R$ değerleri ve değişken $T_{8,2}$ değerlerine göre üstyapı sayısı değişimi.....	45
Şekil 4.6. Esnek kaplamada sabit $T_{8,2}$ değerleri ve değişken $M_R$ değerlerine göre üstyapı sayısı değişimi.....	45
Şekil 4.7. Esnek kaplamada sabit $M_R$ değerlerinin $T_{8,2}$ değerlerine göre maliyet değişimi .....	47
Şekil 4.8. Esnek kaplamada sabit $T_{8,2}$ değerlerinin $M_R$ değerlerine göre maliyet değişimi .....	48
Şekil 4.9. Rijit kaplamada sabit $k$ değerleri ve değişen $T_{8,2}$ değerlerine göre kaplama kalınlıkları değişimi.....	50
Şekil 4.10. Rijit kaplamada sabit $T_{8,2}$ değerleri ve değişen $k$ değerlerine göre kaplama kalınlıkları değişimi .....	50
Şekil 4.11. Rijit kaplamada sabit $k$ değerleri ve değişen $T_{8,2}$ değerlerine göre metrekare maliyet değişimi .....	53
Şekil 4.12. Rijit kaplamada sabit $T_{8,2}$ değerleri ve değişen $k$ değerlerine göre metrekare maliyet değişimi .....	53

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 4.13. Sathi kaplama, beton kaplama ve esnek kaplama birim maliyet karşılaştırması .....	54
Şekil 4.14. Düşük değerlerde beton kaplama ve esnek kaplama birim maliyet karşılaştırması .....	54
Şekil 4.15. Beton kaplama ve esnek kaplama birim maliyet karşılaştırmasında eğilim çizgisi ve denklemleri.....	55
Şekil 4.16. Beton kaplama( $k=25$ psi) ve BSK( $M_R=2000$ psi) birim maliyet karşılaştırmasında eğilim çizgisi ve denklemleri.....	59
Şekil 4.17. Beton kaplama( $k=200$ psi) ve BSK( $M_R=5000$ psi) birim maliyet karşılaştırmasında eğilim çizgisi ve denklemleri.....	60
Şekil 4.18. Beton kaplama kalınlığının $T_{8,2}$ değerine göre LR analiz grafiği.....	63
Şekil 4.19. Beton kaplama kalınlığının LR ve Model karşılaştırma grafiği .....	63
Şekil 4.20. Beton kaplama kalınlığının $T_{8,2}$ değerine göre YSA analiz grafiği.....	65
Şekil 4.21. Beton kaplama kalınlığının YSA ve Model karşılaştırma grafiği .....	66
Şekil 4.22. Esnek kaplama kalınlığının $T_{8,2}$ değerine göre LR analiz grafiği.....	68
Şekil 4.23. Esnek kaplama kalınlığının LR ve Model karşılaştırma grafiği.....	68
Şekil 4.24. Esnek kaplama kalınlığının $T_{8,2}$ değerine göre YSA analiz grafiği.....	70
Şekil 4.25. Esnek kaplama kalınlığının YSA ve Model karşılaştırma grafiği.....	71

**RESİMLERİN LİSTESİ**

<b>Resim</b>	<b>Sayfa</b>
Resim 3.1. Ohio’da halen kullanılan beton yoldan alınan numune .....	9
Resim 3.2. Hafif şiddette kusma .....	29
Resim 3.3. Orta şiddette kusma .....	30
Resim 3.4. Yüksek şiddette kusma .....	30
Resim 3.5. Zayıf asfalt tabakasında tekerlek izi oluşumu .....	31
Resim 3.6. Tekerlek izi oluşumu ve oluklanma .....	31
Resim 3.7. Tekerlek izi .....	32
Resim 3.8. Hafif şiddette termal çatlak .....	33
Resim 3.9. Orta şiddette termal çatlak .....	33
Resim 3.10. Yüksek şiddette termal çatlak .....	33
Resim 3.11. Agreganın soyulması .....	34
Resim 3.12. Hafif şiddette çukur .....	35
Resim 3.13. Orta şiddette çukur .....	36
Resim 3.14. Yüksek şiddette çukur .....	36

## SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

<b>Kısaltmalar</b>	<b>Açıklamalar</b>
<b>T<sub>8.2</sub></b>	8.2 ton standart dingil yükü tekerrür sayısı
<b>M<sub>R</sub></b>	Esneklik Modülü
<b>k</b>	Zemin yatak katsayısı
<b>CBR</b>	Kaliforniya Taşıma Gücü
<b>AASHTO</b>	American Association of State Highway and Transportation Officials- Amerikan Devlet Karayolları Görevlileri Birliği
<b>BSK</b>	Bitümlü sıcak karışım
<b>R</b>	Bölge Faktörü
<b>EDY</b>	Eşdeğer Dingil Yüğü
<b>SN</b>	Üstyapı Sayısı
<b>KGM</b>	Karayolları Genel Müdürlüğü
<b>YSA</b>	Yapay Sinir Ağı
<b>LR</b>	Lineer Regresyon
<b>HKO</b>	Hataların Karelerinin Ortalaması
<b>OYH</b>	Ortalama Yüzde Hata

## 1. GİRİŞ

Ulaşım ağı bir ülkenin gelişmişliğini göstermektedir. Ülkemizde ulaşım büyük çoğunlukla karayolları ile yapılmaktadır. Yolcu ve yük taşımada önemli bir yere sahip olan karayollarının dizaynı önem arz etmektedir. Özellikle ekonomik tasarımların önem kazandığı zamanlarda en çok tercih edilen ulaşım ağı türü olarak karayollarının tasarımı da oldukça önemli bir hale gelmektedir. Karayolu üstyapısı esnek kaplama ve rijit kaplama olarak tanımlanabilmektedir. Üstyapılar "güvenlik, konfor, hacim ve trafik kompozisyonu" ile "ekonomiklik, iklim ve bölgesel koşullara uygunluk" göz önünde bulundurularak planlanmaktadır (Giriş, 2007).

Esnek kaplamalar, bitümlü kaplama tabakalarıyla oluşturulan üstyapılardır. Esnek üstyapı; kaplama, temel ve alttemel tabakaları yoluyla trafik yüklerini taban zeminine aktarmaktadır. Sathi kaplamalar, asfalt bağlayıcı malzeme olarak yüzeye püskürtülmekte ve bunun üzerine agreganın serilmesi ve sıkıştırılması ile imal edilmektedir. Sathi kaplamalar trafik yoğunluğu çok fazla olmayan yollarda uygulanmaktadır. Beton kaplama, Portland çimentosunun su ve agrega ile karışımından yapılmakta ve tek tabakalı beton plak olarak yükleri taban zeminine aktarmaktadır.

Üstyapı tipinin Esnek veya Rijit kaplama olarak belirlenmesi temelinde bir maliyet ve ihtiyaç parametrelerinin bir optimizasyonu problemi bulunmaktadır. Türkiye'deki farklı durumlar için hangi üstyapının daha ideal olacağını, bunun ekonomik yansımalarını, ekonomik ve teknik özelliklerini değerlendirmek, araştırmak ve karşılaştırmak gerekmektedir. Karayolu üstyapı kaplaması seçimi için üstyapı tipleri teknik ve ekonomik yönden karşılaştırılmalı ve ekonomik şartlar dikkate alınarak karar verilmelidir.

İki üstyapı çeşidi arasında yapısal farklılıklar vardır. Üstyapıyı oluşturan malzemelerin özellikleri bu farklılıkları ortaya çıkarmaktadır. Esnek kaplamalar, tekerleklerin ağırlığı altında esnemekte ve bu ağırlığı biraz daha yayarak alt tabakaya aktarmaktadır. Rijit kaplamanın zemine aktardığı yük geniş bir alana dağılmaktadır. Bu yüzden rijit üstyapı kaplamasına elastik olarak yüklenmiş bir kiriş denilmektedir.



Bu çalışmada, kaplama kalınlıkları, zemin taşıma gücü ( $M_R$ ) ve 8.2 ton standart dingil yükü tekerrür sayısı ( $T_{8.2}$ ) parametrelerine göre hesaplanmaktadır. Hesaplanan kaplama kalınlıklarının ekonomik analizi yapılmaktadır. Hangi kaplama türünün hangi şartlarda kullanılması gerektiği parametreler doğrultusunda belirlenmektedir. Ayrıca kaplama kalınlıklarının karşılaştırılması için Yapay Sinir Ağları (YSA) ve Lineer Regresyon (LR) ile kaplama kalınlıklarının tahmini yapılmaktadır.

Kaplamanın sehim ve taban tepki modülü, beton plakanın altında ortaya çıkan gerilmeleri belirlemektedir. Böyle bir teknik karşılaştırmanın üstyapı tipini belirlemede faydalı olacağı görülmektedir. Ancak bu seçimde kuşkusuz “maliyet” unsuru ağır basmaktadır (Giriş, 2007).



## 2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Karayolları kaplama kalınlıkları ve maliyetleri ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır. Yapılan bu çalışmalardan bazıları önceki çalışmalar kısmında verilmiştir.

Çalışıcı, Koç ve Cansız (2017) yaptıkları bu çalışmada, iki farklı zeminde yapılan C60B2 katyonik asfalt emülsiyonu ile stabilizasyonun zeminlerin Kaliforniya Taşıma Gücü (CBR) değerlerine etkileri incelenmiştir. Gelişmekte olan otomotiv sektörüne bağlı olarak yüksek kapasiteli kamyonların üretilmesi yapılan yolların daha dayanıklı olması gerektiğini vurgulamışlardır. CBR değerlerinde oluşan değişimlerin iki farklı zeminin tabaka kalınlıklarına olan etkisini AASHTO 93 yöntemi kullanılarak tasarlanan üstyapı hesabı ile bulunmuştur. Sonuç olarak, katyonik asfalt emülsiyonu kullanılarak stabilize edilmiş zeminlerde CBR değerinin artması yapılacak olan esnek kaplama tabaklarında önemli ölçüde azalma olduğu ve taşıma kapasitesinde artış olduğu gözlemlenmiştir.

Giriş (2007) yaptığı bir çalışmada, esnek ve rijit üstyapıların tasarımında kullanılan malzemeler, üstyapının avantaj ve dezavantajları, bakım – onarım teknikleri incelenmiş ve maliyet analizleri hazırlamıştır. Kaplama türlerinin tasarımına ilişkin geliştirilmiş farklı yöntemler bulunmaktadır. Ancak hem ülkemizde hem de dünyada en çok kullanılan yöntemlerin başında AASHTO yöntemi gelmektedir. Yolun yapılacağı bölgenin karakteristik özellikleri, avantajlar ve dezavantajların değerlendirilmesi açısından belirleyici olmaktadır.

Edis (2007) yaptığı çalışmada, asfalt kaplamalı üstyapılarla beton kaplamalı üstyapıların maliyetlerinin karşılaştırılması incelenmiştir. Beton kaplamalı üstyapılar ilk yapım maliyeti, asfalt kaplamalı üstyapılara nazaran düşük trafik yoğunluklarında ( $T_{8.2} = 0.5 \times 10^6 - 4.5 \times 10^6$ ) daha pahalı bir üstyapı çeşidi olarak bulunmuştur. Ancak; trafik yoğunluğu ( $T_{8.2} = 4.5 \times 10^6$ ) dan sonra sıcak karışım asfalt kaplama maliyetiyle aynı olmakta ve bu trafik yoğunluğundan sonraki yoğunluklarda beton kaplamalı üstyapılar daha ekonomik olduğu düşünülmektedir.

Çalışıcı, Gürü, Çubuk ve Cansız (2018) yaptıkları çalışmada, dietilen glikol bazlı poliboron bileşiği (DEGPB)'nin, bitümün yaşlanma direnci, fiziksel ve mekanik özelliklerine etkileri

araştırılmıştır. Bu çalışmada yapılan deneyler sonucunda elde edilen veriler göz önüne alındığında bitümün yaşlanma direncini arttırdığı tespit edilmiştir. Katkı maddesi olmayan bitüm ile kıyaslandığında, bitümün viskozitesi ve yumuşama noktası değerlerinde artış sağlamakta, penetrasyon ve süneklilik değerlerinde ise azalma olduğu gözlemlenmiştir. Sonuçta elde edilen değerler baz alınarak bitümün yaşlanmasını %41,9 oranında azalttığı bulunmuştur.

Kaşak, Komut ve Altıok (2019) yaptıkları bir çalışmada ise, ülkemiz şartlarına uygun projelendirme kriterleri belirlenerek hazırlanan beton yol projelendirme rehberinden alıntılar yapılarak beton sınıfına bağlı olarak beton plak kalınlıklarındaki değişim gözlenmiştir. Ayrıca projelendirme rehberi hazırlanmasındaki amaç ileriki zamanlarda üstyapı mühendislerinin üreteceği projeler için yardımcı olacak başvuru kaynaklarından biri olması hedeflenmektedir.

Kuloğlu, Kök, Yılmaz ve Tanyıldızı (2011) yaptıkları çalışmada, rijit üstyapı beton kaplama kalınlığına etkisini araştırmak için AASHTO metodunda yer alan yük transfer katsayısı, drenaj katsayısı ve servis yeteneği kaybı parametreleri dışında kalan her bir parametrenin incelenmiştir. Trafik tahmini ve performans tahmininin bileşik standart hatasının ve betonun elastisite modülünün rijit kaplama kalınlığını lineer bir şekilde etkilemiş, standart dingil yükü tekerrür sayısının, zemin yatak katsayısının ve güvenilirlik parametrelerinin kaplama kalınlığı üzerindeki etkisinin ise lineer olmadığı tespit edilmiştir.

Çalışıcı (2018) yaptığı çalışmada, asfalt emülsiyonu ile stabilize edilmiş zeminin esnek üstyapı kalınlığına ve üstyapı maliyetine etkileri araştırılmıştır. Yük taşımacılığının daha çok karayolu ile yapılmakta olan ülkelerde ağır vasıtaların artan yük taşıma kapasitesi yol kaplamalarının güçlendirilmesi ihtiyacını doğurmaktadır. Yapılan çalışmada, optimum emülsiyon içeriği ve bunun CBR üzerine etkileri belirlenmiştir. Çalışmanın sonucunda, asfalt kaplama kalınlığının ve kaplama maliyetinin düştüğü görülmüştür.

Ayçiçek (2011) yaptığı bu çalışmada, esnek üstyapılarda üretim ve yapım hatalarının sebep olacağı bozulmaları göz önüne sermiştir. Bu hatalardan dolayı meydana gelebilecek manevi, maddi zararları en aza indirmek için önem verilmesi gereken hususlara dikkat çekmiştir. Yapılan anket çalışması ile de yol inşası sektöründe çalışan personelin yol üretimi ile ilgili

teknik bilgi durumunu belli bir örnekleme oranında incelemiş ve tecrübeleri doğrultusunda yol kalitesinin artırılması ile ilgili görüşlerini ortaya koymuştur.

Kök (2008) yaptığı bir çalışmada; karayolu ve havaalanı üstyapı tasarımında kullanılan yöntemlerin esasları açıklanmış. Üstyapı tasarım parametreleri açısından karayolu ve havaalanı üstyapı tasarımı yöntemlerinin, esnek ve rijit üstyapı için karşılaştırması yapılmıştır. Bu üstyapı tasarımlarının Türkiye’de ki uygulamaları ile ilgili bilgi verilmiş ve örnekler sunulmuştur.

Arapoğlu (2015) yaptığı bir çalışmada, tipik bir yol kesiti düzenlenmiş ve maliyeti hesaplanmıştır. Aynı yol kesiti bu kez binder ve bitümlü temel tabakalarında her seferinde farklı geri dönüşüm oranları ilave edilerek düzenlenmiş, bu oranlara göre malzemeden elde edilen ton başına kârlar hesaplanmıştır. Hesaplamalarda geri dönüşüm türüne göre işletme maliyetleri de göz önüne alınarak daha gerçekçi sonuçlar elde edilmiştir.

Çelik (2014) yaptığı mekanistik bir çalışmada, beton yolların ve esnek kaplama yolların sonlu elemanlar ortamında farklı kalınlık ve beton sınıfı özelliklerine göre modelleri yaparak değerlendirmeye almıştır. Araziden beton karot numuneleri alınmış ve mukavemet bilgileri rijit kaplama modellerinde kullanılmıştır. Bu değerlendirmelerde beton kaplamaların gerilme değeri esnek kaplama gerilme değerinden ortalama y eksenini doğrultusunda % 119, x eksenini doğrultusunda % 74 daha az olduğu görülmüştür. Esnek ve rijit kaplamanın şekil değiştirmeleri karşılaştırıldığında rijit kaplamanın ortalama y eksenini doğrultusunda % 17, x eksenini doğrultusunda % 44 daha az şekil değiştirdiği görülmüştür. Çalışmanın son kısmında ise Karadeniz Bölgesi Köy yollarında farklı yol üstyapı türlerinin maliyet karşılaştırılması yapılmıştır. Elde edilen sonuçlarda köy yolları için ilk yapım maliyeti olarak rijit kaplama, esnek kaplamadan % 37 daha az maliyetli olduğu gözlenmiştir.

Öztürk (2006) yaptığı bir çalışmada, ülkemizde kullanılacak olan AASHTO 1986 yılı esnek üstyapı hesap yöntemini bulanık mantık yöntemi ile modelleyerek bilgisayar ortamında çözüm sağlamıştır. AASHTO 1986 yönteminde parametreler çok sayıda ve karmaşık olduğu için bulanık mantıkla ele alınabileceğini belirtmiştir. Böylece kurulan model ileride yapılacak olan çalışmalara ışık tutabilmekte ve esnek üstyapıların boyutlandırılmasında hesaplayıcıya fikir verebilmektedir.

Geçkil ve Tanyıldızı (2019) yaptıkları bir çalışmada, esnek ve rijit yol üstyapısının projelendirilmesinde kullanılan AASHTO (1986) (American Association of State Highway and Transportation Officials) metodundaki ‘Taban Zemini Esneklik Modülü  $M_R$  (psi)’ ile ‘Yatak Katsayısı  $k$  (pci)’ parametreleri, esnek ve rijit kaplamalarda maliyet ve tabaka kalınlıkları açısından araştırılmıştır. Bu amaçla, esnek üstyapılarda esnek kaplama kalınlığını en çok etkileyen parametre taban zemini esneklik modülü ( $M_R$ ) iken rijit üstyapılarda yatak katsayısı ( $k$ ), beton kaplama kalınlığını en az etkileyen parametre olarak tespit edilmiştir.  $M_R$  değerinin gerçek değerinden küçük alınması durumunda yatırım giderlerinin gereksiz yere artırılmış ve bu durumun ekonomik zararlara yol açabileceği, ‘ $k$ ’ değerinin ise üstyapı maliyetine önemli bir etkisinin olmadığı tespit edilmiştir.

Kök, Yılmaz ve Geçkil (2012) yaptıkları çalışmada, taşıma gücü zayıf olan zeminlerde yapılacak olan çimento stabilizasyonunun taşıma gücüne ve üstyapı maliyetine etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla %4-%16 aralığında çimento ile stabilize edilen taşıma gücü zayıf olan bir zeminin Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) tespit edilmiştir. CBR’da meydana gelen artışın üstyapı maliyetine etkisi MATLAB programı vasıtasıyla binlerce alternatif dikkate alınarak tespit edilmiştir. Sonuçta zemin CBR değerinin artması ile azalan üstyapı maliyeti ile zeminin CBR değerini artırmak için yapılan ilave masraf arasındaki optimum çimento oranı belirlenmiştir

Bağdatlı (2010) yaptığı çalışmada, esnek yol üstyapılarının projelendirme parametrelerden, üstyapı hasarlarında en etkili kriterin malzeme faktörü olduğunu öne sürmüştür. karayolları bakım maliyetleri üzerinde en etkili hasar, esnek üstyapılarda iklim ve bölge faktörüyle meydana gelen kabarma oluşumunun olduğu belirlenmiştir. Diğer taraftan bakım maliyetleri üzerindeki etkisinde, agrega cilalanması, sökülme ve büzülme çatlaklarının en düşük fiziksel deformasyonlar oldukları sonucuna ulaşılmıştır.

Szymański, Pikos ve Nowotarski (2017) yaptıkları bir çalışmada, karşılaştırmalı testlere tabi tutulmuş yol yüzeyinin özellikleri ile modern betonun uygulanmasının teknolojik kavramlarını araştırmışlardır. Aşınma katmanının mekanik özelliklerini ve dayanıklılığını etkileyen, polimerlerle beton karışımlarının modifiye edilmiş bileşimleri test edilmiştir. Modifiye edilmiş yol betonunun dayanım özelliklerinde meydana gelen değişimler incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, ekonomik göstergeleri iyileştirmek ve yatırımların çevre

üzerindeki olumsuz etkisini azaltmaktadır. Böylece polimer katkıların beton için avantajlarının en etkin şekilde kullanılabilmesi, ilerideki araştırmaların yönünü belirlemede faydalı olacaktır.

Bakış (2018) yaptığı bir çalışmada, MATLAB programı kullanılarak 8,2 ton eşdeğer tek-dingil yükü tekerrür sayısına göre, bir karayolu üstyapı inşasında kaplama kalınlıkları ve 1 km yol uzunluğu için üstyapı maliyetleri, en küçük kareler yöntemiyle kolerasyon ve regresyon analizleri yaparak bulmuştur. Korelasyon ve regresyon analizleriyle bu hesaplamalar basit bir denklem üzerinden yapılmıştır. Bunun sonucunda, geleneksel uzun matematiksel işlemler ile hesaplanan 8,2 ton eşdeğer tek-dingil yükü tekerrür sayısına ( $W_{8,2}$ ) bağlı olarak üstyapı kaplama kalınlığı ve üstyapı maliyet hesaplamaları, bu çalışma ile elde edilen doğrusal denklem ile çok basit bir yöntemle çözülmüştür. Sonuçlar karşılaştırıldığında, MATLAB ile bulunan yeni formüller ile klasik olarak hesaplanan sonuçların birbirine yakın olduğu görülmüştür. Elde edilen formüller ile üstyapı kaplama kalınlıkları ve üstyapı maliyetleri pratik bir şekilde yaklaşık olarak hesaplanabilmektedir.

Göktepe, Ağar ve Lav (2005) yaptıkları çalışmada esnek üstyapıların performans değerlendirilmesi için, Düşen Ağırlık Deflektometresi (FWD) yöntemi ile yol üzerindeki çok sayıda yerde uygulanan yük sebebi ile meydana gelen zamana bağlı defleksiyon değerleri kaydedilmiştir. Uygulamada, FWD deneyi ile elde edilen defleksiyon değerleri ve geri-hesaplama programları kullanılarak, üstyapı tabakalarına ait mekanik özellikler hesaplanmıştır. Fakat bu programlar, parametre tanımlama algoritmaları kullanmakta ve bu da zaman kaybına neden olmaktadır. Bu çalışmada, FWD testinden elde edilen defleksiyonları kullanarak, esnek üstyapı tabakalarındaki mekanik özellikleri yapay sinir ağları ile geri-hesaplayan bir model geliştirilmiştir. Sonuçlar, modelin hassasiyetinin son derece yüksek olduğunu ve gerçek-zamanlı geri-hesaplama yapılabilmeye olanak sağladığını göstermiştir.

Alatoom ve Al-Suleiman (2021), yaptıkları araştırmanın temel amacı, akıllı telefon ölçümlerine dayalı olarak Yapay Sinir Ağı (YSA) kullanarak üstyapı pürüzlülük modelleri geliştirmektir. Üstyapı yaşı, trafik yükü ve trafik hacminin Uluslararası Pürüzlülük Endeksi (IRI) değerleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. YSA modeli geliştirmenin sonuçları, YSA'nın %10'dan daha düşük nispeten düşük bir ortalama hata ile gelecekteki IRI değerini tahmin etme konusunda umut verici olduğunu göstermiştir. Regresyon ve YSA modelleri

arasındaki karşılaştırma sonucu, geliştirilen YSA modellerinin IRI tahmininde regresyon modellerine göre daha doğru olduğunu göstermiştir.

Hossaina, Gopisetib ve Miahc (2020), yaptıkları araştırmada, iklim ve trafik parametrelerini girdi olarak kullanan Yapay Sinir Ağı (YSA) modelini kullanarak rijit kaplamaların Uluslararası Pürüzlülük Endeksini (IRI) tahmin etmeye çalışmışlardır. İklim ve trafik parametreleri, Ortalama Yıllık Hava Sıcaklığı, Yıllık Ortalama Donma İndeksi, Yıllık Ortalama Maksimum ve Minimum Nem, Yıllık Ortalama Yağış, Yıllık Ortalama Günlük Trafik ve Yıllık Ortalama Günlük Kamyon Trafiğidir. YSA modeli, iklim, trafik ve IRI verilerinin %70'i ile eğitilmiş, kalan %15'lik veriler modeli test etmek için, kalan %15'lik veriler ise modeli doğrulamak için kullanılmıştır. Eğitilmiş ve doğrulanmış modeller, Ortalama Kare Hatası (RMSE) ve Ortalama Mutlak Yüzde Hatası (MAPE) hesaplanarak karşılaştırılmıştır. Birçok sonuç arasında hiperbolik tanjant sigmoidal transfer fonksiyonlu 7-9-9-1 YSA yapısı ile test edilen veri setleri, rijit bir üstyapı için RMSE değeri 0.01 ve MAPE değeri 0.01 (%1 hata) ile en iyi tahmin modellerini üretmiştir.

Yaptığımız bu çalışma literatürden farklı olarak sathi kaplama, bitümlü sıcak kaplama ve beton kaplama türlerinin  $M_R$  ve  $T_{8.2}$  parametrelerine göre kaplama kalınlıkları ve maliyet karşılaştırmasına odaklanmıştır. Kaplama kalınlıklarının regresyon ve YSA analizleri yapılarak tahminde bulunulmuştur. Böylece 3 kaplama türünün kaplama kalınlıklarına göre ekonomikliği araştırılmıştır. Kaplama kalınlıklarının tahmini analizler sonucunda bulunmuştur. Regresyon ve YSA kullanılarak üstyapı kaplamaları için tahmin analizleri oluşturulabilmektedir.

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3.1. Tarihçe

MÖ 1. yüzyılda Romalılar tarafından puzolanik bağlayıcılarla birleştirilmiş taşlardan yapılan yollar beton yolların en eski örnekleri olarak kabul edilse de, bugün bildiğimiz haliyle beton yollarda ilk denemeler on dokuzuncu yüzyılın sonlarında Amerika Birleşik Devletleri'nde gerçekleşmiştir. Bilinen en eski beton yol, 1891'de Ohio'da inşa edilmiş bir karayoludur. Resim 3.1'de, Ohio karayolundan alınan bir karot örneği gösterilmektedir (Pancar, 2008). 1893'teki Chicago Uluslararası Fuarı, bu beton yolu, kaplama malzemelerinde en büyük mühendislik teknolojisi olarak adlandırarak, bu yeni yaklaşımın yolunu açmıştır (Pancar, 2012).



Resim 3.1. Ohio'da halen kullanılan beton yoldan alınan numune (Pancar, 2008)

Zaman içerisinde “beton üretim, taşıma ve yerleştirme teknolojilerinin ilerlemesi, deforme olmayan panoramaların bulunması” gibi gelişmeler sayesinde beton uygulamalarında kalite artmış ve beton yol yapımı hız kazanmıştır. Amerika Birleşik Devletleri'nde yalnız 1960-1980 döneminde 70.000 kilometrelik beton yol ağı tamamlanmıştır (Pancar, 2012).



## **3.2. Yol Tasarımı**

### **3.2.1. AASHTO 86 tasarım yöntemi**

Bu hem analitik hem de ampirik bir yaklaşımdır. Araştırmacılara göre, analitik teknikle modellenmeyen bazı yönler üstyapıda etkili olmaktadır. Analitik modelleri kalibre etmek için performans gözlemleri ve ampirik korelasyonlar kullanılmaktadır. Analitik-ampirik yaklaşımlar bu talebin bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır. Sonuç olarak analitik-ampirik yaklaşımlar daha başarılı ve gerçeğe daha yakın olmaktadır (Çevik, 2014).

### **3.2.2. Servis kabiliyeti**

Belirli bir gözlem periyodunda, kaplamanın yeterli taşıma ve sürüş kalitesi sağlama kapasitesini ifade etmektedir. Üstyapının hizmet kabiliyeti, dingil yüklerinin sayısı ve üstyapı sayısı arasında oluşturulan bir bağlantı kullanılarak üstyapı kaplamasının dizaynı mümkün olmaktadır.

Kaplama kalınlıkları hesaplanırken dikkate alınan bir diğer faktör de iklim ve çevresel koşullardır. Son servis kabiliyeti, proje döneminin sonunda üstyapının hizmet verebilirliğini tanımlamaktadır. Güzergâhın önemine göre 2.0, 2.5 veya 3.0 gibi değerler kullanılmaktadır.

### **3.2.3 Analiz süresi**

Bu süre zarfında, ilk inşaat ve müteakip takviye katmanları dahil olmak üzere projelerin ekonomik karşılaştırmaları yapılmaktadır.

### **3.2.4. Bölge faktörü: R**

İklimsel ve çevresel faktörlere bağlı olarak kaplama miktarını ayarlayan sayısal bir faktördür.

### **3.2.5. CBR: Kaliforniya taşıma oranı**

Temel, alttemel ve zemin altı taşıma kabiliyetini tanımlayan test sonucunda belirlenen yüzde sayısıdır.

### **3.2.6. EDY: Eşdeğer dingil yükü**

Çeşitli ağırlık ve sayılardaki dingil yüklerinin toplam etkisi ile karşılaştırılabilir bir üstyapıya etki eden 8,2 tonluk dingil yükü tekerrür sayısıdır.

### **3.2.7. Proje EDY değeri**

Tekrar sayısı, proje süresi boyunca tek yönde hareket ettiği tahmin edilen toplam eşdeğer  $T_{8,2}$  standart dingil yükü olmaktadır.

### **3.2.8. Temel**

Alttemel üzerine, belirli bir kalınlıkta serilmiş ve sıkıştırılmış, belirli çaplarda ve fiziksel niteliklerde kırmataş tabakası veya katmanları olmaktadır.

Temel tabakası, üstyapıyı taşımak, gerilmeleri dağıtmak, uygun drenajı sağlamak ve don etkisini azaltmak gibi çeşitli amaçlara hizmet etmektedir.

### **3.2.9. Alttemel**

Üstyapı katmanı, temel katmanını desteklemek için alt zemine yerleştirilen granüler malzemelerden oluşmaktadır.

### **3.2.10. SN: Üstyapı sayısı**

Üstyapının her katmanında kullanılan mekanizma türüne uygun katman katsayıları kullanılarak "trafik, alt zemin koşulları, bölge faktörü ve nihai hizmet verilebilirlik" sayılarının esnek üstyapı katmanlarının kalınlığına dönüştürülmesinin sonucu olmaktadır.

### 3.2.11. Zemin taşıma değeri

Esnek üstyapı üzerinden aktarılan trafik yüklerini taşıyabilecek üstyapı temelinin bağlı taşıma kapasitesi, deney sonucunda keşfedilen 3 ile 10 arasında değişen sayısal bir değer olmaktadır.

### 3.2.12. Dingil eşdeğerlik faktörü

Belirli bir dingil yükünün bir kaplama üzerindeki etkisiyle aynı olana kadar standart bir dingil yükünün tekrarlanma sayısıdır. Tek, tandem ve tridem dingil yüklerini  $T_{8.2}$  sayılarına dönüştürmek için çeşitli formüller kullanılmaktadır.

### 3.2.13. Taşıt eşdeğerlik faktörü

Araba, otobüs, kamyon, treyler gibi bir aracın yanından geçtiğinde üstyapıya zarar veren konvansiyonel dingil yükünün tekrar sayısıdır. Çizelge 3.2'de taşıt eşdeğerlik faktörleri tablo halinde verilmektedir.

Çizelge 3.1. Taşıt eşdeğerlik faktörleri

Taşıt Grubu	Taşıt Eşdeğerlik Faktörleri
Treyler	4,40
Kamyon	2,80
Otobüs	3,90
Otomobil	0,0006

## 3.3. Sathi Kaplamalı Üstyapıların Projelendirilmesi

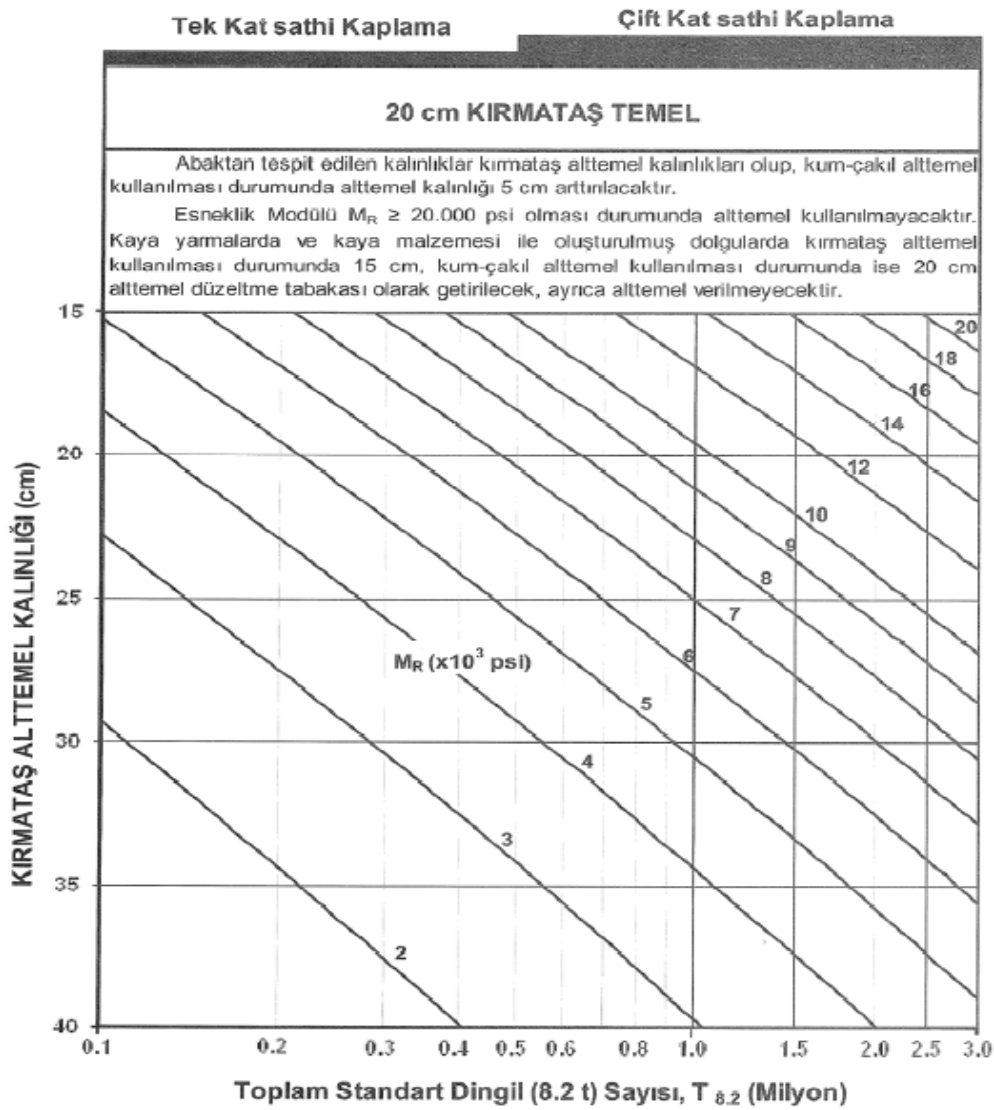
Sathi kaplamalı yollar, proje süresi boyunca üstyapı temel esneklik modülüne ve yoldan geçecek toplam standart dingil sayısına göre projelendirilmektedir. Tabaka kalınlıkları Çizelge 3.2'deki çizelge yardımıyla bulunmaktadır.

Çizelge 3.2'de dikkate alınan proje süresi 10 yıl olmasına rağmen tasarımcı; yolun niteliği ve önemi göz önüne alındığında, proje süresini daha az ya da daha çok alabilmektedir.

Taban elastisite katsayısı ve  $T_{8.2}$  sayısı hesaplanan yolun üstyapı kalınlığının belirlenmesinde izlenen işlem aşağıdadır (Karayolları Esnek Üstyapı Proje Planlama Rehberi, 2008):

$T_{8.2}$  elde edilerek eksene dik bir doğru oluşturulur. Enine eksen üzerindeki numara ve bu çizginin taban elastisite modül değerini gösteren eğik çizgi aşağıdaki gibi olmaktadır. Hattın nerede koptuğu tespit edilmektedir. İlgili noktadan boyuna eksene çizilen düz çizginin dikey ekseni kestiği noktadan alttemel kalınlığı belirlenmektedir.

Çizelge 3. 2. Sathi kaplamalı esnek üstyapılar için projelendirme abağı (Karayolları Esnek Üstyapı Projelendirme Rehberi, 2008)



### 3.4. Asfalt Betonlu Kaplamalı Üstyapıların Projelendirilmesi

Kaplama sayısını gerçek kalınlığa çevirmek için kaplamada kullanılan her malzemeye bir katsayı atanmaktadır. Bu çarpan, SN ve kalınlık arasındaki deneysel ilişkiyi temsil etmekte ve bir üstyapı bileşimi olarak malzemenin taşıma kapasitesinin bir ölçüsü olmaktadır.

Asfalt betonu kaplamalı üstyapıların projelendirilmesi AASHTO yol testlerinin sonuçlarıyla bulunur. AASHTO yol deneyi sonucunda Eş. 3.1'deki formül geliştirilmiştir.

$$\text{Log}(T_{8,2}) = Z_R \times S_0 + 9.36 \times \log(\text{SN} + 1) - 0.20 + \frac{\log \left[ \frac{\Delta \text{PSI}}{4.2 - 1.5} \right]}{0.40 + \left[ \frac{1094}{(\text{SN} + 1)^{5.19}} \right]} + 2.32 \times \log M_R - 8.07 \quad (3.1)$$

Bu denklemde;

$T_{8,2}$  : Pt' ye erişinceye kadar tekerrür edecek standart dingil (8,2 ton) sayısı

$M_R$  : Taban zemini esneklik modülü (Psi)

$S_0$  : Standart sapma

$Z_R$  : Normal standart sapma

SN : Üstyapı sayısı (inç)

$\Delta \text{PSI}$ : Servis kabiliyeti indeksi

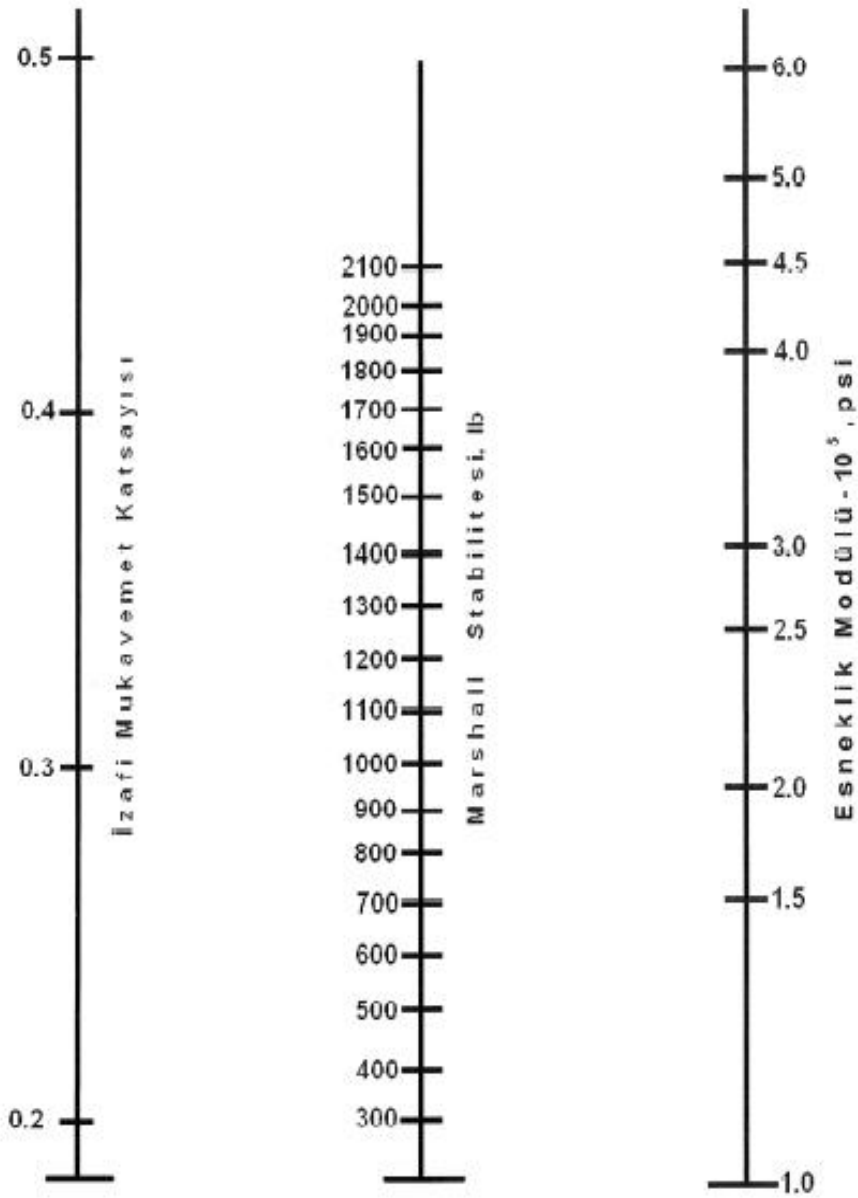
Söz konusu üstyapı tabakasının elastisite modülüne bağlı olarak temel, alttemel ve alttemel malzemelerinin bağlı dayanım katsayıları Eş. 3.2'deki formül kullanılarak hesaplanabilmektedir.

$$a_i = 0,0045 \cdot \sqrt[3]{M_{R_i}} \quad (3.2)$$

$a_i$  : Söz konusu granüler tabakanın izafi mukavemet sayısı

$M_{R_i}$  : Söz konusu granüler tabakanın esneklik modülü, psi

Bitümlü sıcak karışım tabakalarının göreceli mukavemet katsayıları, esneklik modülüne veya Marshall stabilitesi değerine göre bulunabilmektedir.



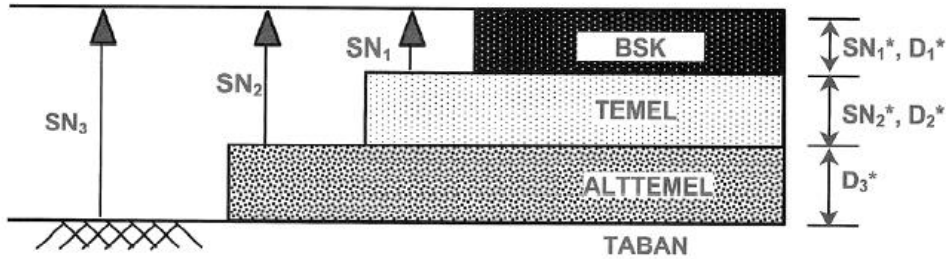
Şekil 3.1. Bitümlü sıcak karışım tabakaları için tabaka katsayısı seçim abağı (Karayolları Projelendirme Rehberi, 2008)

Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) tarafından yapılan yol kaplama malzemeleri için kullanılacak katman katsayıları aşağıda verilmektedir. Katsayılar, malzemenin belirtilen fiziksel özellikleri için geçerli olmaktadır.

Çizelge 3.3. Tabaka Katsayıları (Karayolları Projelendirme Rehberi, 2008)

TABAKA CİNSİ	MARSHALL STABİLİTESİ (kg)	CBR (%)	7 GÜNLÜK SERBEST BASINÇ DAYANIMI (kg/cm <sup>2</sup> )	a <sub>i</sub>
a) BSK TABAKALARI				
Taş Mastik Asfalt (TMA)				0,44
Asfalt Betonu Aşınma	≥ 900			0,42
Asfalt betonu Binder	≥ 750			0,4
Bitümlü Temel	≥ 600			0,36
b) TEMEL TABAKASI				
Çimento Bağlayıcılı Granüler Temel			35-55	0,23
Plent-Miks Temel		≥ 120		0,15
Granüler Temel		≥ 110		0,14
c) ALTTEMEL TABAKASI				
Kırmataş Alttemel		≥ 50		0,13
Kum-Çakıl Alttemel		≥ 30		0,11

Bulunan tabaka kalınlıkları, aşağıda verilen hesaplama metoduyla kontrol edilmektedir (Eş. 3.3, Eş. 3.4, Eş. 3.5, Eş. 3.6, Eş. 3.7).



Şekil 3.2. Kalınlıkların kontrolü (Karayolları Projelendirme Rehberi, 2008)

SN1 = Temel tabakası üzerine gereken SN

SN2 = Alttemel tabakası üzerine gereken SN

SN3 = Taban üzerine gereken SN

$$D1^* \geq SN1 / a1 \quad (3.3)$$

$$SN1^* \geq SN1 \quad (3.4)$$

$$SN1^* - a1 \times D1^* \geq SN1 \quad (3.5)$$

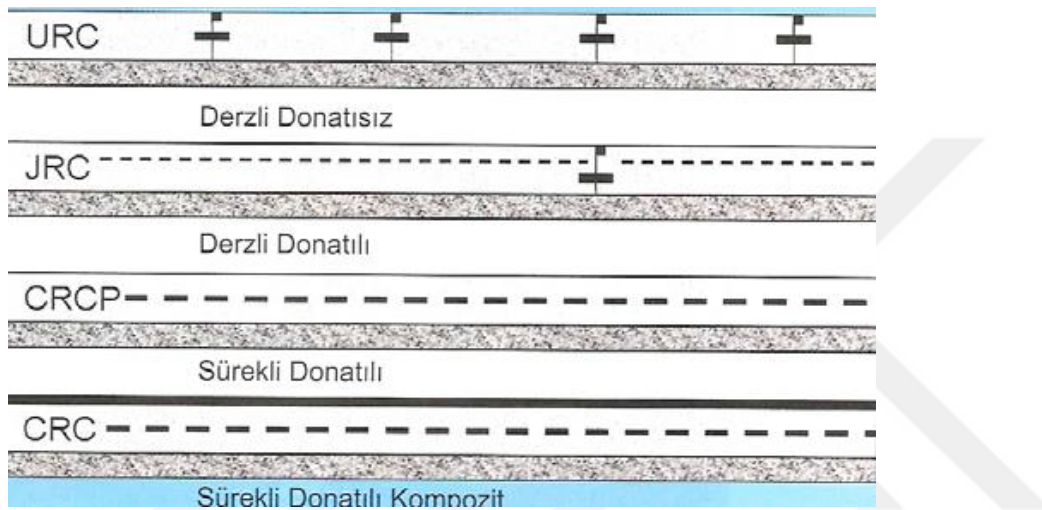
$$D2^* \geq (SN2 - SN1^*) / a2 \quad SN1^* + SN2^* \geq SN2 \quad (3.6)$$

$$D3^* \geq (SN3 - (SN1^* + SN2^*)) / a3 \quad (3.7)$$

(\*) Üstyapıda kullanılan gerçek değer olup gerekli değere eşit veya boş olmalıdır. (Dündar, G. 1998)

### 3.5. Dünyada Beton Yollar

Rijit üstyapılar çeşitli şekillerde tasarlanabilir. Şekil 3.3 kullanımda olan dört farklı üstyapı tipini göstermektedir.



Şekil 3.3. Uygulamadaki beton kaplama tipleri

Kaplama, Amerika Birleşik Devletleri'nde kullanılan "AASHTO" yaklaşımına göre saf beton kaplama ve alttemelden oluşmaktadır. Çizelge 3.4, farklı trafik sınıflandırmalarına göre AASHTO tipi beton kaplama katmanlarını göstermektedir.

Çizelge 3.4. Trafik kategorilerine göre AASHTO tipi beton kaplama tabakaları

Üstyapı (cm)	Trafik Kategorileri ( $T_{8,2}$ : 8,2 tonluk eşdeğer standart dingil yükü tekrar sayısı - Yolun hizmet ömrü boyunca)								
	3-10 Milyon	10-20 Milyon	20-30 Milyon	30-40 Milyon	40-50 Milyon	50-65 Milyon	65-80 Milyon	80-100 Milyon	100-160 Milyon
Beton Kaplama	23	26	28	30	31	32	33	35	36
Kırmataş Alttemel	15	15	15	15	20	20	20	20	20



Beton kaplamanın altında, Alman gereksinimlerine göre zayıf bir beton temel tabakası ve bir kum-çakıl alttemel tabakası kullanılmaktadır. Çizelge 3.5, trafik türlerine göre Alman tipi beton kaplama katmanlarını göstermektedir.

Çizelge 3.5. Trafik kategorilerine göre Almanya tipi beton kaplama tabakaları

Üstyapı (cm)	Trafik Kategorileri (T <sub>8,2</sub> : 8,2 tonluk eşdeğer standart dingil yükü tekrar sayısı - Yolun hizmet ömrü boyunca)								
	3-10 Milyon	10-20 Milyon	20-30 Milyon	30-40 Milyon	40-50 Milyon	50-65 Milyon	65-80 Milyon	80-100 Milyon	100-160 Milyon
Beton Kaplama	23	24	24	25	25	25	25	27	27
Zayıf Beton Temel	15	15	15	15	15	15	15	15	15
Kum-Çakıl Alttemel	38	39	39	40	40	40	40	42	42

Üstyapı tipi beton kaplamanın altında bitümlü bir ara yüzey tabakası, zayıf bir beton temel tabakası veya bir plentmiks temel tabakası ve bunun altındaki kırma taş alttemel tabakası Belçika tasarım sürecinde dikkate alınmaktadır. Çizelge 3.6, çeşitli trafik kategorileri için Belçika tipi beton kaplama katmanlarını göstermektedir.

Çizelge 3.6. Trafik kategorilerine göre Belçika tipi beton kaplama tabakaları

Üstyapı (cm)	Trafik Kategorileri (T <sub>8,2</sub> : 8,2 tonluk eşdeğer standart dingil yükü tekrar sayısı - Yolun hizmet ömrü boyunca)								
	3-10 Milyon	10-20 Milyon	20-30 Milyon	30-40 Milyon	40-50 Milyon	50-65 Milyon	65-80 Milyon	80-100 Milyon	100-160 Milyon
Beton Kaplama	20	20	20	20	21	21	21	23	23
Bitümlü Ara yüzey	0	6	6	6	6	6	6	6	6
Plentmiks Temel	30	20	0	0	0	0	0	0	0

Çizelge 3.6. (Devam) Trafik kategorilerine göre Belçika tipi beton kaplama tabakaları

Zayıf Beton Temel	0	0	20	20	20	20	20	20	20
Kırmataş Alttemel	15	15	15	15	15	15	15	15	15

Çeşitli sanayileşmiş ülkelerden gelen rijit üstyapı katalogları ve uygulamaları incelenmekte, derzli donatısız beton yollara ilişkin bilgilerin çoğuna ulaşılmaktadır.

Donatısız beton kaplamaların minimum 15 cm, maksimum 30 cm kalınlıkta olması tavsiye edilmektedir. Derzli donatısız beton kaplamalarda derzler genellikle yol boyunca 3,5 ila 4,5 metre genişliğinde ve 4 ila 6 metre uzunluğunda kesilmektedir (Pancar, 2012).

Beton, yapı gereği hava koşullarına göre tepki göstermektedir. Bu tepkiler betonun tasarımı iyi yapılmadıysa üstyapıya zarar verebilmektedir. Rijit kaplama yapıldıktan sonra oluşturulan derzler uygun yer ve aralıkta olursa beton plakanın istenilen yerden çatlak oluşmasına olanak sağlamaktadır. Yüksek trafik koşullarında derzler rijit yapının nasıl hareket etmesi açısından önem arz etmektedir. Ayrıca derzler için uygun derz dolgusu yapılması önemlidir.

Almanya'ya yapılan bir gezinin ardından, birçok ilgi çekici kullanımın belirtildiği bir teknik bülten yayınlanmaktadır. Yeni başlayanlar, rijit kaplama tasarımı ve inşaatı için Almanlar iyi tanımlanmakta ve eksiksiz bir tasarım kataloğu kullanmaktadır. Almanya'da geliştirilmiş dayanıklılık ve basınç dayanımına sahip yüksek kaliteli betonlar kullanılmaktadır. Almanya'da 25 yılı aşkın bir süredir yol kaplamalarının kullanılmasının nedenlerinden biri de bundan kaynaklanmaktadır (Larson ve diğerleri, 1993).

35 ile 65 MPa arasındaki basınç dayanımlarına sahip beton için, Almanya'da derzli donatısız beton kaplamalar için izin verilen maksimum kalınlık 26 santimetre olmaktadır. Ardışık enine derzler arasında maksimum 5 metre mesafeye izin verilmektedir. Uçucu küle izin verilmez ve diğer mineral karışımları önerilmemektedir. Betonun koymak için kullanılan yöntem en önemli değişikliklerden biri olmaktadır. Kaplamalar normalde her biri yaklaşık 7 cm uzunluğunda iki katmandan oluşmaktadır (Pancar, 2012).

İnce kesitle çalışmak daha iyi sıkıştırma ve daha az çatlak ile sonuçlanmaktadır, ancak yapım süresini arttırmaktadır (Larson ve diğerleri, 1993).

Güney Afrika turunun ardından yazılan raporlar da benzer sonuçlar göstermektedir. Güney Afrika'daki en önemli otoyol inşaatlarından biri 23 cm kalınlığında bir beton yüzey kullanmaktadır (Horne ve diğerleri, 1997). Bu projede derzli betonarme döşeme kullanılmaktadır. Katalog, derzli donatısız beton kaplamalar için maksimum kalınlık belirtmemektedir. Ancak, en büyük otoyollardan birinin 23 santimetre plaka kalınlığı kullandığı göz önüne alındığında, mümkün olan maksimum plaka kalınlığının 25 santimetre olduğunu varsaymak mantıklı olmaktadır. Bu projedeki kaplamanın altında 15 santimetre kalınlığında "çimentolu kırma taş" temel tabakası" kullanılmaktadır (Horne ve diğerleri, 1997).

Betonarme kaplamaların yanı sıra derzli donatısız beton kaplamalar için izin verilen maksimum kalınlık vardır. Değer bölgeye göre değişmekle birlikte genellikle yaklaşık 22,5 santimetre olmaktadır (Larson, 1993; Horne, 1997).

### **3.6. Türkiye’de Beton Yollar**

Türkiye’de ilk kez İstanbul’un taşıt trafiği yüksek mahallesi Mahmutbey’de beton yol döşenmiştir. Yaklaşık 0,5 kilometre uzunluğunda bir proje olan bu deneme yolunda Türkiye Hazır Beton Birliği ve Karayolları Genel Müdürlüğü işbirliği yapmıştır.

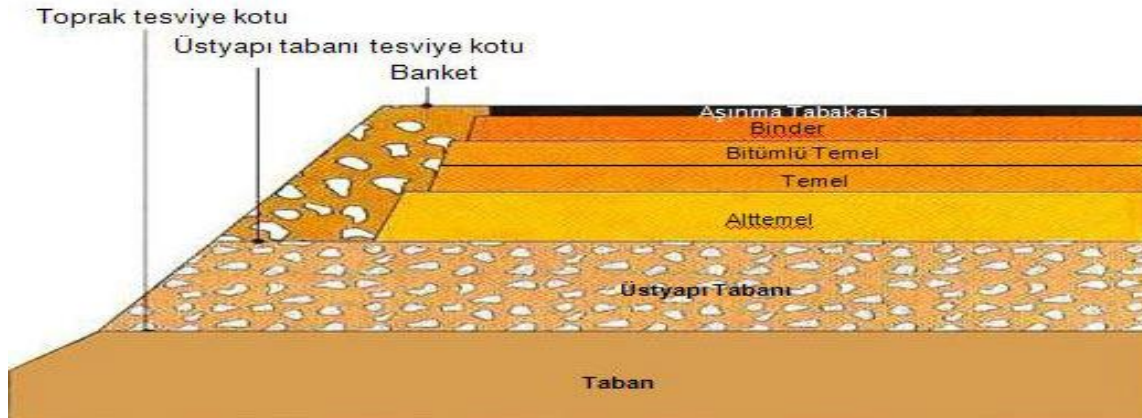
Mahmutbey’in ardından Afyon-Emirdağ arasında 2 kilometrelik deneme yolu yapılmıştır. Yolun kaplama kalınlığı 27 santimetre olarak belirlenmiş, derzli, donatısız beton yol olarak yapılmıştır. Kaplamada su-çimento oranı "0.45" olarak ayarlanmıştır. Beton kaplama çökme değeri 4 cm'dir. 0,2 kg/m<sup>3</sup> oranında hava sürükleyici kimyasallar kullanılmıştır. Afyon’da yaz aylarında kaydedilen maksimum sıcaklık 37.8 santigrat derece, kış aylarında kaydedilen en düşük sıcaklık ise -27.2 santigrat derece olmaktadır. Bu bulgular bölgenin çok sayıda önemli ısı metamorfozuna sahip olduğunu göstermektedir. Projede betonun basınç dayanımını artırmak için silika dumanı kullanılmıştır. 375 kg/m<sup>3</sup> çimentoya 17.5 kg/m<sup>3</sup> silis dumanı eklenmektedir. Betonun 28 günlük basınç dayanımı "50 MPa" da test edilmektedir (Pancar, 2012).

Afyon'daki rijit kaplamanın ardından İstanbul'un Hasdal semtinde 3,5 kilometre uzunluğunda rijit kaplama yapılmıştır. Bu başlangıçların ardından ülkemizin bazı yerlerinde ve belediyelerde beton yol uygulaması yapılmaktadır.

### 3.7. Esnek Üstyapıyı Oluşturan Tabakalar ve Görevleri

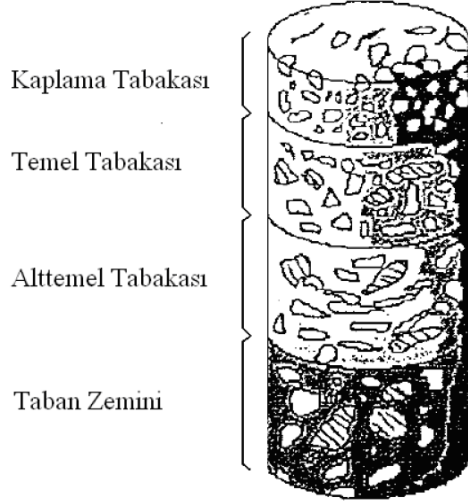
Esnek kaplama, asfalt kaplama katmanlarından oluşan bir kaplama türü olmaktadır. Esnek üstyapı, tesviye yüzeyi ile sıkı bir temas sağlamakta ve dingil trafik yüklerini üstyapı, temel ve alttemel katmanları aracılığıyla temel katmanına dağıtmaktadır. Esnek üstyapı kesiti Şekil 3.4'te verilmektedir.

Katmanlı esnek bir üstyapının yük taşıma kapasitesi, montajı oluşturan katmanların üstyapı direncine katkısı ve yükü dağıtmadaki baskın karakteri ile belirlenmektedir. Katmanların yaydığı yük, iyi tasarlanmış bir kaplamanın tabanına ulaşmakta, önemli deformasyonlar olmaksızın tabanın kaldırabileceği bir düzeye indirilmektedir.



Şekil 3.4. Esnek üstyapı kesiti

Üstyapının katmanlarını oluşturan malzemeler farklı özelliklere sahip olmaktadır. Şekil 3.5’te görüldüğü üzere alttemel ve temel katmanlarında granüler malzemeler kullanılmaktadır. Kaplama katmanında ise bitümlü karışımlar kullanılmaktadır.



Şekil 3.5. Tipik esnek üstyapı numunesi

Taban zemin birleşimleri doğrultusunda üstyapıyı destekleyecek şekilde geliştirilmektedir. Üstyapının performansı, taban zeminin fiziksel niteliklerine ve durumuna yakından bağlı olmaktadır.

### 3.8. Esnek Üstyapı Tabakaları

#### 3.8.1. Taban zemini

Taban zeminin taşıma kapasitesi, esnek bir üstyapının davranışına doğrudan bağlı olmakta, alt zeminin gereksinimlere göre hazırlanması üstyapı tasarımında kritik öneme sahip olmaktadır. Temel katlarındaki yeraltı suyu seviyesi için uygun yer altı drenajı yapılmalıdır. Yüzeysel suları ise üstyapı kaplama yüzeyinden uzak tutulmalıdır. Yol gövdesi, inşaat sırasında ve yolun ömrü boyunca stabil kalması için suya karşı korunmalıdır. Donma-çözülme olayında önemli don kabarması ve temelin düşük taşıma kapasitesi yol kaplamalarına zarar verebilmektedir.

### **3.8.2. Alttemel tabakası**

Tabii zemin üzerinde bulunan ve temelden gelen trafik yüklerinin zemine dağıtılmasını sağlayan katmandır.

Alttemel tabakasının üst etkileri taşımanın yanı sıra bir başka rolü de, kaplama drenajına yardımcı olmak ve alt katmanlardan sızıntıyı kontrol etmektir. Donmaya duyarlı tabana karşı filtre stabilitesi, granüler alt taban malzemesinin bir özelliği olmaktadır. Sonuç olarak, iyi bir ince ve orta kum karışımına sahip olmalıdır. Trafiğin etkisi altında, su aşağıdan yukarıya doğru yükselirken, ince taneler yüzmemelidir veya alttemel taneleri arasına girmemelidir.

### **3.8.3. Temel tabakası**

Temel tabakası üzerine gelen yükleri taşıyarak alttemele aktarmaktadır. Yüksek trafik yüklerine dayanabilmeli, don olaylarına ve su emme kapasitesine sahip olmalıdır.

Temel katmanı, belirli özelliklere sahip yüksek kaliteli malzemelerden yapılmaktadır. Karayolları Teknik Şartnamesi'nde (Karayolları Esnek Üstyapı Proje Tasarım Rehberi, 2000) verilen temel formatlardan birini kullanmak mümkün olmaktadır.

### **3.8.4. Granüler temel tabakası**

Granüler temel tabakası için, çakıl, kırma çakıl, kırma cüruf, kırma taş ve diğer benzer malzemeler kullanılmaktadır. Modifiye edilmiş proktorde yüzde 98 oranı sağlanmalıdır. Granül temelin kalınlığı en az 15 cm olmalıdır (Ağar ve Umar, 1985).

### **3.8.5. Plentmiks temel tabakası**

Ezilmiş çakıl, ezilmiş cüruf, kırma taş ve ince parçacıklar bu karışımı oluşturmaktadır. En az iki tür agrega bulunmaktadır: kaba ve ince. %100 modifiye proktor sunabilmelidir. Plentmiks tabakasının kalınlığı en az 15 cm olmalıdır (Ağar ve Umar, 1985).

### **3.8.6. Çimento bağlayıcılı granüler temel tabakası**

Çakıl, ezilmiş cüruf, kırma taş ve ince parçacıklar bu karışımı oluşturmaktadır.

### **3.8.7. Penetrasyon makadam temel tabakası**

İşlem, kaba agreganın alttemele yerleştirilmesini ve ince malzeme ile sıkıştırılmasını içermektedir.

### **3.8.8. Rolled asfalt temel tabakası**

Asfalt çimentosu, dolgu, ince ve iri malzeme karıştırılarak yapılmaktadır.

### **3.8.9. Bitümlü temel**

Kırılmış ve elenmiş iri agregaya, ince agregaya mineral dolgu ve bitümden yapılmaktadır.

### **3.8.10. Bitümlü makadam temel**

Kırmataş ve cüruf, ince agregaya ile karıştırılarak bitümlü makadam temel elde edilmektedir.

### **3.8.11. Kaplama tabakası**

Genellikle bitüm ve agregaya karışımından oluşmaktadır. Karayolları Esnek Kaplamalar Projelendirme Rehberi'ne göre kaplama tabakası yüzey kaplaması veya bitümlü beton kaplama olabilmektedir.

"Araçlar için yeterli yuvarlanma yüzeyi sağlamak, aşınmayı önlemek ve yapıya sızan yüzey suyu miktarını ve temel tabakasına iletilen kesme gerilmelerini sınırlamak" için temel tabakasının üstünde oluşturulan bir tabaka olmaktadır (İlıcılı ve diğerleri, 2001).

Üstyapı kaplamasının direkt tekerlek yüküne maruz kalan tabakasıdır. Kaplama tabakası aşınmaya karşı dirençli olmalıdır. Sürüş için düzgün ve güvenli olmalı, yolu büyük deformasyonlara karşı korumalıdır.

### 3.9. Rijit Üstyapı Tasarımında Çevresel Etkenler ve Trafik

#### 3.9.1. Rijit üstyapı tasarımını etkileyen çevresel faktörler

Üstyapılar tasarlanırken güvenilirlik, güvenlik ve kullanılabilirlik gibi ihtiyaçların karşılanması istenmektedir.

İklim koşulları, üstyapının taşıma kapasitesi üzerinde, çimentolu katmanlardaki termal deformasyonlardan ve malzeme özellikleri üzerindeki nem içeriğinden daha büyük bir etkiye sahip olmaktadır. Hava sıcaklığı ve güneş radyasyonunun termal model üzerinde etkisi bulunmaktadır (Khazanowich, Yu, Rao, Galasova, Shats ve Jones, 2000).

Katılarda ısı iletiminin genel teorisine dayanan birçok model ve ısı kaynaklı yapısal değişiklikleri türetmek için deneysel veriler bulunmaktadır. Bir kaplama tasarlanırken dikkate alınması gereken bir başka iklim sorunu da don etkisi olmaktadır. Donma sürecinin neden olduğu "emme", suyun üst katmanlara yönlendirilmesine yol açmakta, bu da ayrılmış buz tabakalarının ve merceklerin oluşmasına ve yukarı doğru yüzey kabarmasına neden olmaktadır (Tanyıldızı, 2010).

Betona katkı maddesi eklenmesi ve dayanıklı tabakaların kullanılması önerilmektedir. Yağış, nem içeriği üzerinde en büyük etkiye sahip olmaktadır. Granül malzemenin taşıma kapasitesindeki bir azalma, nemdeki bir değişiklikten ve su seviyesindeki bir artıştan kaynaklanabilmektedir.

Yüzey suyunun neden olduğu hasarı önlemek için suyun tahliyesini sağlamak için enine bir eğim gerekli olmaktadır. Enine eğimler %4 ile %6 arasında alınmaktadır. Öte yandan yol yüzeyi, yeraltı suyu seviyesinden uygun şekilde yükseltilmektedir. Suyla ilgili sorunlar, yeraltı drenajları kurularak ve düzenli olarak drenaj hendeklerinin bakımı yapılarak çözülebilmektedir. Drenaj hendekleri ve moloz veya çakılla doldurulmuş drenaj boruları veya çok şeffaf bir tabaka, yeraltı drenajı oluşturmak için kullanılabilir (Pfeifer, 2001).

Kırsal yollardaki kaplamalar, tasarım, yapım ve bakıma bağlı olarak benzersiz özelliklere sahip olmaktadır. Bu kategorideki güzergâhlar için genellikle üstyapı tasarlamak bu



bağlamda zor olmaktadır. Bu tür yöntemler, döşemesi basit, inşası ve bakımı düşük maliyetli ve çok dik eğimlerde güçlü kayma direncine sahip kaplamaları gerektirmektedir.

### **3.9.2. Rijit üstyapı tasarımını etkileyen trafik faktörleri**

Üstyapı kaplamaları, giderek yaygınlaşan ve bir ülkenin ticari faaliyetleri için gerekli olan önemli hacim ve ağırlıktaki kamyon ve otobüsleri taşımaktadır. Bu nedenle bu yapılarda kullanılan malzemelerdeki herhangi bir kusur veya zayıflık, şerit arızaları ve onarım, iyileştirme veya yeniden inşa ile sonuçlanmaktadır. Bu bakımdan trafik sayısı yüksek olan karayolları son derece güvenli olmalıdır. Kaplama üzerine minimum bakım ile çok büyük yükleri uzun süreler boyunca güvenli bir şekilde kaldırabilmelidir.

### **3.9.3. İnşa sürecinde dikkat edilmesi gereken noktalar**

Her bir üstyapı türünün farklı koşulları bulunmaktadır. Bu koşulların dikkate alınarak inşa edilmesi üstyapı için önem arz etmektedir.

Yeraltı toprağındaki yatay ve dikey değişimler, nem içerikleri, yoğunluklar ve su seviyesi derinlikleri, kaplamanın tek tip ve tutarlı bir platform tarafından desteklenmesini garanti etmek için kaplama tasarım süreci boyunca ele alınmaktadır. Bu bileşenleri ölçmek için saha ve laboratuvar test prosedürleri kullanılabilir. Daha da önemlisi, şişen zeminler ve dona karşı hassas zeminler gibi belirli yeraltı özellikleri, kaplama katmanlarının yerleştirilmesinden önce değerlendirilmekte ve kaplama tasarımına dahil edilmektedir. (Tanyıldızı, 2010).

Alt zemini hazırlarken göz önünde bulundurulması gereken bir diğer önemli faktör don kabarması olmaktadır. Don kabarmasının sorun olduğu durumlarda, hassas zemin kaplamaları donmaya karşı dayanıklı malzemelerle değiştirilmektedir.

Rijit üstyapı kaplamasında çatlak oluşumunu kontrol altında tutmak için, enine derzler inşa edilirken plakta uygun derinlikte testere kesimleri gerekmektedir. Maksimum derz kesme hızına ulaşmak için kırılma gelişimini kontrol etmek için minimum bir kesme derinliği de arzu edilmektedir. Aynı zamanda, agrega kenetleme yoluyla yüksek bir yük transferi elde etmek için kesme donatısı olmayan derzlerde talaş derinliğinin sınırlandırılması tavsiye

edilmektedir. Stabilize temellerin yarattığı sürtünme problemine bir başka çözüm de işlenmiş temelerde önerilen enine derz boşluklarında çatlak oluşumunu önlemek için işlenmiş temel tabakası yüzeyinde çentik açmaktır (Tanyıldızı, 2010).

#### **3.9.4. Rijit üstyapı-esnek üstyapı karşılaştırılması**

Bir üstyapı tipinin seçimi, birçok faktöre bağlı ve geniş perspektifle irdelenmesi gereken bir konudur. Bir üstyapı seçimine karar verilirken üstyapı çeşitleri her yönden karşılaştırılmalı, ülke şartları da dikkate alınarak karar verilmelidir.

Esnek ve rijit kaplamaların trafik yükünü zemine taşıma şekli farklı olmaktadır. Tekerlek gerilmeleri altında, alttemel, temel ve üstyapı fraksiyonlarından oluşan esnek üstyapılar eğilmekte ve her katman, yükü alttaki katmana yayarak dağıtmaktadır.

Sonuç olarak, alt zemine ulaşan ağırlık, geniş bir platforma yayılmaktadır. Rijit kaplamalar, bir alt zemin ve beton plaktan inşa edilmektedir. Beton plak, alt zeminden önemli ölçüde daha yüksek bir elastisite modülüne sahiptir. Beton yol, zeminde oturan bir kiriş görevi görmektedir ve trafik yüklerini daha büyük bir platforma dağıtarak alt zemine iletmektedir. Rijit kaplama, trafiğin yoğun olduğu ve yıllık trafik artış hızının yüksek olduğu yollar için düşünülmektedir. Asfalt betonu viskoelastik davranış gösteren bir maddedir. Karasal iklimde sahip yerlerde yazın tekerlek izine dayanıklı, kışın kırılmayan bitümlü bir kombinasyon tasarlamak zor olmaktadır. Bazı alanlarda rijit kaplamalar daha uygundur. Bu durumda beton plaklar arasındaki dikişler kış mevsiminde çok fazla açılmaktadır (AASHTO, 1986). Orijinal olarak uygulandığında, her iki kaplama türü de güvenli ve keyifli bir seyir sağlamaktadır. Parlak tonları nedeniyle, beton yollar geceleri kolayca görülebilirken, siyah asfalt betonlu yollar tam tersi olmaktadır. Kaplama tipi seçiminde en önemli husus, uzun bir zaman periyodu veya projenin ömrü boyunca tahmin edilen toplam ekonomik maliyet olmaktadır. Bir yolun toplam fiili ekonomik maliyeti için, projenin ilk inşaat maliyeti, devam eden bakım giderleri ve onarım faaliyetlerinden kaynaklanan kullanıcı gecikmeleri toplanmaktadır. Beton yolların ilk yapım maliyeti asfalt yollara göre daha fazla olmaktadır. (Sulten, 2001).

Çok sayıda kriter birbiriyle çatıştığı için her alanda faydalı sonuçlar üretecek bir kaplama tipi uygulamak zor olmaktadır (Vqyeux, 2001). Bu gerekçe ile üstyapı kaplama türü seçilirken yoldan beklenen performans ve ülkemizin farklı koşulları göz önünde bulundurulmakta ve mümkün olan en iyi sonucu elde etmek gerekmektedir.

### **3.10. Esnek üstyapılarda bozulmaya sebep olan ve bozulmayı hızlandıran etmenler**

Hatalı tasarım yöntemleri ve malzemeleri, trafikteki hızlı artışlar, sert iklim koşulları, yol bakımı sırasında projeye ve tekniğe uymayan inşaatlar, bakım ünitesinin daha az etkin çalışması ve diğer birimlerle koordinasyon eksikliği, bozulmanın başlıca nedenleri olmaktadır. (Doğan, 2006).

Doğan, (2006)'a göre kaplamada kullanılan agreganın granülometrisi "düzenli, esnek ve standarda uygun" olmalıdır. Çürüyen, hızlı cilalanan veya çok sayıda küresel agrega içeren malzemelerden kaçınılmalıdır. Bitümlü bağlayıcı gerekenden az veya fazla olmamak kaydıyla uygun miktarlarda uygulanmalıdır.

### **3.11. Esnek üstyapılarda proje ve yapım hatasından meydana gelen bozulma tipleri**

Zayıf karıştırma hesaplamaları veya üretim kontrolünün olmaması nedeniyle kaplamalar bozulmaktadır. Tasarım hatası olmayan esnek üstyapılar ise hem çevrenin hem de tekrarlayan dingil yüklerinin etkisiyle zamanla bozulmaktadır.

Üstyapı bozulması, mühendislik terminolojisinde "üstyapının başlangıçtaki fiziksel özelliklerinden herhangi bir sapma" olarak tanımlanmaktadır. Kaplamanın kendine has özelliklerinin bir sonucu olarak bozulma meydana gelebilmektedir. Uygun olmayan tasarım süreci ve malzemeler kullanılmakta ve bozulma meydana gelebilmektedir. (İyınam, 1997). Esnek bir üstyapının proje ömrü boyunca yeterli stabiliteye sahip olması, hava koşullarına dayanıklı olması, zemin altı oturmalarına karşı esnek olması, güvenli olması ve kaygan olmaması beklenmektedir. (Karaşahin ve Tığdemir, 1995).

Esnek üstyapı kaplaması, proje ve yapım kusurları kullanılan bitüm miktarına, zeminlerin sıkışma derecesine, kullanılan agregaların uygunluğuna, kullanılan bitüm cinsine ve yapım sırasındaki hava koşullarına bağlı olarak bozulmaktadır.

### 3.12. İmalâttan Hemen Sonra Oluşan Bozulmalar

#### 3.12.1. Terleme: Kasma

Sıcaklığın etkisiyle karışımdaki asfalt yüzeye çıkmakta ve yüzeyde kalın bir asfalt tabakası oluşturmaktadır. Yüzeydeki çakıllar kasma sonucu tamamen asfalt tabakasının altında kaldığından sürtünme katsayısı düşmektedir.

Kasma, sıcak havalarda ve asfalt konsantrasyonu yüksek karışımlarda daha sık görülmektedir. Asfalt, aks yüklerinin çok yüksek olduğu durumlarda da basınç altında yüzeye çıkabilmektedir. Karışımdaki asfalt oranı yüksek olmasına rağmen boşluk oranı düşük ise sıcak havalarda genleşen ve boşluk bulamayan asfalt tekrar yüzeye çıkma eğiliminde olmaktadır. Çok kalın uygulanan astar veya yapışkan tabakalar da kasmaya neden olabilmektedir (Ayçiçek, 2011). Resim 3.2, Resim 3.3 ve Resim 3.4'te kasma türleri görülmektedir.



Resim 3.2. Hafif şiddette kasma



Resim 3.3. Orta şiddette kuma

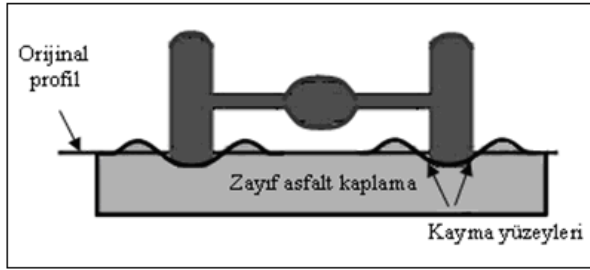


Resim 3.4. Yüksek şiddette kuma

Aşırı sıcak havalarda, agreganın terlemenin görüldüğü yerlerin granülometrisine uygun boyutta yerleştirilmesi ve gerekirse merdane ile sıkıştırılması ile bu tür kusurlar giderilebilmektedir.

### 3.12.2. Erken tekerlek izi problemi

Bunun nedeni, üstyapının maruz kaldığı gerilmelerin bitümlü malzemenin mukavemetini aşmasıdır. "Bölgenin yüksek sıcaklığı" ve "ağır ve çok sayıda tekrarlanan yükler" gibi çevresel faktörler, yüksek bitüm yüzdesi ve yetersiz karışım sıkıştırması gibi asfalt tabakasına bağlı nedenlerin yanı sıra erken tekerlek izi oluşumuna neden olmaktadır. Kombinasyonda yuvarlak malzemeleri kullanmak da asfalt karışımının kayma direncini azalttığı için, sıcak bitümlü karışımındaki dolgu malzemesinin fazlalığı erken tekerlek izi oluşumunun nedenlerinden biri olarak kanıtlanabilmektedir. Resim 3.5 ve Resim 3.6'da tekerlek izi oluşumu ve oluklanması görülmektedir.



Resim 3.5. Zayıf asfalt tabakasında tekerlek izi oluşumu

Tekerlek izi daha çok sıcaklıkların yüksek olduğu yaz aylarında zayıf asfalt karışımlarında görülmektedir. Tekerlek izi oluşumu bir bitümlü bağlayıcı problemi olarak tanımlanmaktadır.

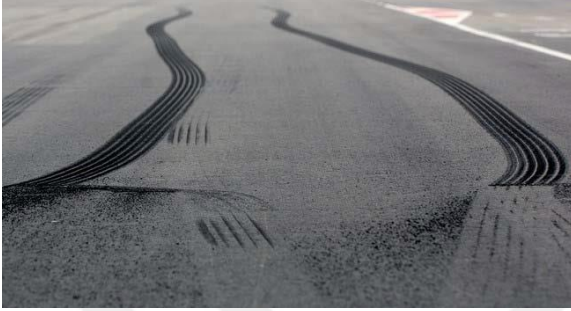


Resim 3.6. Tekerlek izi oluşumu ve oluklanma



### 3.12.3. Tekerlek profil izi oluşması

Sıcak havalarda, karışımdaki bitümün yüzeydeki yansıması olarak ortaya çıkmaktadır ve kaplamada ağır araçların lastik izleri belirlemektedir. Resim 3.7’de tekerlek izi görülmektedir.



Resim 3.7. Tekerlek izi

### 3.12.4. Düşük sıcaklık çatlakları: Enine çatlaklar

Soğuk havalarda asfalt kaplama tabakası büzülerek düşük sıcaklık çatlaklarına neden olmaktadır. Kaplama küçüldükçe gerilimler gelişmektedir. Çekme gerilimi, kaplamadaki bazı noktalarda çekme mukavemetini aşarak asfaltın kırılmasına neden olmaktadır. Düşük sıcaklık kırıklarına tek bir düşük sıcaklık olayı neden olmaktadır (Ağar ve Umar, 1985). Düşük sıcaklık çatlakları trafik yönüne dik olarak düzenli aralıklarla ortaya çıkan enine kırıklar olarak tanımlanmaktadır.

Düşük sıcaklıkta çatlama, bitümlü bağlayıcı kullanımını gerektirmektedir. Sert asfaltlar genel olarak düşük sıcaklıkta çatlama daha yatkın olmaktadır. Bu asfalt türleri aşırı oksidasyona meyilli olmakta veya karışımlarında önemli oranda hava boşluklarına sahip olmaktadır. Aşırı eskimiş bitümlü bağlayıcılar düşük sıcaklıkta çatlama neden olmaktadır. Sıcaklık çatlamasını önlemek için yaşlanmaya dirençli asfalt bağlayıcılar kullanılmakta ve aşırı oksitlenmemesi için karışımdaki hava boşluğu miktarı kontrol altında tutulmaktadır (Ağar ve Umar, 1985). Düşük sıcaklık çatlakları, hafif, orta ve yüksek yoğunluklu termal çatlaklar olmak üzere üç kategoriye ayrılmaktadır. Resim 3.8, Resim 3.9 ve Resim 3.10’da sıcaklık çatlak türleri görülmektedir.



Resim 3.8. Hafif şiddette termal çatlak



Resim 3.9. Orta şiddette termal çatlak



Resim 3.10. Yüksek şiddette termal çatlak



### 3.12.5. Soyulma

Soyulma, agrega tanelerini saran ince asfalt kaplama, suyun agregadan trafik ve kil nedeniyle ayrılarak agrega tanelerini açıkta bırakması olarak tanımlanmaktadır. Soyulmanın nedenleri arasında yüzey kaplamasının inşası sırasında çok soğuk hava ve yüzey kaplamasının yapımından hemen sonra yolun trafiğe hızla yeniden açılması sayılabilmektedir. Resim 3.11’de agrega soyulması görülmektedir.



Resim 3.11. Agreganın soyulması

### 3.13. Uzun vadede oluşan bozulmalar

#### 3.13.1. Çatlaklar

Çatlaklar, dingil yüklerinin çoğunluğu ve bunların aşırı tekrarlanması ile oluşmaktadır. Kaplama tabakası üzerinde aks ağırlığının neden olduğu gerilmeler kaplama malzemesinin mukavemetini aştığında çatlaklar oluşmaktadır. Ani araç hızlanması veya yavaşlamasından kaynaklanan yatay kuvvetler de buna neden olabilmektedir. "Nem ve sıcaklık değişimleri, yüksek agrega kullanımı, asfaltta kimyasalların buharlaşması, stabilizasyon veya çimento ile kür sırasında hacim değişimleri" gibi dış değişkenler, kendiliğinden veya trafikle bağlantılı olarak çatlaklar oluşturabilmektedir (Ayçiçek, 2011).

Çatlamada en önemli faktör asfaltın çekme dayanımı olmaktadır. Soğuk havalarda çekme mukavemeti artmakta, kademeli yüklemelerde azalmaktadır (Ayçiçek, 2011).

### 3.13.2. Küçük çukurlar

Mevsimsel hava koşulları, kötü yapı, ağır aks yükleri nedeniyle yüzeyde 5 milimetre ile 10 santimetre arasında veya daha fazla, 10 santimetre ile 30 santimetre arasında veya daha büyük çapta boşluklar bulunmaktadır. Bu bozulmalar, diğer bozulma biçimleri gibi, sürüş konforunu azaltmakta ve özellikle sürüş güvenliği açısından bir risk oluşturmaktadır (Arık, 1998). Çukurlar hafif, orta ve yüksek yoğunluklu çukurlar olmak üzere üç ana tipe ayrılmaktadır (Resim 3.12, Resim 3.13 ve Resim 3.14).



Resim 3.12. Hafif şiddette çukur



Resim 3.13. Orta şiddette çukur



Resim 3.14. Yüksek şiddette çukur

### **3.14. AASHTO Projelendirme Denklemindeki Kaplama Parametreleri ve Rijit Üstyapı Beton Kaplama Kalınlığına Etkisi**

AASHTO yaklaşımı, yol testi sonuçlarının ve standart aks yükü tekrarlarının kaplama performansı üzerindeki etkisi dikkate alınarak oluşturulmaktadır. Üstyapının servis edilebilirliğindeki kayıp, esnek üstyapıların tasarımında olduğu gibi aynı şekilde dikkate



alınmaktadır. Eş. 3.8, beton kaplamanın performansı için AASHTO yol testinden türetilmektedir.

$$\begin{aligned} \log_{10} W_{8,2} = & Z_R S_0 + 7,35 \log_{10} (D + 1) - 0,06 + \log_{10} \frac{[\text{PSI}/(4,5 - 1,5)]}{1 + [1,624 \times 10^7 / (D + 1)^{8,46}]} \\ & + (4,22 - 0,32 P_t) \log_{10} \frac{S'c Cd [D^{0,75} - 1,132]}{215,63 J [D^{0,75} - \frac{18,42}{\frac{E_c}{k^{0,25}}}]} \end{aligned} \quad (3.8)$$

$W_{8,2}$ : 8,2 ton eşdeğer tek-dingil yükü tekrür sayısı

$Z_R$ : Standart normal sapma

$S_0$ : Trafik tahmini ve performans tahmininin bileşik standart hatası

$D$ : Rijit üstyapı beton kaplama kalınlığı (inç)

$\Delta\text{PSI}$ : P0-Pt (Servis kabiliyetinde azalma miktarı)

$P_0$ : Başlangıç servis kabiliyeti indeksi

$P_t$ : Nihai servis kabiliyeti indeksi

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

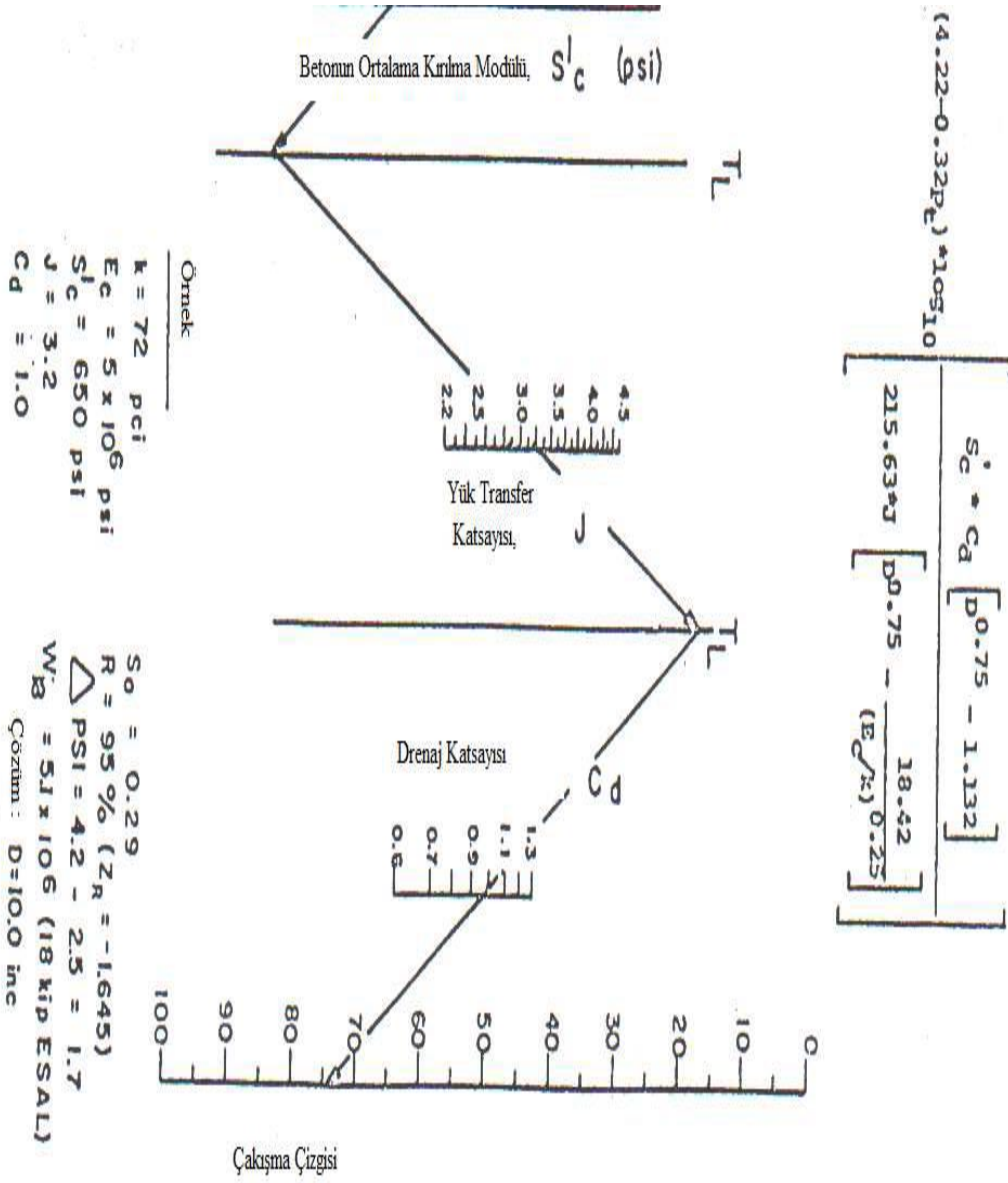
$J$ : Yük transfer katsayısı

$Cd$ : Drenaj katsayısı

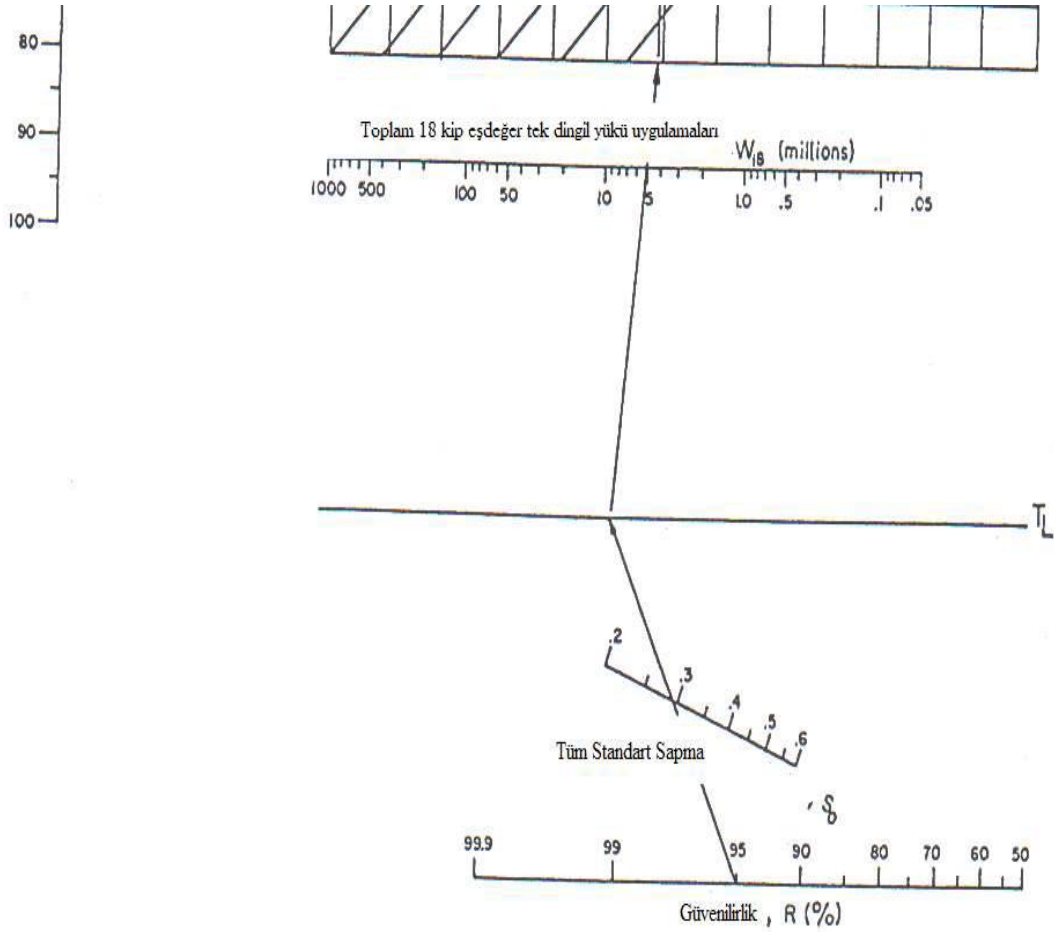
$E_c$ : Betonun elastisite modülü (psi)

$k$ : Yatak katsayısı (pci)

Eş 3.8'deki eşitlikten, Şekil 3.6'daki abak geliştirilmektedir. Abak yardımı ile beton kaplama kalınlığı kolaylıkla tespit edilebilmektedir.



Şekil 3.6. Beton kaplama kalınlığının tayini (AASHTO, 1986)



Şekil 3.6.(Devam) Beton kaplama kalınlığının tayini (AASHTO, 1986)

### 3.14.1. Efektif zemin yatak katsayısı

"Etkili elastisite modülü" esnek kaplamalarda zeminin taşıma kapasitesini, "efektif yatak katsayısı" ise beton kaplamalarda zeminin taşıma kapasitesini tanımlamaktadır. Zemin yatak katsayısı ve elastisite modülü arasında güçlü bir ilişki bulunmaktadır (Tanyıldızı, 2010).

$$k = M_R / 19.4 \quad (3.9)$$

Burada;

k : Yatak katsayısı (Plaka yükleme testi ile) (pci)

$M_R$  : Taban zemini esneklik modülü (Üç eksenli test ile) (psi)

k değeri, toprak nem içeriği ve yoğunluğu dahil olmak üzere çeşitli faktörlerden etkilenmektedir. k değeri, zemine ait birçok faktöre bağlı olarak değişiklik göstermektedir.

### 3.14.2. Betonun elastisite modülü

Betonun elastisite modülü aşağıdaki denklemden bulunabilmektedir (Eş. 3.10)

$$E_c = 3250 \sqrt{f_{ck}} + 1400 \quad (3.10)$$

$E_c$  : Betonun elastisite modülü (Mpa)

$f_{ck}$  : Betonun karakteristik silindir basınç mukavemeti (N/mm<sup>2</sup>)

### 3.14.3. Betonun kopma modülü: eğilmede çekme mukavemeti

28 günlük standart beton kirişler üzerindeki son nokta yüklemesinin ortalama değeridir. Kopma modülü hesabı için dayanım değerinin denklemini ve standart sapma yüzdesinin normal dağılımı kullanılmaktadır.

$$S'_c = S_c / Z(SD_s) \quad (3.11)$$

$S'_c$  : Beton kopma modülünün tahmini ortalama değeri (psi)

$S_c$  : Beton kopma modülünün tasarım değeri (psi)

$SD_s$  : Beton kopma modülünün tahmini standart sapması (psi)

$Z$  : Standart normal değişim

%20 dağılım için  $Z = 0,841$

%15 dağılım için  $Z = 1,037$

%10 dağılım için  $Z = 1,282$

%5 dağılım için  $Z = 1,645$

%1 dağılım için  $Z = 2,327$

Bu çalışmada mukavemeti tasarım mukavemetinden daha az olan maksimum numune sayısı dikkate alınmaktadır. Yani, yüzde 95 güven için " $Z = -1.645$ " kullanılmaktadır.

### 3.14.4. Yük transfer katsayısı

Yük aktarım katsayısı, beton kaplamanın derzlerde ve çatlaklarda yükü iletme kapasitesinin bir ölçümü olmaktadır. Beton kaplamaya aktarılan bir yük, derz gibi süreksiz yerlerde bir plakadan diğerine yükün iletilmesi için agrega kenetleme, bağlantı çubuğu ve bağlantılı banket betonu gerektirmektedir.

Banketler beton ise ve yol kaplaması ile banket bir mekanizma ile bağlı ise veya beton banket 90 cm'den geniş ise yük transferi vardır. Hesaplamalarda "J=2,71" kullanılmaktadır.

Çizelge 3.3. Tavsiye edilen yük transfer katsayıları (AASHTO 1993)

Banket	Asfalt		Beton Kaplama	
	Var	Yok	Var	Yok
Kaplama Tipi	J	J	J	J
Donatısız Derzli	3,2	3,8 - 4,4	2,5 - 3,1	3,6 - 4,2
Donatılı Derzli	3,2	3,8 - 4,4	2,5 - 3,1	3,6 - 4,2
Sürekli Donatılı Derzsiz	2,9 - 3,2	-	2,3 - 2,9	-

### 3.14.5. Drenaj katsayısı

Çizelge 3.8 beton kaplamalar için kabul edilebilir drenaj katsayısı değerlerini göstermektedir.

Hesaplamalarda drenaj katsayısı (Cd) 1 alınmaktadır.

Çizelge 3.4. Tavsiye edilen drenaj katsayıları

Drenaj Kalitesi	Suyun Uzaklaşma Süresi	Kaplamanın doygunluk seviyesine yakın su içeriğine maruz kaldığı sürenin yüzdesi			
		<%1	%1-5	%5-25	>%25
Çok İyi	2 saat	1,25-1,20	1,20-1,15	1,15-1,10	1,1
İyi	1 gün	1,20-1,15	1,15-1,10	1,10-1,00	1
Vasat	1 hafta	1,15-1,10	1,10-1,00	1,00-0,90	0,9
Kötü	1 ay	1,10-1,00	1,00-0,90	0,90-0,80	0,8
Çok Kötü	Dren yok	1,00-0,90	0,90-0,80	0,80-0,70	0,7



### 3.14.6. Servis yeteneği indeksi

Servis kabiliyeti indeksi Eş 3.12'deki denklem ile bulunmaktadır.

$$\Delta\text{PSI} : P_0 - P_t \quad (3.12)$$

$P_0$  :Başlangıç servis kabiliyeti indeksi

$P_t$  :Nihai servis kabiliyeti indeksi

### 3.15. Lineer Regresyon (LR)

Lineer regresyon, tamamen lineer değişkenlerden oluşan bir regresyon modelini ifade eder. Bu değişkenlerin veri setinde tahmin edilecek değişkene etki eden değişkenler sabit değer olarak kabul edilmektedir. Bağımsız değişkenlerin tahmin edilecek değişkene etkisi bir katsayı ile gösterilmektedir. Regresyon katsayısı olarak adlandırılan bu değer değişkenin bağlılık derecesini göstermektedir. Bağımsız ve bağımlı değişken arasında bir neden sonuç ilişkisinin bulunması regresyon analizinde önem arz etmektedir.

Birbirleri arasında neden-sonuç bağlantısı bulunan bir veya birden fazla değişkenin arasındaki bağlantıyı belirlemek ve bu bağlantıyı kullanarak tahminler yapabilmesi için kullanılan istatistiksel bir yöntem olan regresyon analizi, bağımsız ve bağımlı değişkenler arasındaki bağlantıyı matematiksel olarak açıklamayı ve bu bağlantıyı bir modelle tanımlayabilmeyi amaçlamıştır. Eş 3.13'de lineer regresyonun genel formülü yer almaktadır.

$$Y_i = (\beta_0 + \sum_{i=1}^N \beta_i x_i + \epsilon_i) \quad (3.13)$$

Bu eşitlikte,  $x_i$  ( $i = 1, \dots, N$ ) bağımsız değişkenleri,  $y$  bağımlı değişkeni,  $\beta$  regresyon katsayılarını ve  $\epsilon$  hatayı temsil etmektedir.

Lineer regresyon metodunda kullanılan bağımsız değişkenler için oluşturulan formül Eş 3.14'de verilmiştir.

$$Y_i = (\beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2) \quad (3.14)$$

### 3.16. Yapay Sinir Ağları (YSA)

Warren McCulloch ve Walter Pitts'in 1943 yılındaki oluşturdukları yapay sinir ağ modeli insan beyninin hücresel çalışmaları esası ile matematiksel hesaplamaların sayısallaştırma yöntemlerinin başlangıcı olarak gösterilmektedir. YSA'ya yaptırılanlarının arasında başta tahmin olmak üzere optimizasyon, analiz, öğrenme, sınıflandırma gibi çalışmalar bulunmaktadır. YSA genelleme yapabilme ve öğrenebilme yetisi gibi özellikleri sayesinde günümüzde birçok alanda geniş uygulama olanağı bulmuş ve bu problemleri başarılı bir şekilde çözebilmektedir. YSA'da tıpkı insan beyninde olan nöronlar gibi yapay nöronları vardır. Yapay nöronlar farklı biçimlerde bağlanarak YSA'yı oluşturmaktadır. YSA başarılı tahminler yapabilme yetisine sahiptir.

YSA yönteminin insan gibi öğrenme kabiliyeti, daha önce görülmemiş sorunlar hakkında bilgi sahibi olabilme, örnek veri olması halinde ağ modeli oluşturmak için başka bilgiye ihtiyaç duymama ve yöntemin uygulanabilirliğinin kolay olması gibi avantajlı yönleri vardır. YSA'nın avantajlarının olduğu gibi dezavantajları da vardır. Dezavantajlarından bazıları şunlardır: YSA ile model oluştururken herhangi bir kural bulunmamakta, seçimin yapılması tecrübeye dayanmaktadır. YSA Bağımsız değişken ve bağımlı değişken arasındaki ilişki hakkında bilgi vermez. YSA sadece sayısal değerlerle çalışır.

Yapılan analiz Matlab programı üzerinden yapılmıştır. Bu çalışmada sigmoid transfer fonksiyonu kullanılmıştır. Analiz için 500 epoch yapılmıştır. Yapılan analizde 45 eğitim, 15 test verisi kullanılmıştır. 60 veri normal bir veridir ve istatistiksel olarak kullanılabilir. Yapay zeka yöntemleri gerek lineer, gerek lineer olmayan durumlarda iyi sonuç verdiği düşünülmektedir.

## 4. ARAŞTIRMA VE BULGULAR

Yapılan çalışmada; sathi kaplama, esnek kaplama için taban zemini esneklik modülü, ve  $T_{8,2}$  ton eşdeğer dingil yükü tekerrür sayısı ( $T_{8,2}$ ) dikkate alınarak kaplama kalınlığı hesabı yapılmaktadır. Rijit kaplama için ise yatak katsayısı ve 8,2 ton eşdeğer dingil yükü tekerrür sayısı dikkate alınmaktadır. Taban zemini esneklik modülü ve 8,2 ton eşdeğer dingil yükü tekerrür sayısına göre maliyet hesaplaması yapılmaktadır. Ayrıca LR ve YSA yöntemleri ile kaplama kalınlıkları tahmin edilmektedir. Kalınlıkların tahmin edilmesinde hangi yöntemin daha iyi olacağı araştırılmaktadır.

Asfalt kaplamaların yapısından ve içeriğinden kaynaklanan düşük maliyet, kullanımlarının başlıca nedeni olmaktadır. Asfalt kaplamaların yeniden kullanılabilirliği, olumlu çevresel etkilerine ek olarak, maliyet düşürücü bir diğer önemli unsur olmaktadır.

Yol otoritelerinin çoğunluğu, ömür boyu bakım, onarım ve işletme giderleri göz önüne alındığında, yüksek performanslı asfalt kaplamaların uzun vadede en ucuz kaplama türü olduğunu iddia etmektedir.

Zemin ve trafik özelliklerine, hizmet sürelerine ve ülke koşullarına bağlı olarak esnek ve rijit kaplamaların başlangıç maliyetleri farklılık gösterebilmektedir.

### 4.1. Sathi Kaplamada Kalınlıklar ve Maliyet

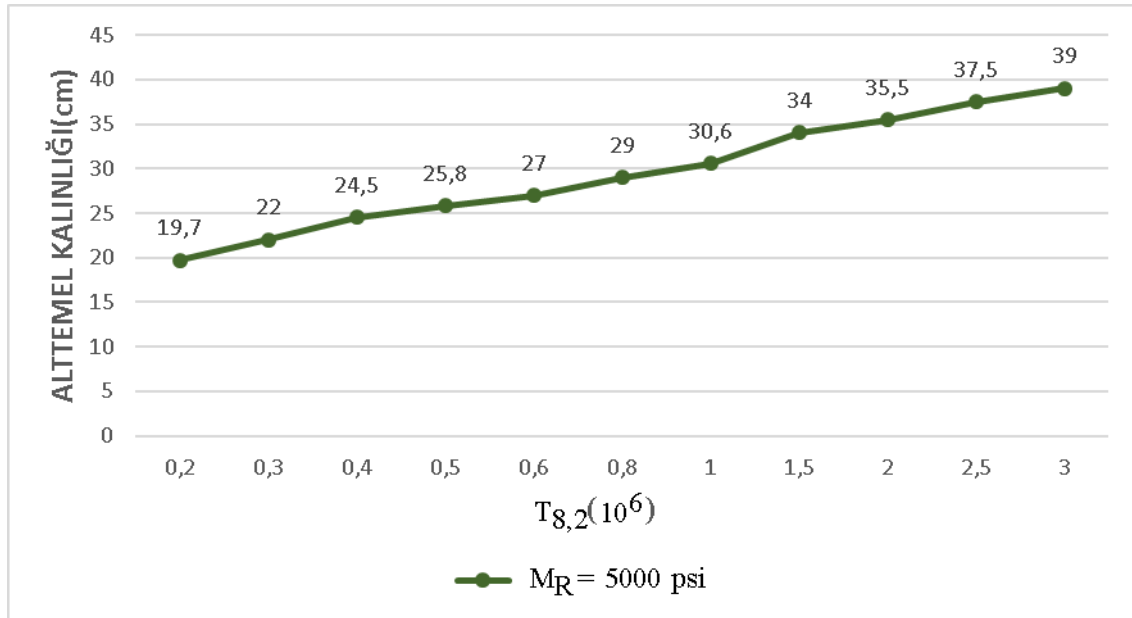
Taban zemini esneklik modülü ( $M_R$ ) ve 8,2 ton eşdeğer tek-dingil yükü tekerrür sayısına göre sathi kaplama kalınlıkları tabloda verilmiştir (Çizelge 4.1).

Tabloya göre  $0,2 \times 10^6$   $0,5 \times 10^6$   $T_{8,2}$  değerine kadar tek kat sathi kaplama yapılmaktadır.  $0,6 \times 10^6$  ve  $3 \times 10^6$   $T_{8,2}$  arasında ise çift kat sathi kaplama yapılmaktadır. Bunlarla birlikte 20 cm kırmataş temel ve değişkenlik gösteren alttemel yapılmaktadır.

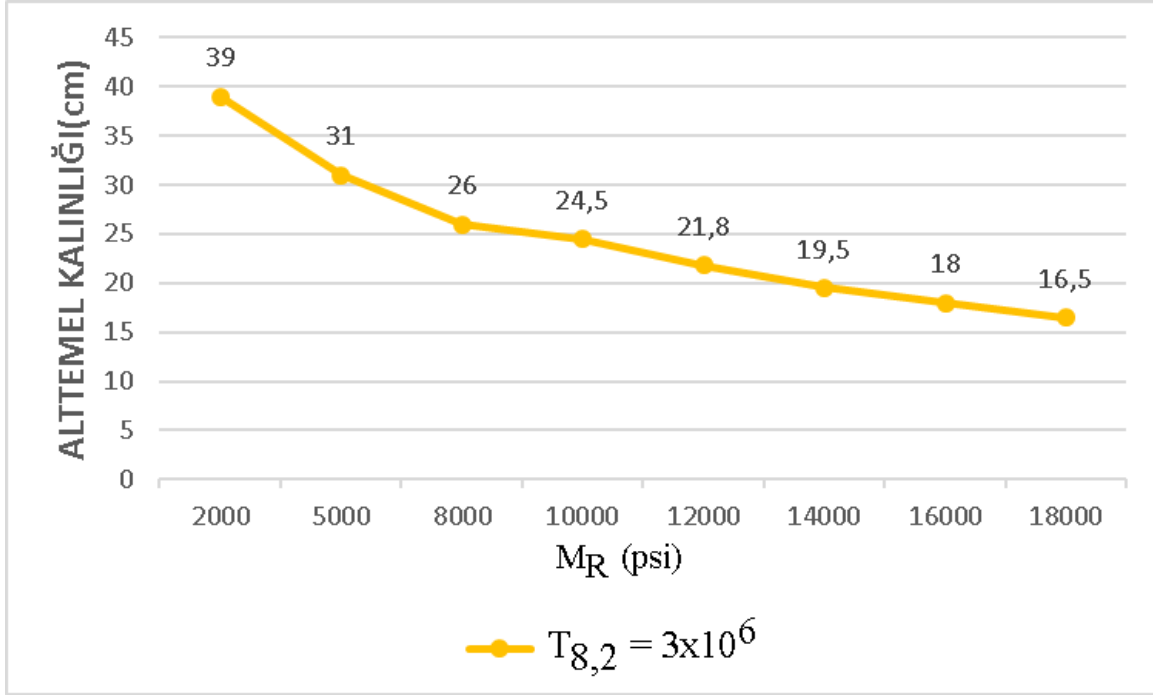
Çizelge 4.1. Sathi kaplama kalınlığının  $M_R$  ve  $T_{8,2}$  değerine göre değişimi

SATHİ KAPLAMALI ESNEK ÜST YAPILAR İÇİN PROJELENDİRME											
	TEK KAT SATHİ KAPLAMA						ÇİFT KAT SATHİ KAPLAMA				
	20 cm KIRMATAŞ TEMEL										
	KIRMATAŞ ALTTEMEL KALINLIĞI(cm)										
$M_R$ (psi) \ $T_{8,2}(10^6)$	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8	1	1,5	2	2,5	3
2000	34,5	37,4	40	-	-	-	-	-	-	-	-
5000	19,7	22	24,5	25,8	27	29	30,6	34	35,5	37,5	39
8000	-	15,3	17,5	18,5	19,7	22	23	25,5	27,5	29	31
10000	-	-	-	15,2	17	18,5	19,6	22,3	24,5	25,5	26
12000	-	-	-	-	-	15,6	17,2	19,5	22	23	24,5
14000	-	-	-	-	-	-	-	17,5	19,5	20,2	21,8
16000	-	-	-	-	-	-	-	15	17,5	18	19,5
18000	-	-	-	-	-	-	-	-	15,5	16,5	18
20000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	15	16,5

Sathi kaplama kalınlıkları değişimi grafikler yardımıyla daha net görülmektedir. Grafikten de anlaşılacağı üzere 5000 psi  $M_R$  değerindeki sathi kaplama alttemel kalınlığı  $T_{8,2}$  değeri arttıkça paralel bir şekilde artmaktadır (Şekil 4.1).

Şekil 4.2.  $M_R$  5000 psi ve  $T_{8,2}$  değerlerine göre sathi kaplama alttemel kalınlık değişimi

Diğer taraftan  $3 \times 10^6$   $T_{8,2}$  değerine sahip sathi kaplama kalınlığı,  $M_R$  değeri arttıkça azalmaktadır (Şekil 4.2).



Şekil 4.3.  $3 \times 10^6$   $T_{8,2}$  değerinin  $M_R$  değerlerine göre değişen alttemel kalınlığı

Tek kat sathi kaplama için maliyet değerleri hesaplanırken bir tabaka astarlı bitümlü sathi kaplama yapılması birim fiyatına, 20 cm plent-miks temel yapılması ve değişen alttemel değerleri eklenerek bulunmaktadır. Çift kat sathi kaplama için maliyet hesaplaması yapılırken ise iki tabaka astarlı bitümlü sathi kaplama yapılması birim fiyatına, 20 cm plent-miks temel yapılması ve değişen alttemel değerleri eklenerek bulunmaktadır.

Maliyet hesabı için KGM birim fiyat tablosundan alınan değerler ve bu değerlere göre maliyet değerleri tabloda verilmektedir (Çizelge 4.2).

Çizelge 4.2. KGM 2021 birim fiyatlarına göre maliyet tablosu

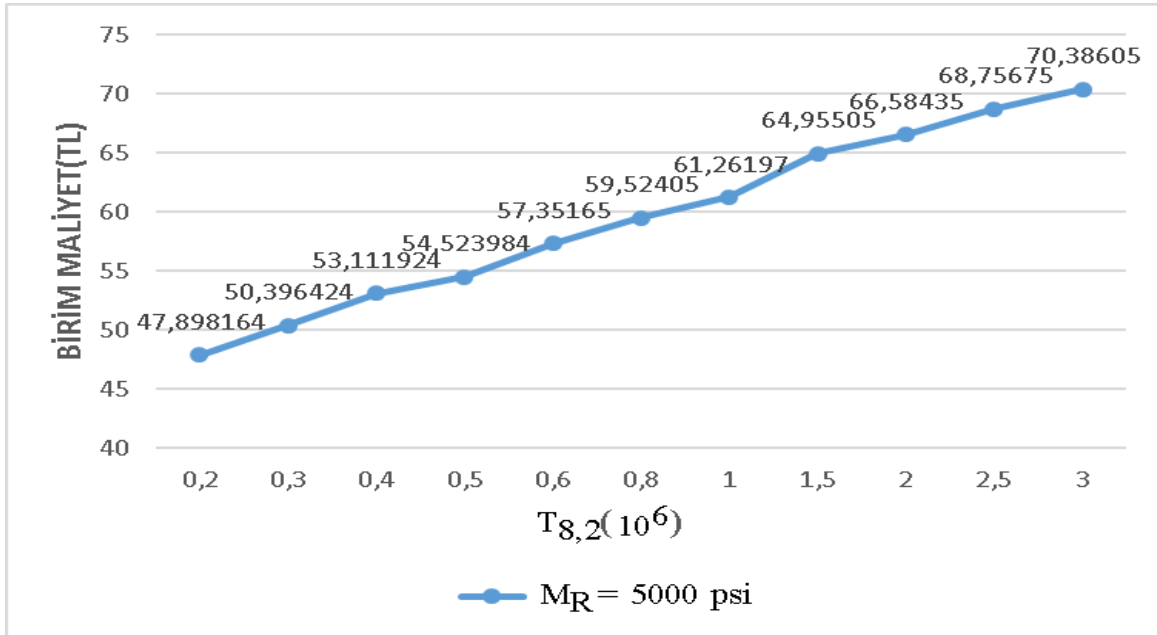
Poz No	Tanım	Birimi	Birim Fiyat(TL)	( $m^2$ ) Maliyet(TL)
KGM/6540	Bir tabaka astarlı bitümlü sathi kaplama yapılması	Dekar	1788,24	1,788
KGM/6560	İki tabaka astarlı bitümlü sathi kaplama yapılması	Dekar	3312,25	3,312
KGM/6100/3	Plent-miks temel yapılması (kırılmış ve elenmiş ocak taşı ile)	Ton	61,78	24,712
KGM/6100/3-1	Plent-miks alttemel yapılması	Ton	54,31	

Yapılan çalışmada, sabit  $M_R$  değeri ve  $T_{8,2}$  değerlerine göre metrekare başına birim fiyat tablosu verilmektedir (Çizelge 4.3). Bu tabloya göre tek kat sathi kaplama maliyeti 5000  $M_R$  değerine karşılık  $0,2 \times 10^6$   $T_{8,2}$  değerinde 47,898 TL metrekare birim maliyet çıkarılmaktadır.  $0,3 \times 10^6$   $T_{8,2}$  değerinde 50,396 TL,  $0,4 \times 10^6$   $T_{8,2}$  değerinde 53,112 TL,  $0,5 \times 10^6$   $T_{8,2}$  değerinde 54,524 TL olmaktadır.  $0,5 \times 10^6$   $T_{8,2}$  değerinden sonra çift kat sathi kaplama yapılmaktadır. Buna göre çift kat sathi kaplama maliyeti  $0,6 \times 10^6$   $T_{8,2}$  değerinde 57,351 TL,  $0,8 \times 10^6$   $T_{8,2}$  değerinde 59,524 TL,  $1 \times 10^6$   $T_{8,2}$  değerinde 61,262 TL,  $1,5 \times 10^6$   $T_{8,2}$  değerinde 64,955 TL,  $2 \times 10^6$   $T_{8,2}$  değerinde 66,584 TL,  $2,5 \times 10^6$   $T_{8,2}$  değerinde 68,757 TL,  $3 \times 10^6$   $T_{8,2}$  değerinde 70,386 TL olmaktadır.

Çizelge 4.3. Sathi kaplamanın 5000 psi  $M_R$  değerinin  $T_{8,2}(10^6)$  değerlerine göre metrekare birim maliyet değişimi

$T_{8,2}(10^6)$	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8	1	1,5	2	2,5	3
$M_R(\text{psi})$											
5000	47,898	50,396	53,112	54,524	57,352	59,524	61,262	64,955	66,584	68,756	70,386

Grafikten görüldüğü üzere 5000  $M_R$  değerinde  $T_{8,2}$  değeri arttıkça sathi kaplama maliyeti artmaktadır (Şekil 4.3).



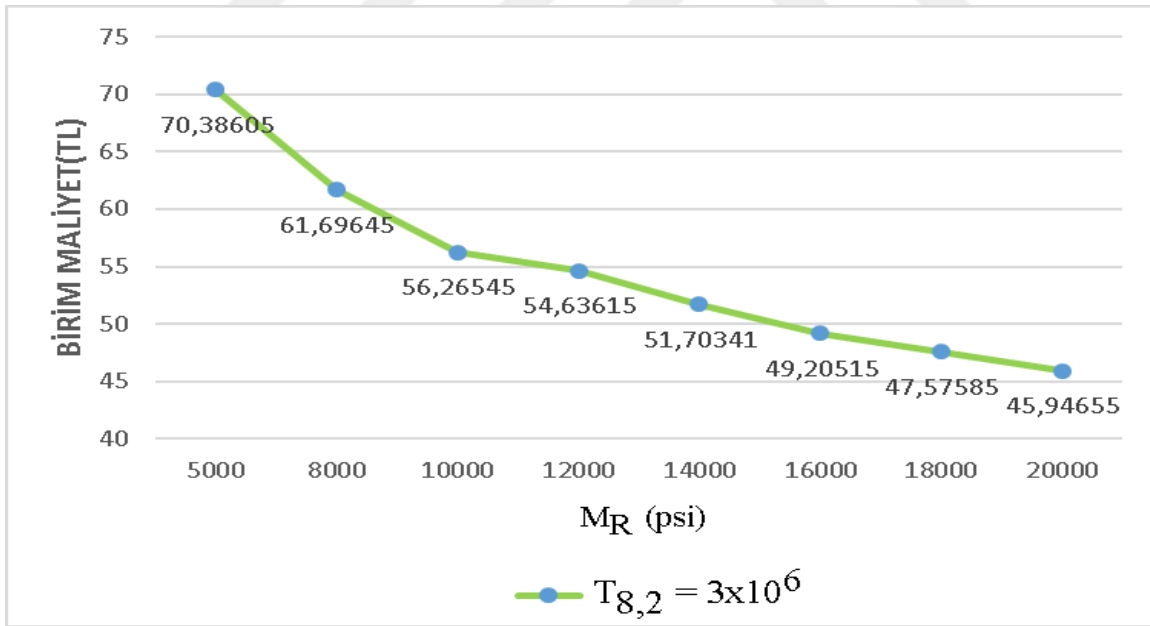
Şekil 4.4. 5000  $M_R$  değeri ve  $T_{8,2}$  değerlerinde sathi kaplama metrekare birim maliyeti

Yapılan çalışmada, sabit  $T_{8,2}$  değeri ve değişen  $M_R$  değerlerine göre metrekare başına birim fiyat tablosu verilmektedir (Çizelge 4.4). Bu tabloya göre  $3 \times 10^6$   $T_{8,2}$  değerine karşılık 5000  $M_R$  değerinde 70,386 TL metrekare birim maliyet çıkarılmaktadır. Tek kat sathi kaplama maliyeti 8000  $M_R$  değerinde 61,697 TL, 10000  $M_R$  değerinde 56,266 TL, 12000  $M_R$  değerinde 54,636 TL olmaktadır. Çift kat sathi kaplama maliyeti 14000  $M_R$  değerinde 51,703 TL, 16000  $M_R$  değerinde 49,205 TL, 18000  $M_R$  değerinde 47,576 TL, 20000  $M_R$  değerinde 45,947 TL olmaktadır.

Çizelge 4.4.  $T_{8,2}$  değeri ve değişen  $M_R$  değerlerine göre metrekare başına maliyet (TL)

$T_{8,2}(10^6)$ \ $M_R(\text{psi})$	5000	8000	10000	12000	14000	16000	18000	20000
3	70,386	61,696	56,265	54,636	51,703	49,205	47,576	45,947

Grafikten görüldüğü üzere  $3 \times 10^6$   $T_{8,2}$  değerinde  $M_R$  değeri arttıkça sathi kaplama maliyeti azalmaktadır (Şekil 4.4).



Şekil 4.5.  $T_{8,2}$  değeri ve değişen  $M_R$  değerlerine göre metrekare maliyet değişimi

## 4.2. Esnek Kaplamada Kalınlıklar ve Maliyet

Bu çalışmada AASHTO (1986) deney yolu denklemi kullanılmaktadır. Kaplama kalınlıklarını bulmak için, standart sapma  $S_0=0,45$ , servis kabiliyeti indeksi  $\Delta PSI=1,7$  ( $P_0=4,2$ ,  $P_t=2,5$ ), normal standart sapma  $Z_R= -1,645$  olarak alınmaktadır. Bu değerlere göre SN değeri hesaplanıp sonuçlar tablo halinde verilmektedir.

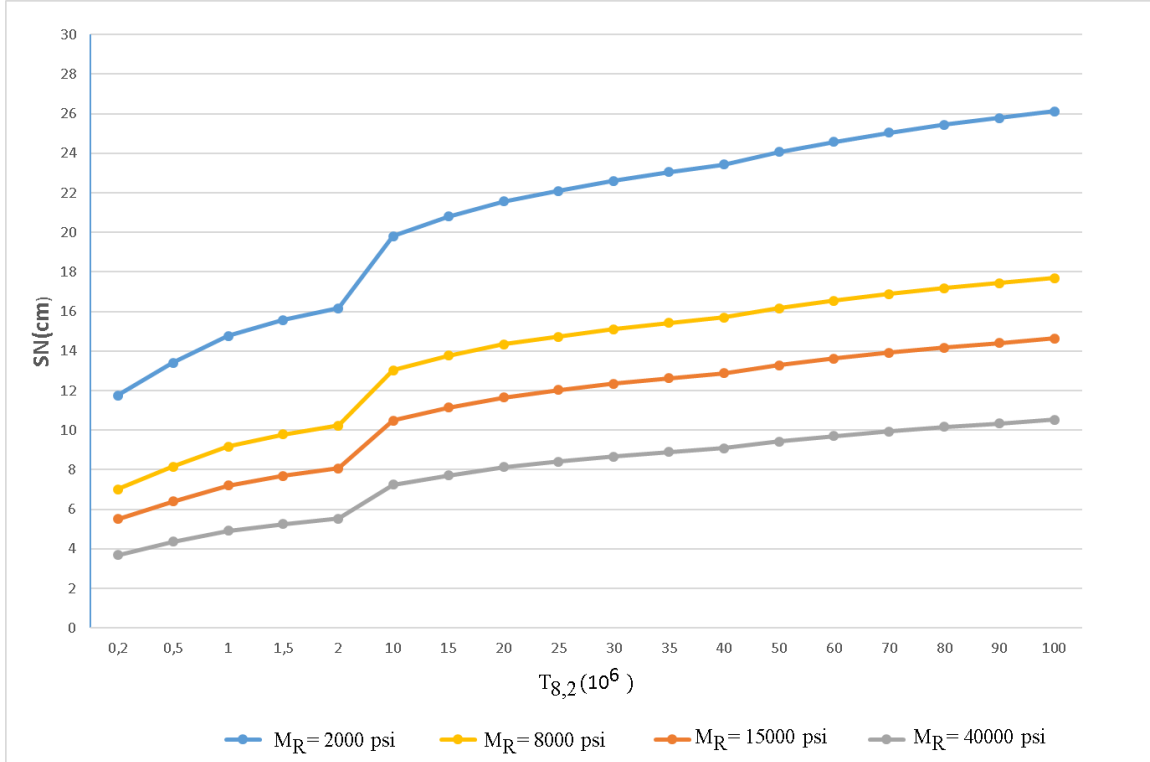
Taban zemini esneklik modülü ( $M_R$ ) ve  $T_{8,2}$  ton eşdeğer tek-dingil yükü tekerrür sayısı( $T_{8,2}$ )'na göre esnek kaplama alttemel kalınlıklarının değişimi tabloda verilmiştir. (Çizelge 4.5).

Çizelge 4.5.  $M_R$  ve  $T_{8,2}$ 'ye göre esnek kaplama alttemel kalınlıklarının değişimi (cm)

MR(psi) T <sub>8,2</sub> (milyon)	2000	5000	8000	10000	13000	15000	18000	20000	25000	30000	35000	40000
0,2	11,8	8,4	7,0	6,4	5,8	5,5	5,1	4,9	4,5	4,2	3,9	3,7
0,5	13,4	9,8	8,2	7,5	6,8	6,4	6,0	5,7	5,3	4,9	4,6	4,4
1	14,8	10,9	9,2	8,4	7,6	7,2	6,7	6,5	5,9	5,5	5,2	4,9
1,5	15,6	11,6	9,8	9,0	8,1	7,7	7,2	6,9	6,3	5,9	5,5	5,3
2	16,2	12,1	10,2	9,4	8,5	8,1	7,5	7,2	6,6	6,2	5,8	5,5
10	19,8	15,1	13,0	12,1	11,0	10,5	9,8	9,4	8,7	8,1	7,6	7,2
15	20,8	15,9	13,8	12,8	11,7	11,2	10,4	10,1	9,2	8,6	8,1	7,7
20	21,6	16,5	14,4	13,4	12,2	11,7	10,9	10,5	9,7	9,1	8,5	8,1
25	22,1	17,0	14,7	13,7	12,6	12,0	11,3	10,9	10,0	9,4	8,8	8,4
30	22,6	17,4	15,1	14,1	13,0	12,3	11,6	11,2	10,3	9,7	9,1	8,7
35	23,0	17,8	15,4	14,4	13,2	12,6	11,9	11,5	10,6	9,9	9,3	8,9
40	23,4	18,1	15,7	14,7	13,5	12,9	12,1	11,7	10,8	10,1	9,6	9,1
50	24,1	18,6	16,2	15,1	13,9	13,3	12,5	12,1	11,2	10,5	9,9	9,4
60	24,6	19,0	16,5	15,5	14,2	13,6	12,8	12,4	11,5	10,8	10,2	9,7
70	25,0	19,4	16,9	15,8	14,6	13,9	13,1	12,7	11,8	11,0	10,4	9,9
80	25,4	19,7	17,2	16,1	14,8	14,2	13,4	12,9	12,0	11,3	10,7	10,2
90	25,8	20,0	17,4	16,4	15,1	14,4	13,6	13,1	12,2	11,5	10,8	10,4
100	26,1	20,2	17,7	16,6	15,3	14,6	13,8	13,3	12,4	11,7	11,0	10,5

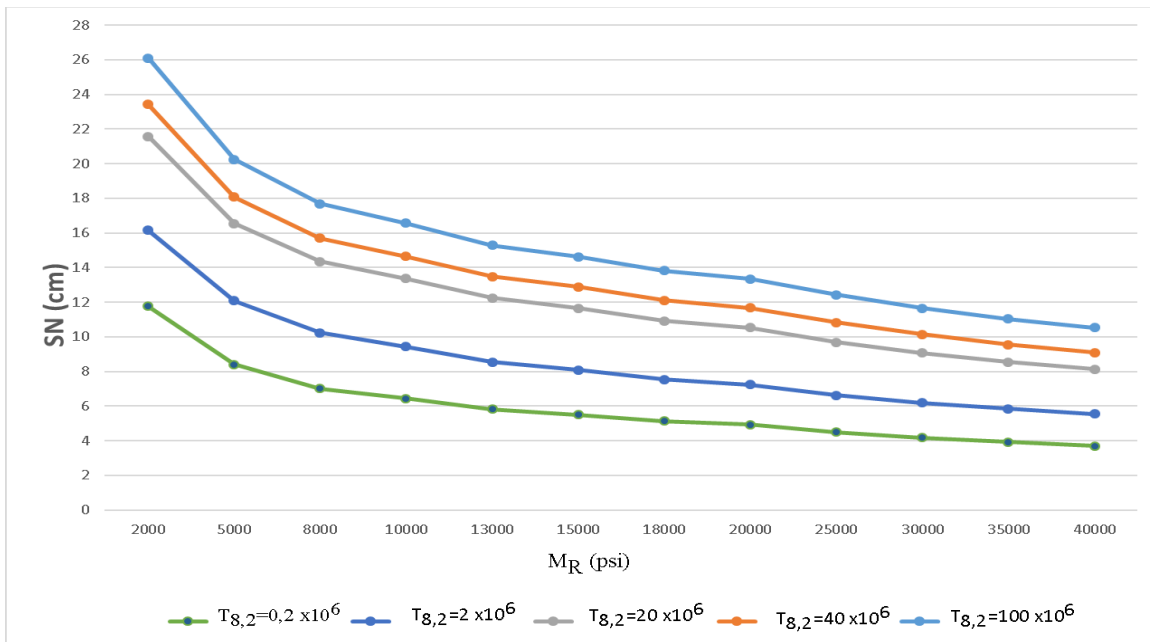
Esnek kaplama kalınlıkları değişimi grafikler yardımıyla daha net görülmektedir. Grafikten de anlaşılacağı üzere  $T_{8,2}$  değeri arttıkça esnek kaplama alttemel kalınlığı 2000, 15000 ve 40000  $M_R$  değerlerine göre paralel bir şekilde artmaktadır (Şekil 4.5). Bu tablodaki  $M_R$  değerlerinin seçimi kaplama kalınlığının daha net görülmesine olanak sağlamaktadır.





Şekil 4.6. Esnek kaplamada sabit  $M_R$  değerleri ve değişken  $T_{8,2}$  değerlerine göre üstyapı sayısı değişimi

Diğer taraftan  $0,2 \times 10^6$ ,  $2 \times 10^6$ ,  $20 \times 10^6$ ,  $40 \times 10^6$  ve  $100 \times 10^6$   $T_{8,2}$  değerine sahip esnek kaplama kalınlığı  $M_R$  değeri arttıkça azalmaktadır (Şekil 4.6).



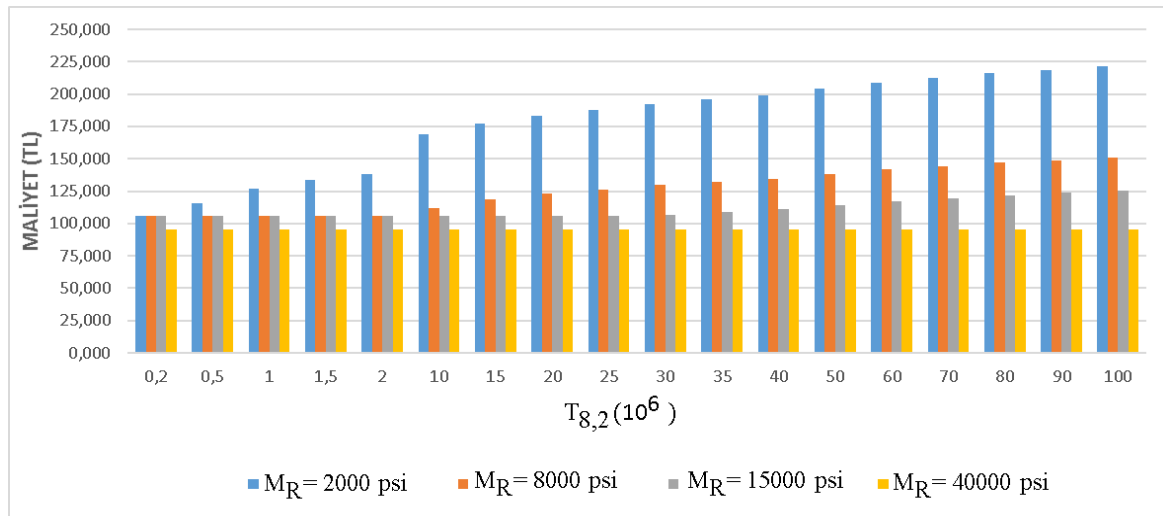
Şekil 4.7. Esnek kaplamada sabit  $T_{8,2}$  değerleri ve değişken  $M_R$  değerlerine göre üstyapı sayısı değişimi



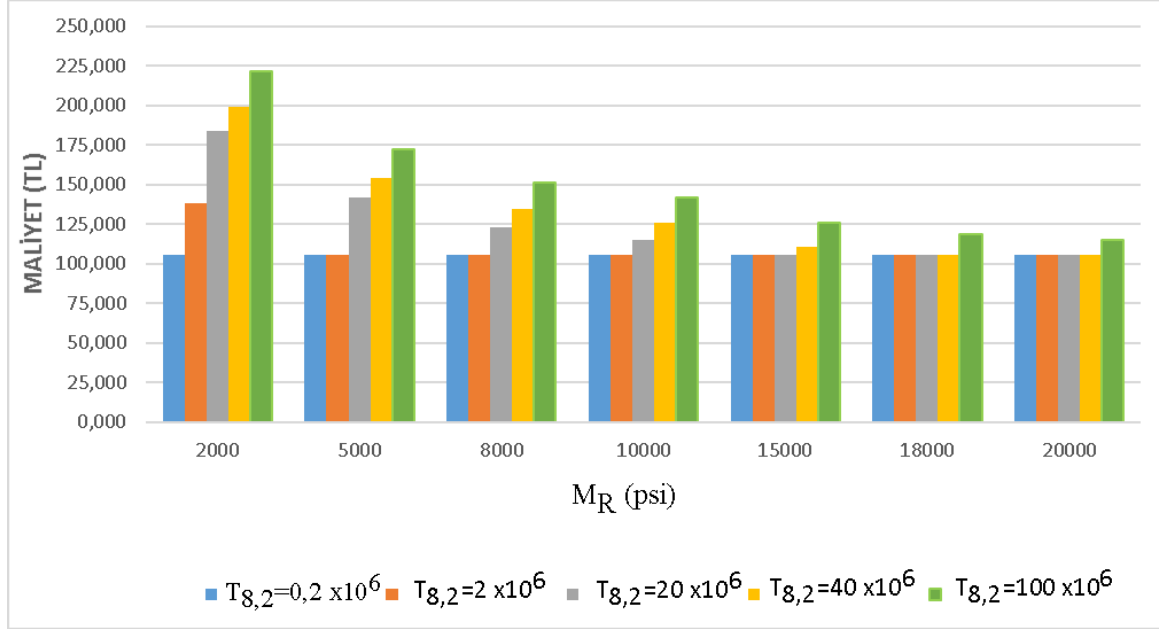
Çizelge 4.7. (Devam) Esnek üstyapı kaplamasının alttemel kalınlık maliyetleri (TL)

10	168,876	129,614	112,211	105,525	105,525	105,525	105,525	95,410
15	177,152	136,405	118,366	110,301	105,525	105,525	105,525	95,410
20	183,519	141,498	123,247	114,970	105,525	105,525	105,525	95,410
25	187,976	145,531	126,430	118,153	105,525	105,525	105,525	95,410
30	192,220	148,926	129,614	121,125	106,481	105,525	105,525	95,410
35	195,828	151,685	132,160	123,671	108,815	105,525	105,525	95,410
40	199,012	154,444	134,495	125,793	110,938	105,525	105,525	95,410
50	204,317	158,476	138,315	129,401	114,333	107,754	105,525	95,410
60	208,562	162,050	141,604	132,585	117,241	110,683	106,905	95,410
70	212,531	165,111	144,469	135,344	119,639	113,060	109,240	95,410
80	215,884	167,814	146,804	137,466	121,761	115,182	111,362	95,410
90	218,749	170,149	148,926	140,013	123,671	116,880	113,060	95,410
100	221,508	172,483	151,048	141,710	125,581	118,790	114,864	95,410

Esnek kaplama maliyet grafiğinde 2000, 8000, 15000 ve 25000-40000  $M_R$  değerlerinin maliyete olan etkisi görülmektedir.  $T_{8,2}$  değeri arttıkça 25000-40000 değeri dışındaki maliyet değerleri artmaktadır (Şekil 4.7).

Şekil 4.8. Esnek kaplamada sabit  $M_R$  değerlerinin  $T_{8,2}$  değerlerine göre maliyet değişimi

Verilen grafikte  $0,2 \times 10^6$ ,  $2 \times 10^6$ ,  $20 \times 10^6$ ,  $40 \times 10^6$  ve  $100 \times 10^6$   $T_{8,2}$  değerlerinin değişimi görülmektedir.  $M_R$  değeri arttıkça  $T_{8,2}$  değerlerine göre maliyet azalmaktadır (Şekil 4.8).



Şekil 4.9. Esnek kaplamada sabit  $T_{8,2}$  değerlerinin  $M_R$  değerlerine göre maliyet değişimi

Şekil 4.8' de verilen grafikte  $M_R$  değeri arttıkça hesaplanan kaplama kalınlıkları minimum alttemel kalınlığından düşük olduğu için alttemel kullanılmamakta, onun yerine 5 cm temel ilavesi yapılmaktadır. Bu yüzden maliyetler eşitlenme eğilimine geçmektedir.

### 4.3. Rijit Kaplamada Kalınlıklar ve Maliyet

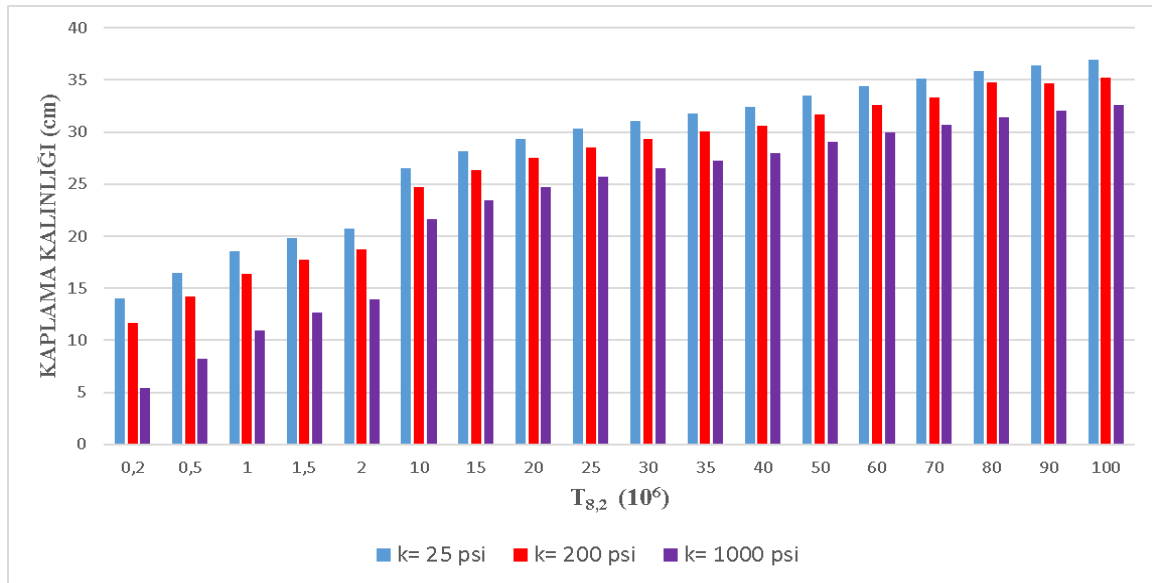
Rijit kaplama kalınlık hesabı için AASHTO (1986) yol testinde kullanılan denklemden yararlanılmaktadır. Kullanılan denklem parametrelerinden yük transfer katsayısı  $J=2,71$ , drenaj katsayısı  $C_d=1,0$ , betonun elastisite modülü  $E_c= 4786244$  ve servis yeteneği kaybı  $\Delta PSI=2$  olarak alınmıştır. Bu değerler ışığında yatak katsayısı ( $k$ ) ve 8,2 ton eşdeğer dingil yükü tekerrür sayısı ( $T_{8,2}$ )'na göre rijit kaplama plaka kalınlıkları hesaplanmıştır ve tabloda verilmiştir (Çizelge 4.8).

Yatak katsayısının artmasıyla kaplama kalınlığında az da olsa artış görülmektedir. Çalışmada rijit kaplama kalınlık hesabı için C35/40 beton baz alınmaktadır. Diğer taraftan  $T_{8,2}$  değeri arttıkça kaplama kalınlığı artmaktadır.

Çizelge 4.8. k ve  $T_{8,2}$  değerlerine göre rijit kaplama plaka kalınlıkları

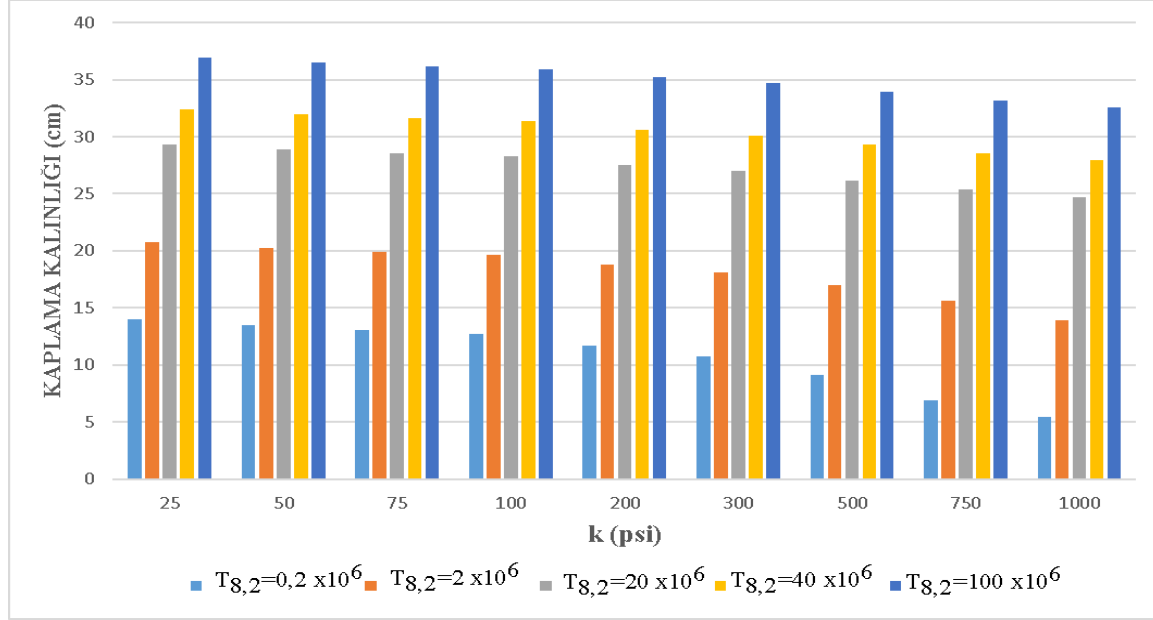
$T_{8,2}$ (milyon) \ k(psi)	25	50	75	100	200	300	500	750	1000
0,2	14,0	13,5	13,1	12,7	11,7	10,8	9,1	6,9	5,4
0,5	16,5	15,9	15,5	15,2	14,2	13,4	11,8	9,7	8,3
1	18,6	18,1	17,7	17,4	16,4	15,6	14,3	12,4	10,9
1,5	19,8	19,3	19,0	18,7	17,8	17,1	15,8	14,3	12,7
2	20,8	20,3	19,9	19,6	18,8	18,1	17,0	15,6	13,9
10	26,5	26,0	25,7	25,4	24,7	24,1	23,3	22,4	21,6
15	28,1	27,6	27,3	27,1	26,3	25,8	24,9	24,1	23,4
20	29,3	28,9	28,5	28,3	27,5	27,0	26,2	25,4	24,7
25	30,3	29,8	29,5	29,2	28,5	28,0	27,2	26,4	25,7
30	31,1	30,6	30,3	30,0	29,3	28,8	28,0	27,2	26,6
35	31,8	31,3	31,0	30,7	30,0	29,5	28,7	27,9	27,3
40	32,4	31,9	31,6	31,4	30,6	30,1	29,3	28,6	27,9
50	33,5	33,0	32,7	32,4	31,7	31,2	30,4	29,6	29,0
60	34,4	33,9	33,6	33,3	32,6	32,1	31,3	30,5	29,9
70	35,1	34,7	34,3	34,1	33,3	32,8	32,1	31,3	30,7
80	35,8	35,3	35,0	34,8	34,0	33,5	32,7	32,0	31,4
90	36,4	35,9	35,6	35,4	34,6	34,1	33,4	32,6	32,0
100	37,0	36,5	36,2	35,9	35,2	34,7	33,9	33,2	32,6

Verilen grafikte 25 psi, 200 psi ve 1000 psi yatak katsayısı (k) değerleri baz alındığında kaplama kalınlıklarının artış gösteren sütun grafiği oluşmaktadır (Şekil 4.9).



Şekil 4.10. Rijit kaplamada sabit k değerleri ve değişen  $T_{8,2}$  değerlerine göre kaplama kalınlıkları değişimi

Yatak katsayısı değeri arttıkça kaplama kalınlığının azaldığı grafikte net olarak görülmektedir (Şekil 4.10).



Şekil 4.11. Rijit kaplamada sabit  $T_{8,2}$  değerleri ve değişen  $k$  değerlerine göre kaplama kalınlıkları değişimi

Yapılan çalışmada beton kaplama altına attemel olarak 20cm plent-miks alttemel kullanılmaktadır. 20 cm plent-miks alttemel ton fiyatı 54,31TL, betonarme için  $\phi 6$ -  $\phi 12$  mm'lik yuvarlak demir temini ve işçiliği 9500 TL olarak KGM 2021 birim fiyat listesinden alınmıştır (Çizelge 4.9). Plent-miks alttemel fiyatı ve yuvarlak demir temini ve işçiliği beton plaka birim fiyatına eklenerek metrekare maliyet hesabı yapılmıştır.

Çizelge 4.9. Rijit kaplama birim fiyat tablosu

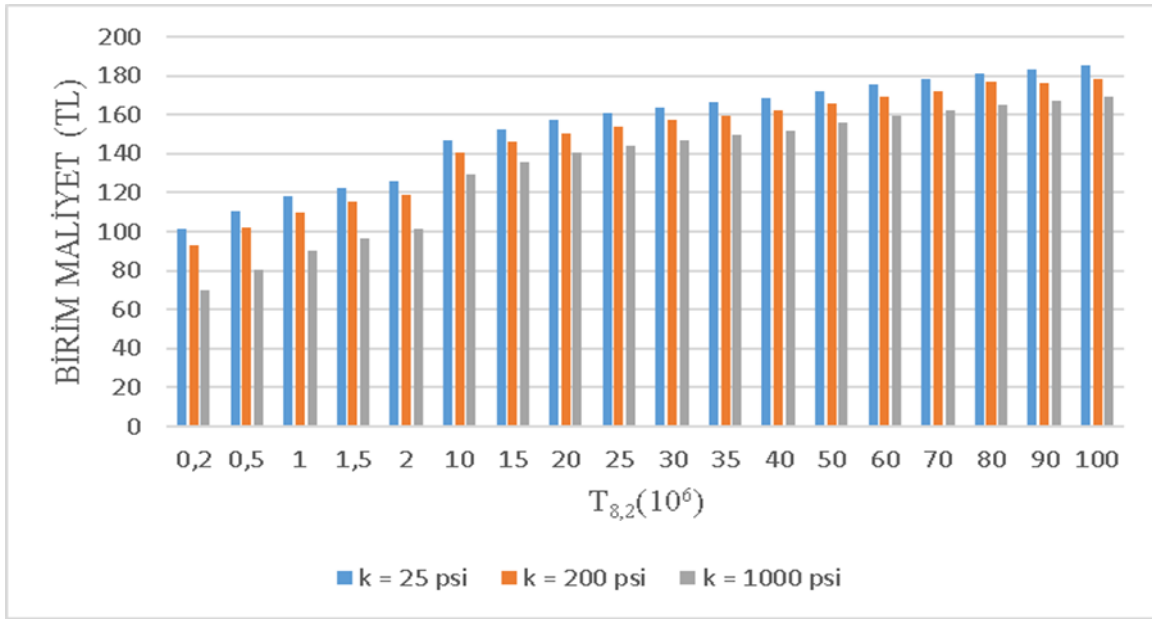
Poz No	Tanım	Birimi	Birim Fiyat (TL)	m <sup>2</sup> Maliyet (TL)
KGM/6100/3-1	Plent-miks alttemel yapılması (kırılmış ve elenmiş ocak taşı ile)	Ton	54,31	21,724
KGM/23.001/K	Betonarme için $\phi 6$ - $\phi 12$ mm lik yuvarlak demir temini ve işçiliği	Ton	9500	28,5
48.150.1002 (MSB 322/A)	Beton kaplama yapılması	(m <sup>3</sup> )	364,93	

Aşağıdaki tabloda k değerlerine göre birim maliyetlerin görülmesi sağlanmaktadır (Çizelge 4.10). Bu tablo incelendiğinde k değeri arttıkça birim maliyet azalmaktadır.

Çizelge 4.10. k ve  $T_{8,2}$  değerlerine göre metrekare birim maliyet (TL)

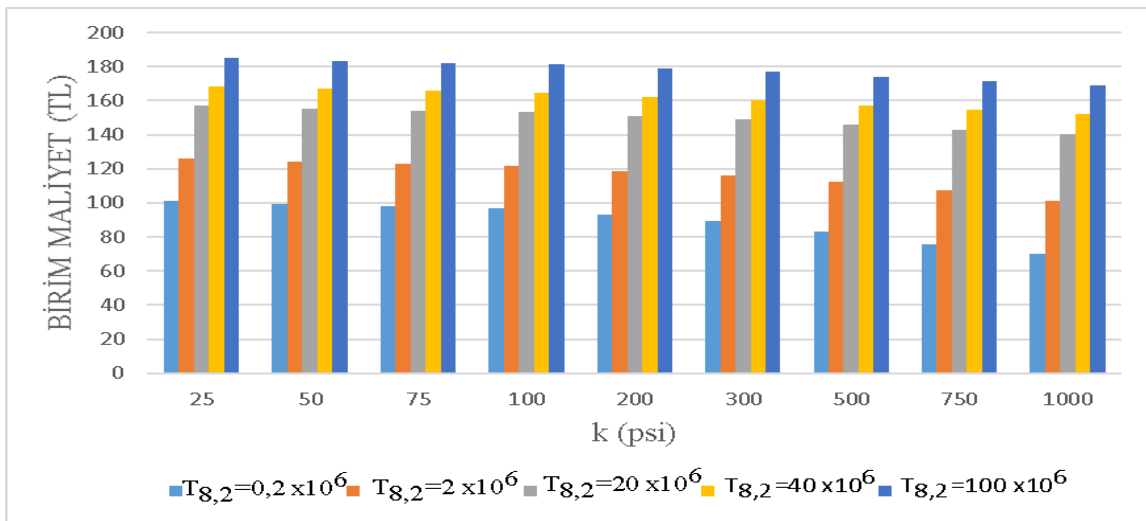
$k(\text{psi})$ $T_{8,2}(x10^6)$	25	50	75	100	200	300	500	750	1000
0,2	101,321	99,358	97,854	96,680	92,902	89,565	83,398	75,407	70,012
0,5	110,374	108,387	106,862	105,676	101,953	98,949	93,220	85,703	80,363
1	117,987	116,109	114,673	113,558	110,069	107,277	102,300	95,524	90,018
1,5	122,631	120,819	119,446	118,386	115,108	112,523	108,006	102,355	96,586
2	126,015	124,242	122,905	121,880	118,738	116,299	112,127	107,114	101,115
10	146,885	145,202	143,962	143,029	140,278	138,272	135,151	131,996	129,195
15	152,805	151,126	149,893	148,967	146,253	144,292	141,272	138,275	135,676
20	157,197	155,519	154,288	153,366	150,672	148,734	145,770	142,857	140,361
25	160,720	159,041	157,812	156,892	154,210	152,287	149,358	146,499	144,069
30	163,677	161,997	160,768	159,849	157,176	155,263	152,360	149,540	147,155
35	166,234	164,552	163,324	162,406	159,738	157,834	154,950	152,159	149,809
40	168,492	166,809	165,580	164,662	161,999	160,101	157,233	154,464	152,142
50	172,356	170,670	169,441	168,524	165,867	163,978	161,133	158,399	156,117
60	175,601	173,912	172,683	171,765	169,112	167,230	164,401	161,693	159,440
70	178,407	176,716	175,485	174,568	171,918	170,040	167,225	164,535	162,305
80	180,886	179,192	177,961	177,044	174,395	172,521	169,716	167,042	164,829
90	183,11	181,41	180,18	179,26	176,62	174,75	171,95	169,29	167,09
100	185,13	183,43	182,20	181,28	178,63	176,77	173,98	171,33	169,14

Verilen grafikte 25 psi, 200 psi ve 1000 psi yatak katsayısı (k) değerleri baz alındığında birim maliyetin giderek arttığı sütun grafiği oluşmaktadır (Şekil 4.11).



Şekil 4.12. Rijit kaplamada sabit k değerleri ve değişen  $T_{8,2}$  değerlerine göre metrekare maliyet değişimi

Grafikte değişen k değerine göre  $T_{8,2}$  maliyet değeri arttıkça maliyetin azaldığı görülmektedir (Şekil 4.12).

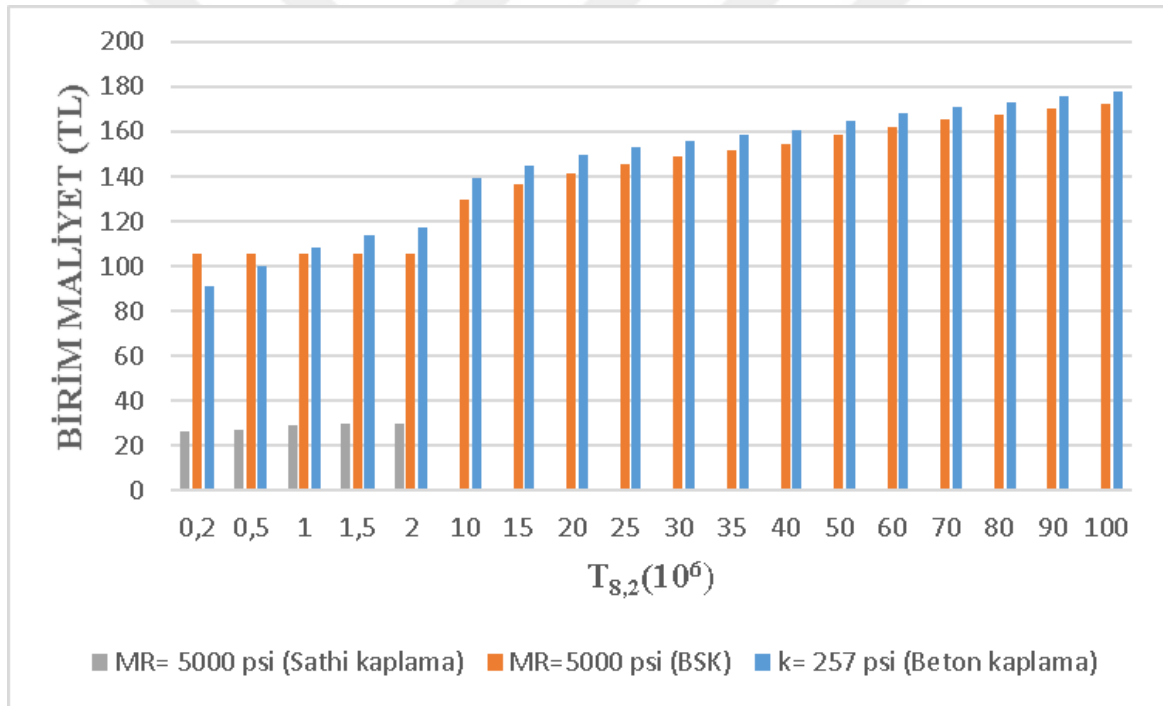


Şekil 4.13. Rijit kaplamada sabit  $T_{8,2}$  değerleri ve değişen k değerlerine göre metrekare maliyet değişimi

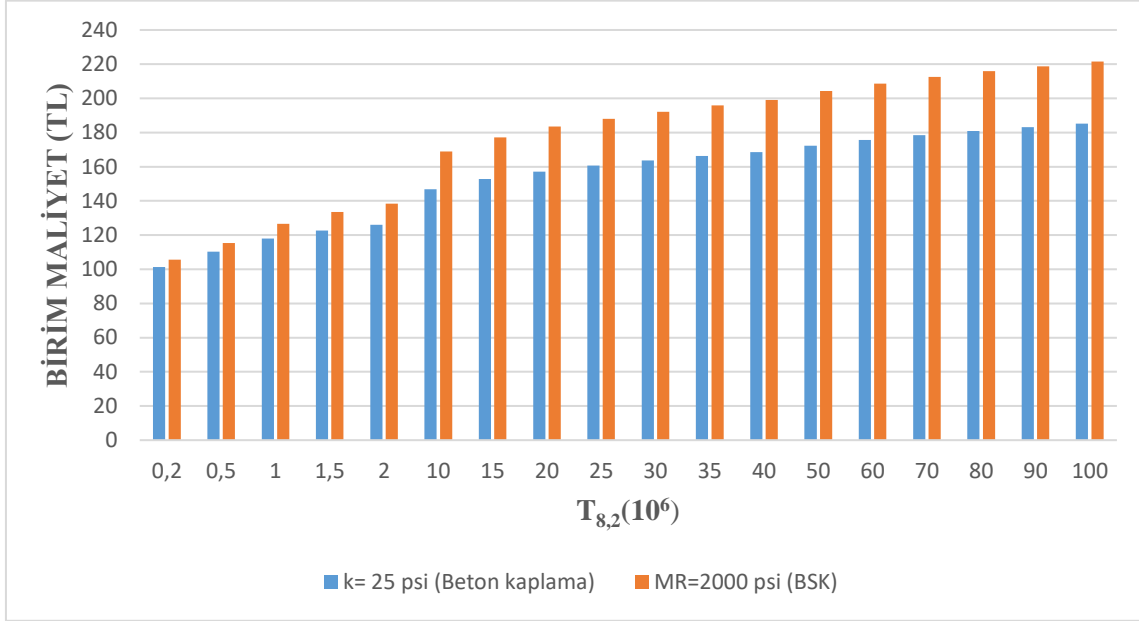


Nihai maliyet karşılaştırmasını yapmak için sathi kaplama, esnek kaplama ve beton kaplama metrekare birim fiyat değerleri grafik olarak verilmiştir (Şekil 4.13) Grafikte karşılaştırmanın iyi gözlenebilmesi için sathi kaplama ve esnek kaplama  $M_R$  değerleri 5000 psi, beton kaplama için de k değeri 257 psi olarak alınmıştır. Karşılaştırmanın tam anlamıyla yapılması için k değeri 257 olarak alınmıştır. Fakat k değerinin 200 psi ve 257 psi değerleri arasında pek bir farkın olmadığı gözlemlendiği için sadece karşılaştırma grafiğinde k değeri 257 psi alınmıştır.

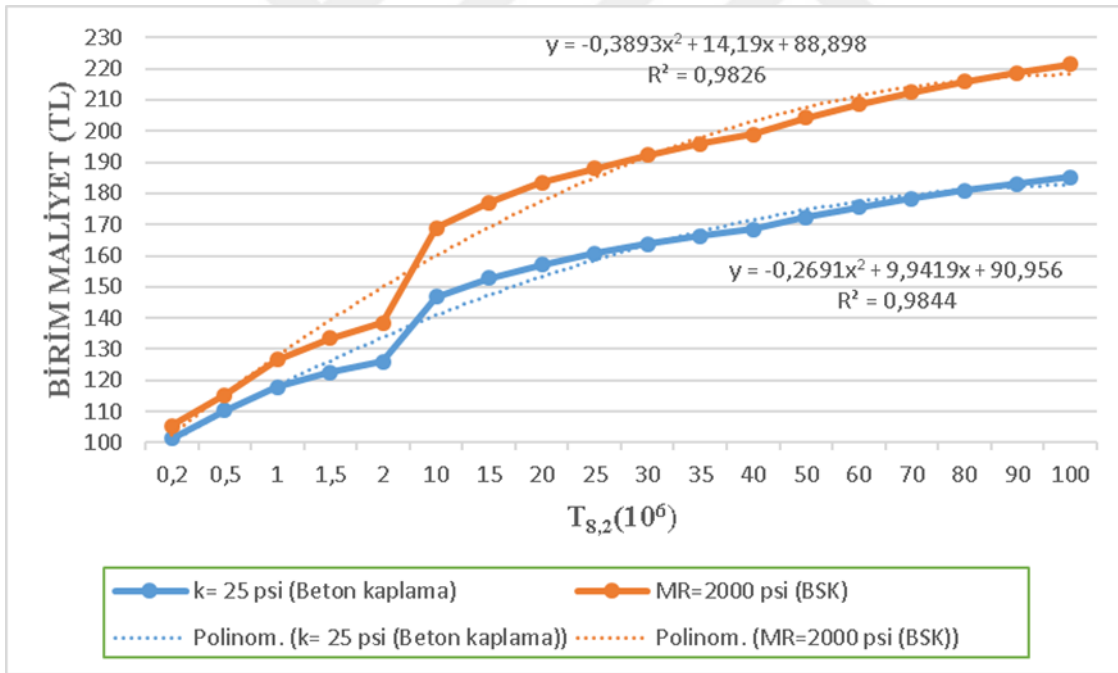
Düşük değerlerdeki birim maliyetin görülmesi açısından başka bir grafik oluşturulmaktadır. Böylece düşük zemin değerlerinde trafik değeri arttıkça rijit kaplama esnek kaplamadan daha ekonomik olmaktadır (Şekil 4.14).



Şekil 4.14. Sathi kaplama, beton kaplama ve esnek kaplama birim maliyet karşılaştırması



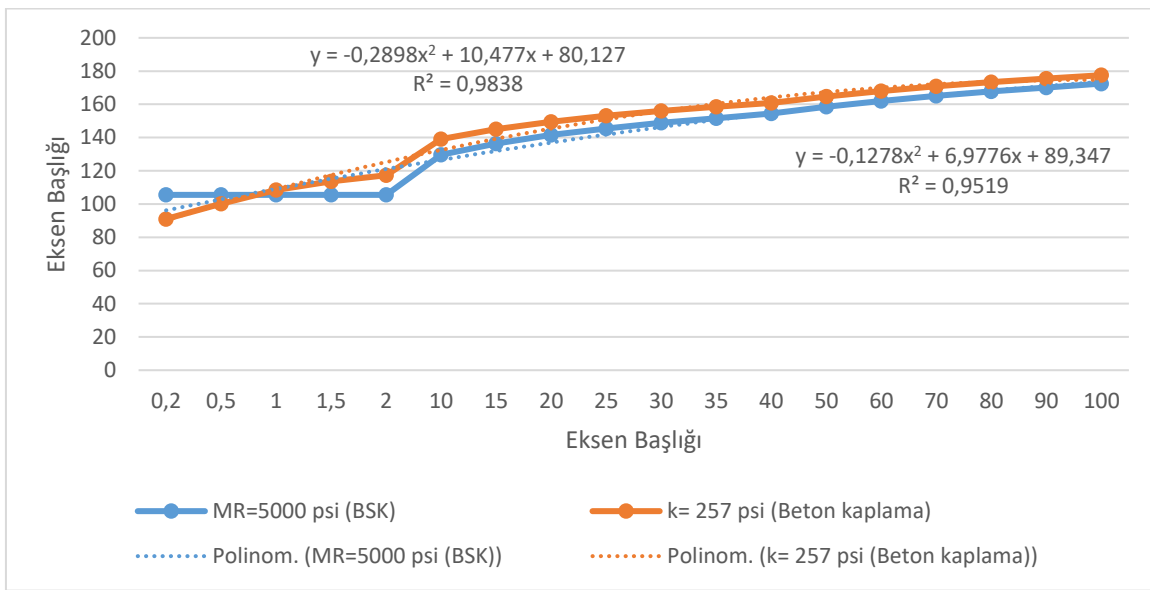
Şekil 4.15. Düşük değerlerde beton kaplama ve esnek kaplama birim maliyet karşılaştırması



Şekil 4.16. Beton kaplama(k=25 psi) ve BSK(M<sub>R</sub>=2000 psi) birim maliyet karşılaştırmasında eğilim çizgisi ve denklemleri

Verilen grafikte eğilim çizgisi ve denklemleri görülmektedir (Şekil4.15). Bu grafikteki denklemler baz alınarak hangi değerde rijit ve esnek kaplama maliyetinin eşit olduğu görülebilmektedir. Esnek kaplama için denklem  $y = -0,3893x^2 + 14,19x + 88,898$ ,  $R^2 = 0,983$

olmaktadır. Rijit kaplama için denklem  $y = -0,2691x^2 + 9,9419x + 90,956$ ,  $R^2 = 0,984$  olmaktadır. Bu iki denklemi eşitlediğimizde ortaya çıkan sonuç maliyetin eşit olduğu değer olmaktadır. Bu değer  $T_{8,2} = 0,491$  olmaktadır. Denklem diğer tarafında maliyet hesabı yapılabilir. Bulunan  $T_{8,2}$  değeri yerine yerleştirildiğinde hem esnek kaplama hem de rijit kaplama maliyet değeri 95,775 TL’de eşit olmaktadır. Buna göre 0,491  $T_{8,2}$  değerinden önce rijit kaplama esnek kaplamaya göre daha maliyetli olmaktadır. 0,491  $T_{8,2}$  değerinden sonra esnek kaplamanın maliyeti, rijit kaplamayı geçmektedir.  $T_{8,2}$  değeri arttıkça esnek kaplama rijit kaplamaya göre daha maliyetli olmaktadır.



Şekil 4.16. Beton kaplama(k=200psi) ve BSK(M<sub>R</sub>=5000 psi) birim maliyet karşılaştırmasında eğilim çizgisi ve denklemleri

Verilen grafikte eğilim çizgisi ve denklemleri görülmektedir (Şekil4.16). Bu grafikteki denklemler baz alınarak hangi değerde rijit ve esnek kaplama maliyetinin eşit olduğu görülebilmektedir. Esnek kaplama için denklem  $y = -0,1278x^2 + 6,9776x + 89,347$ ,  $R^2 = 0,952$  olmaktadır. Rijit kaplama için denklem  $y = -0,2898x^2 + 10,477x + 80,127$ ,  $R^2 = 0,984$  olmaktadır. Bu iki denklemi eşitlediğimizde ortaya çıkan sonuç maliyetin eşit olduğu değer olmaktadır. Bu değer  $T_{8,2} = 2,655$  olmaktadır. Denklem diğer tarafında maliyet hesabı yapılabilir. Bulunan  $T_{8,2}$  değeri yerine yerleştirildiğinde hem esnek kaplama hem de rijit kaplama maliyet değeri 106,969 TL olmaktadır. Buna göre 2,655  $T_{8,2}$  değerinden önce rijit kaplama esnek kaplamaya göre daha maliyetli olmaktadır. 2,655  $T_{8,2}$  değerinden sonra

esnek kaplamanın maliyeti, rijit kaplamayı geçmektedir.  $T_{8,2}$  değeri arttıkça esnek kaplama rijit kaplamaya göre daha maliyetli olmaktadır.

#### 4.4. LR ve YSA ile Kaplama Kalınlıkları Tahmini

Çalışmanın bu bölümünde beton kaplama ve esnek kaplama kalınlıkları LR ve YSA ile tahmin edilmektedir. Kaplama kalınlıklarının gerçek değerleri ile analiz sonucunda çıkan tahmin değerleri karşılaştırılmıştır. Tahmin için kullanılan 60 farklı değerlerin %75'i eğitim, %25'i test olarak yapılmıştır. Analiz sonucunda çıkan test verileri ile gerçek kaplama kalınlıkları karşılaştırılıp grafikler oluşturulmuştur. Analizde beton kaplama için  $k=100$  psi, esnek kaplama için  $M_R=5000$  psi değerlerine karşılık gelen kaplama kalınlıkları kullanılmıştır.  $T_{8,2}=10 \times 10^6$  değerinden başlayarak  $T_{8,2}=122 \times 10^6$  değerine kadar her  $8 \times 10^6$  değerindeki kaplama kalınlıkları alınarak analiz edilmiştir.

Beton kaplama kalınlığının LR ile test sonuçları tablo halinde verilmiştir (Çizelge 4.11).

Çizelge 4.11. Beton kaplama kalınlığının LR test sonuçları

DATA NO	k (psi)	$T_{8,2}$ (milyon)	KAPLAMA KALINLIĞI (cm)	LR TEST (cm)
4	100	10	25,4	27,1
8	100	18	27,8	27,9
12	100	26	29,4	28,8
16	100	34	30,6	29,6
20	100	42	31,6	30,4
24	100	50	32,4	31,2
28	100	58	33,1	32,0
32	100	66	33,8	32,9
36	100	74	34,4	33,7
40	100	82	34,9	34,5
44	100	90	35,4	35,3
48	100	98	35,8	36,1
52	100	106	36,2	37,0
56	100	114	36,6	37,8
60	100	122	37,0	38,6

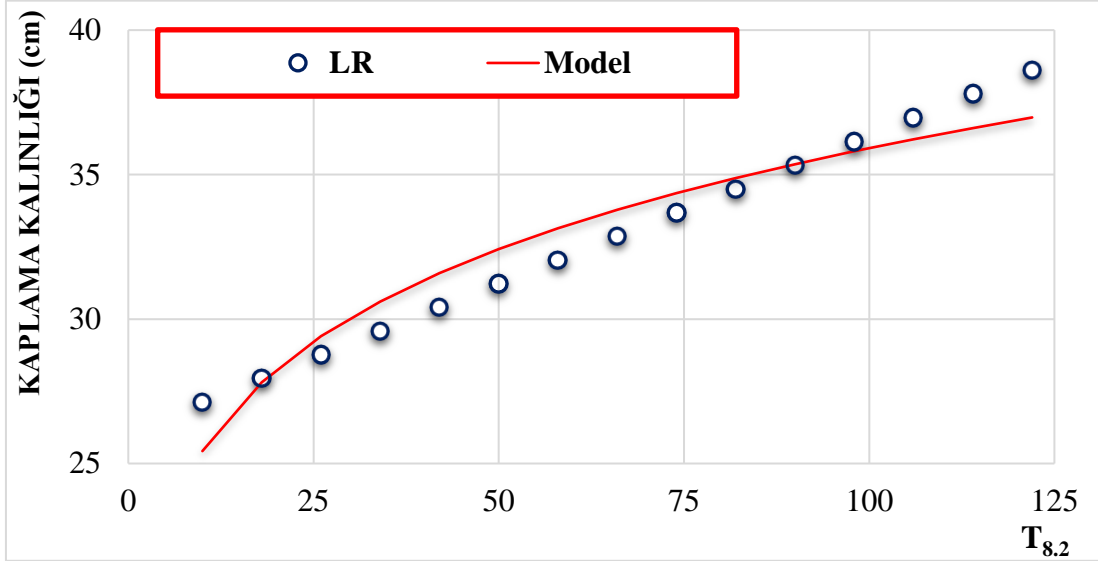
Yapılan LR test analizinin sonuçları ile hata, hataların kareleri ve yüzde hata değerleri tablo olarak verilmiştir (Çizelge 4.12.) Bu verilere göre Hataların Kareleri Ortalaması(HKO),

Ortalama Yüzde Hata (OYH) ve Korelasyon değerleri hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamada HKO=0,966, OYH=2,653 ve Korelasyon=0,962 olarak bulunmuştur.

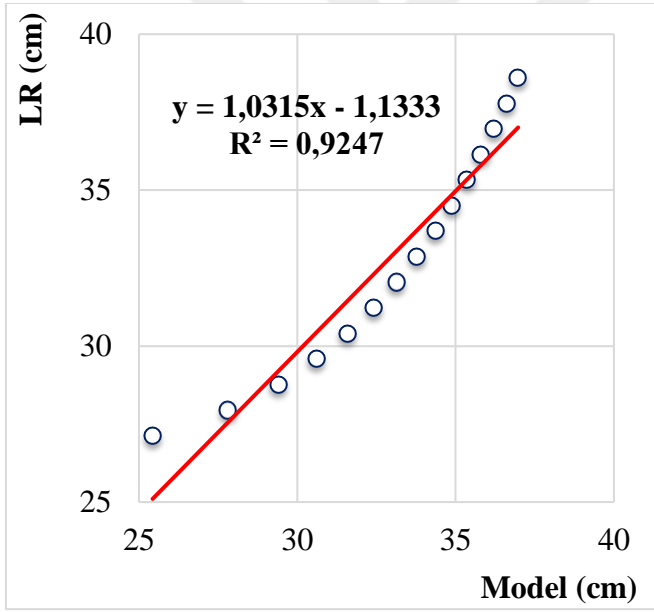
Çizelge 4.12. Beton kaplama LR test sonuçlarına göre regresyon analiz sonuçları

GERÇEK DEĞERLER(cm)	ANALİZ SONUÇLARI(cm)	HATA	HATALARIN KARELERİ	YÜZDE HATA DEĞERLERİ (%)
25,4	27,1	-1,691	2,860	6,650
27,8	27,9	-0,126	0,016	0,452
29,4	28,8	0,639	0,409	2,175
30,6	29,6	1,024	1,049	3,346
31,6	30,4	1,184	1,401	3,747
32,4	31,2	1,193	1,422	3,679
33,1	32,0	1,094	1,196	3,300
33,8	32,9	0,913	0,833	2,703
34,4	33,7	0,668	0,447	1,945
34,9	34,5	0,372	0,138	1,067
35,4	35,3	0,033	0,001	0,094
35,8	36,1	-0,341	0,116	0,953
36,2	37,0	-0,746	0,557	2,060
36,6	37,8	-1,178	1,387	3,216
37,0	38,6	-1,632	2,663	4,413

LR model karşılaştırılması grafiğinde lineer regresyon denklemi  $y= 1,0315x-1,1333$ ,  $R^2=0,93$  çıkmıştır. Bu sonuçlar modelin gerçeğe yakın olduğunu göstermektedir. Beton kaplama kalınlığının  $T_{8,2}$  değerine göre LR analiz grafiği (Şekil4.17) ve LR ve Model karşılaştırma grafiği (Şekil 4.18) verilmektedir.



Şekil 4.17. Beton kaplama kalınlığının T<sub>8,2</sub> değerine göre LR analiz grafiği



Şekil 4.18. Beton kaplama kalınlığının LR ve Model karşılaştırma grafiği

Aşağıda beton kaplama kalınlığının YSA ile test sonuçları tablo halinde verilmiştir (Çizelge 4.13).

Çizelge 4.13. Beton kaplama kalınlığının YSA test sonuçları

DATA NO	k (psi)	T <sub>8.2</sub> (milyon)	KAPLAMA KALINLIĞI (cm)	YSA TEST (cm)
4	100	10	25,4	25,6
8	100	18	27,8	27,3
12	100	26	29,4	28,9
16	100	34	30,6	30,3
20	100	42	31,6	31,5
24	100	50	32,4	32,5
28	100	58	33,1	33,3
32	100	66	33,8	34,0
36	100	74	34,4	34,5
40	100	82	34,9	34,9
44	100	90	35,4	35,2
48	100	98	35,8	35,5
52	100	106	36,2	35,7
56	100	114	36,6	35,8
60	100	122	37,0	36,0

Yapılan YSA test analizinin sonuçları ile beton kaplama için hata, hataların kareleri ve yüzde hata değerleri aşağıda tablo olarak verilmiştir (Çizelge 4.14). Bu verilere göre Hataların Kareleri Ortalaması (HKO), Ortalama Yüzde Hata (OYH) ve Korelasyon değerleri hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamada HKO=0,179, OYH=0,974 ve Korelasyon=0,994 olarak bulunmuştur.

Bu verilere göre YSA modeli LR modeline göre daha doğru sonuçlara ulaşmıştır.

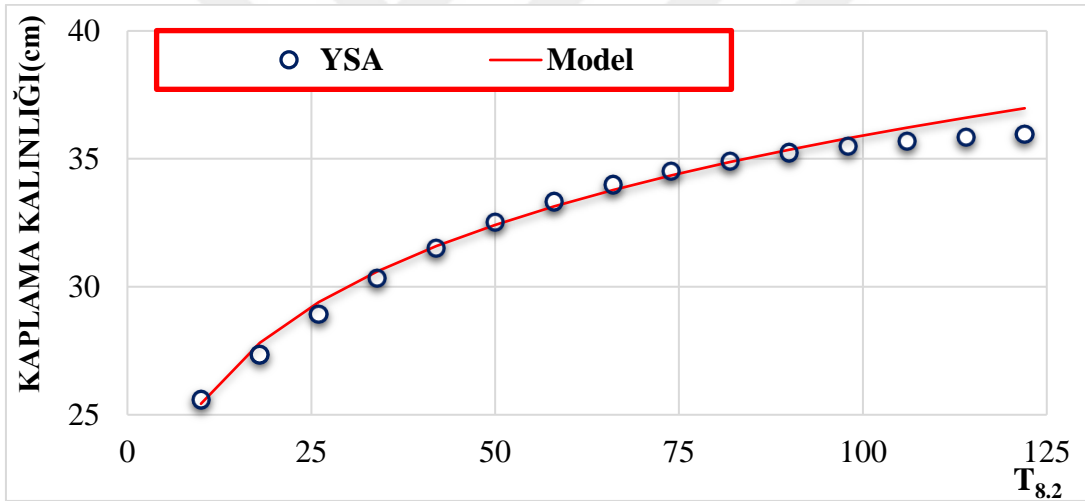
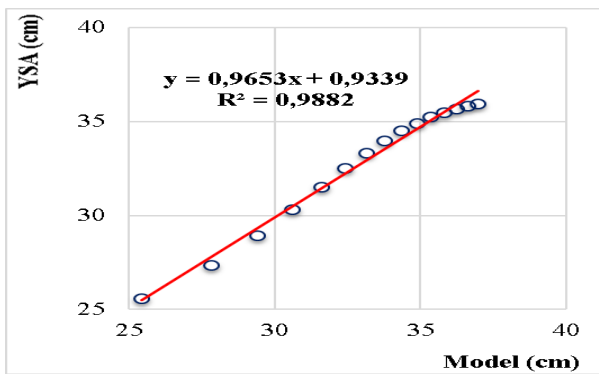
Çizelge 4.14. Beton kaplama YSA test sonuçlarına göre regresyon analiz sonuçları

GERÇEK DEĞERLER(cm)	ANALİZ SONUÇLARI(cm)	HATA	HATALARIN KARELERİ	YÜZDE HATA DEĞERLERİ (%)
25,4	25,6	-0,157	0,025	0,618
27,8	27,3	0,471	0,222	1,693
29,4	28,9	0,466	0,218	1,586
30,6	30,3	0,278	0,077	0,908
31,6	31,5	0,066	0,004	0,208
32,4	32,5	-0,099	0,010	0,305
33,1	33,3	-0,192	0,037	0,581

Çizelge 4.14.(Devam) Beton kaplama YSA test sonuçlarına göre regresyon analiz sonuçları

33,8	34,0	-0,210	0,044	0,620
34,4	34,5	-0,157	0,025	0,456
34,9	34,9	-0,045	0,002	0,130
35,4	35,2	0,113	0,013	0,320
35,8	35,5	0,308	0,095	0,861
36,2	35,7	0,530	0,281	1,462
36,6	35,8	0,769	0,591	2,100
37,0	36,0	1,021	1,043	2,762

YSA model karşılaştırılması grafiğinde lineer denklem  $y = 0,9653x + 0,9339$ ,  $R^2 = 0,988$  çıkmıştır. Bu sonuçlar modelin gerçeğe LR değerine göre daha yakın olduğunu göstermektedir. Beton kaplama kalınlığının  $T_{8,2}$  değerine göre YSA analiz grafiği (Şekil 4.19) ve YSA ve Model karşılaştırma grafiği (Şekil 4.20) verilmektedir.

Şekil 4.19. Beton kaplama kalınlığının  $T_{8,2}$  değerine göre YSA analiz grafiği

Şekil 4.20. Beton kaplama kalınlığının YSA ve Model karşılaştırma grafiği



Karşılaştırmanın yapılması için esnek kaplama değerlerinin LR test sonuçları verilmiştir (Çizelge 4.15)

Çizelge 4.15. Esnek kaplama kalınlığının LR test sonuçları

DATA NO	Mr(psi)	T <sub>8.2</sub> (milyon)	KAPLAMA KALINLIĞI (cm)	LR TEST (cm)
4	5000	10	15,1	16,0
8	5000	18	16,3	16,4
12	5000	26	17,1	16,8
16	5000	34	17,7	17,2
20	5000	42	18,2	17,6
24	5000	50	18,6	18,0
28	5000	58	18,9	18,4
32	5000	66	19,2	18,8
36	5000	74	19,5	19,2
40	5000	82	19,7	19,6
44	5000	90	20,0	20,0
48	5000	98	20,2	20,4
52	5000	106	20,4	20,8
56	5000	114	20,5	21,2
60	5000	122	20,7	21,5

Yapılan LR test analizinin sonuçları ile esnek kaplama için hata, hataların kareleri ve yüzde hata değerleri aşağıda tablo olarak verilmiştir (Çizelge 4.16). Bu verilere göre Hataların Kareleri Ortalaması(HKO), Ortalama Yüzde Hata (OYH) ve Korelasyon değerleri hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamada HKO=0,248, OYH=2,339 ve Korelasyon=0,95765 olarak bulunmuştur.

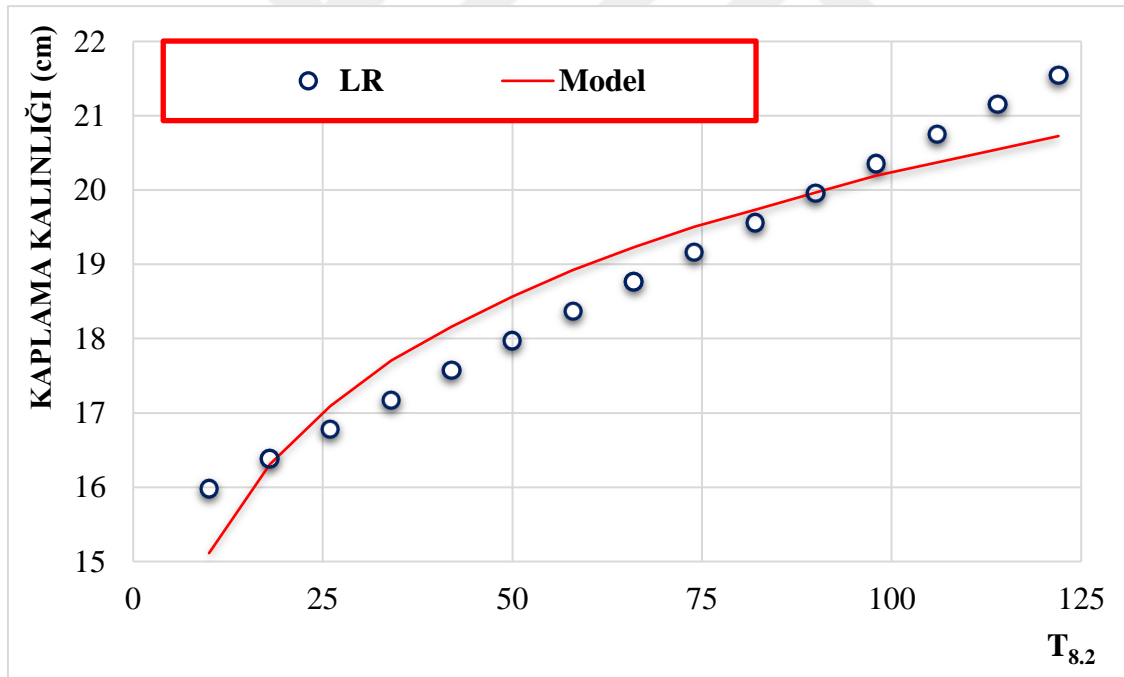
Çizelge 4.16. Esnek kaplama LR test sonuçlarına göre regresyon analiz sonuçları

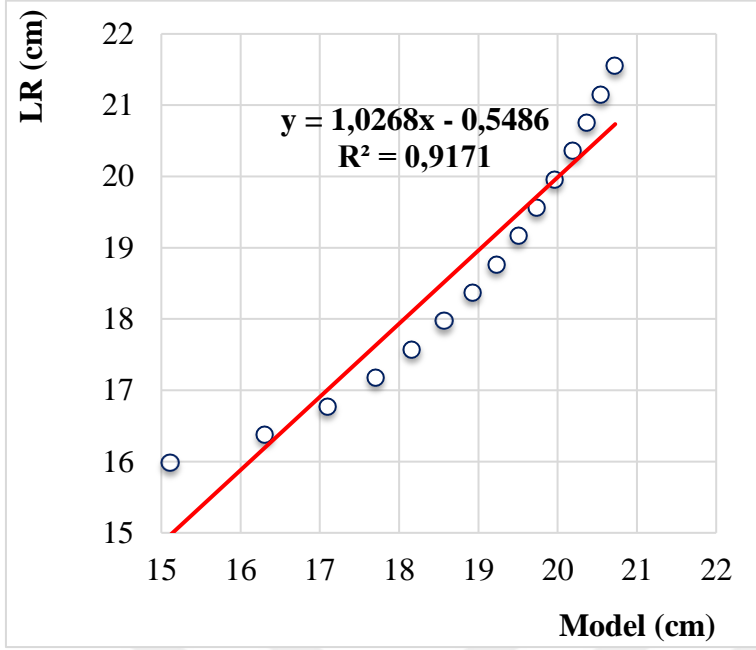
GERÇEK DEĞERLER	ANALİZ SONUÇLARI	HATA	HATALARIN KARELERİ	YÜZDE HATA DEĞERLERİ (%)
15,1	16,0	-0,870	0,757	5,756
16,3	16,4	-0,074	0,005	0,452
17,1	16,8	0,316	0,100	1,850
17,7	17,2	0,528	0,279	2,984
18,2	17,6	0,588	0,346	3,237

Çizelge 4.16.(Devam) Esnek kaplama LR test sonuçlarına göre regresyon analiz sonuçları

18,6	18,0	0,597	0,356	3,214
18,9	18,4	0,555	0,308	2,932
19,2	18,8	0,462	0,214	2,403
19,5	19,2	0,344	0,118	1,763
19,7	19,6	0,175	0,031	0,887
20,0	20,0	0,006	0,000	0,031
20,2	20,4	-0,163	0,027	0,806
20,4	20,8	-0,383	0,146	1,878
20,5	21,2	-0,602	0,363	2,931
20,7	21,5	-0,822	0,676	3,966

LR model karşılaştırılması grafiğinde lineer denklem  $y= 1,0268x-0,5486$ ,  $R^2=0,917$  çıkmıştır. Esnek kaplama kalınlığının  $T_{8,2}$  değerine göre LR analiz grafiği (Şekil 4.21) ve LR ve Model karşılaştırma grafiği (Şekil 4.22) verilmektedir.

Şekil 4.21. Esnek kaplama kalınlığının  $T_{8,2}$  değerine göre LR analiz grafiği



Şekil 4.22. Esnek kaplama kalınlığının LR ve Model karşılaştırma grafiği

Esnek kaplama değerlerinin YSA test sonuçları aşağıda verilmiştir (Çizelge 4.15)

Çizelge 4.17. Esnek kaplama kalınlığının YSA test sonuçları

DATA NO	Mr(psi)	T <sub>8.2</sub> (milyon)	KAPLAMA KALINLIĞI (cm)	YSA TEST (cm)
4	5000	10	15,1	14,8
8	5000	18	16,3	16,2
12	5000	26	17,1	17,1
16	5000	34	17,7	17,7
20	5000	42	18,2	18,2
24	5000	50	18,6	18,5
28	5000	58	18,9	18,8
32	5000	66	19,2	19,1
36	5000	74	19,5	19,4
40	5000	82	19,7	19,7
44	5000	90	20,0	19,9
48	5000	98	20,2	20,1
52	5000	106	20,4	20,3
56	5000	114	20,5	20,5
60	5000	122	20,7	20,6

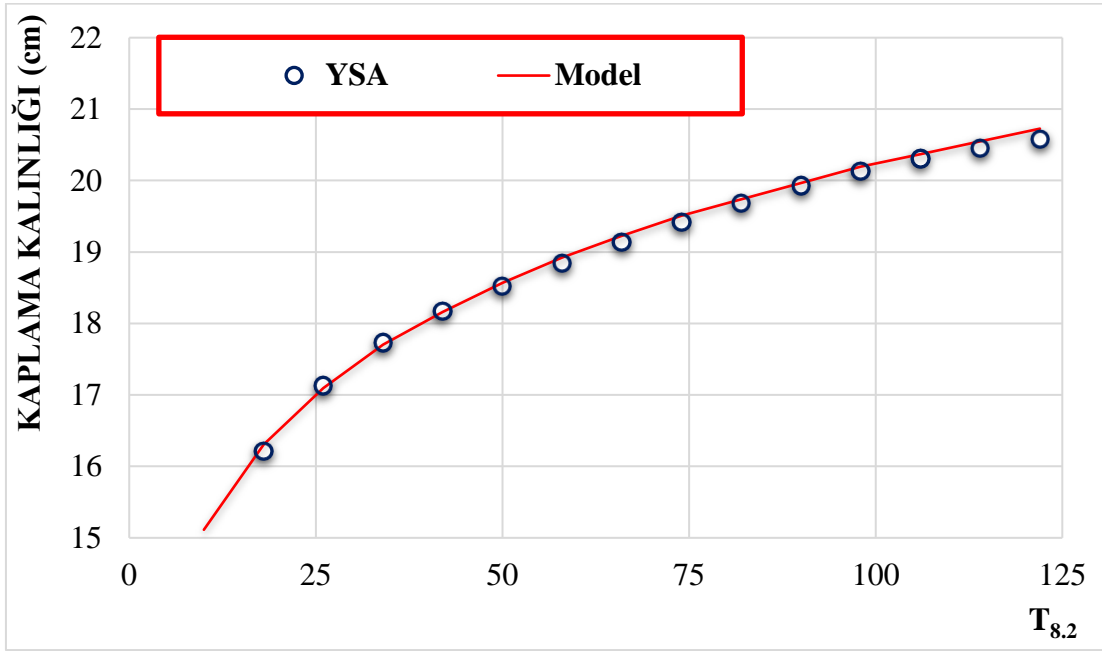
Yapılan YSA test analizinin sonuçları ile beton kaplama için hata, hataların kareleri ve yüzde hata değerleri aşağıda tablo olarak verilmiştir (Çizelge 4.14). Bu verilere göre Hataların Kareleri Ortalaması(HKO), Ortalama Yüzde Hata (OYH) ve Korelasyon değerleri hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamada HKO=0,011, OYH=0,445 ve Korelasyon=0,999 olarak bulunmuştur.

Bu verilere göre YSA modeli LR modeline göre daha doğru sonuçlara ulaşmıştır.

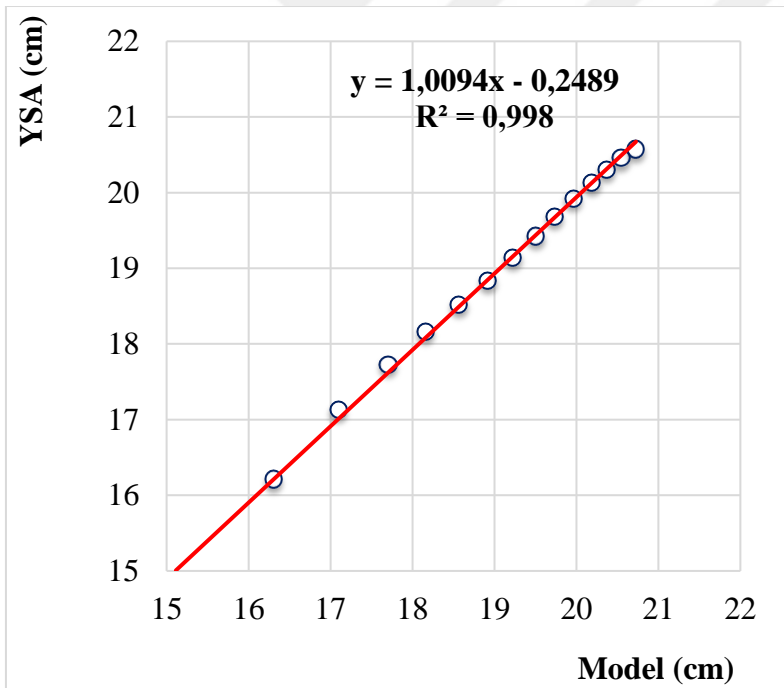
Çizelge 4.18. Esnek kaplama YSA test sonuçlarına göre regresyon analiz sonuçları

GERÇEK DEĞERLER	ANALİZ SONUÇLARI	HATA	HATALARIN KARELERİ	YÜZDE HATA DEĞERLERİ (%)
15,1	14,8	0,281	0,079	1,859
16,3	16,2	0,096	0,009	0,587
17,1	17,1	-0,033	0,001	0,192
17,7	17,7	-0,029	0,001	0,165
18,2	18,2	-0,007	0,000	0,039
18,6	18,5	0,045	0,002	0,245
18,9	18,8	0,083	0,007	0,439
19,2	19,1	0,089	0,008	0,462
19,5	19,4	0,085	0,007	0,437
19,7	19,7	0,050	0,002	0,252
20,0	19,9	0,040	0,002	0,202
20,2	20,1	0,061	0,004	0,302
20,4	20,3	0,062	0,004	0,303
20,5	20,5	0,093	0,009	0,451
20,7	20,6	0,152	0,023	0,735

YSA model karşılaştırılması grafiğinde lineer denklem  $y= 1,0094x-0,2489$ ,  $R^2=0,998$  çıkmıştır. Bu sonuçlar modelin gerçeğe LR değerine göre daha yakın olduğunu göstermektedir. Beton kaplama kalınlığının  $T_{8,2}$  değerine göre YSA analiz grafiği (Şekil 4.23) ve YSA ve Model karşılaştırma grafiği (Şekil 4.24) verilmektedir.



Şekil 4.23. Esnek kaplama kalınlığının T<sub>8,2</sub> değerine göre YSA analiz grafiği



Şekil 4.24. Esnek kaplama kalınlığının YSA ve Model karşılaştırma grafiği

Sonuç olarak, kaplama kalınlıklarının M<sub>R</sub> ve T<sub>8,2</sub> değerlerine göre karşılaştırması yapılmaktadır. Grafiklerden de anlaşılacağı üzere aynı değerler baz alındığında birim maliyet açısından en ucuz kaplama sathi kaplama olarak görülmektedir. Rijit kaplama iyi

zemin koşullarında en pahalı kaplama türü olmaktadır. Ayrıca kaplama kalınlıkları arttıkça bütün kaplama türlerindeki maliyetler doğru orantıda artmaktadır.

Sathi kaplama maliyeti hesaplı olmaktadır. Çünkü kaplama kalınlığının minimum olması ve sıcak karışıma nazaran fazla bitümlü tabakaların olmayışı sathi kaplamayı hesaplı yapmaktadır.

LR ve YSA ile kaplama kalınlığı tahmininde, YSA analiz değerleri LR değerlerine göre daha iyi sonuç verdiği gözlenmiştir.



## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Ülkemizde sanayinin gelişmesiyle birlikte ulaştırma ağlarının önemi giderek artmaktadır. Karayolu ulaşımı ülkemizde en çok tercih edilen ulaştırma ağı konumundadır. Temelde asfalt kaplamalı yani esnek ve beton kaplamalı yani rijit üstyapılar olmak üzere iki tip karayolu üstyapısı bulunmaktadır. Esnek kaplamalar da kendi içinde birçok alt türü barındırmakta ancak ülkemizde bunlardan en çok uygulananları BSK ve Sathi kaplamalardır. Ülkemizde karayolu kullanımı artarken yol kaplamalarının tasarımı aynı derecede önem arz etmektedir. Yapılan çalışmada üstyapı kaplamalarını etkileyen parametrelere bağlı olarak kaplama kalınlık hesaplaması yapılmıştır. Kaplama kalınlıklarına göre metrekare birim maliyet hesabı çıkarılmıştır. Ayrıca kaplama kalınlıklarının tahmini için LR ve YSA analizleri yapılmaktadır. Kaplama kalınlıklarının tahmininde LR ve YSA analizleri karşılaştırılmaktadır.

Sathi kaplamalı üstyapılarda ilk yapım maliyeti, her koşulda en ucuz üstyapı tipidir. Buna rağmen, uzun dönemde çok fazla bakım masrafı gerektirdiğinden, en pahalı üstyapı çeşidi olabilmektedir. Beton kaplamalı üstyapılarda kaplama kalınlığı arttıkça, maliyet de artmaktadır. Eşdeğer biçimde sıcak karışım asfalt kaplamada da tabakaların kalınlıkları artarken maliyetleri artmaktadır.

Sathi kaplama kalınlıkları değişimi grafikler yardımıyla daha net görülmektedir. Grafikten de anlaşılacağı üzere 5000  $M_R$  değerindeki sathi kaplama alttemel kalınlığı  $T_{8,2}$  değeri arttıkça paralel bir şekilde artmaktadır. Diğer taraftan  $3 \times 10^6$   $T_{8,2}$  değerine sahip sathi kaplama kalınlığı  $M_R$  değeri arttıkça azalmaktadır. Yapılan çalışmada, sabit  $M_R$  değeri ve  $T_{8,2}$  değerlerine göre metrekare başına birim fiyat tablosu verilmektedir.

Esnek kaplamalı üstyapılar için taban zemini esneklik modülü ( $M_R$ ) ve 8,2 ton eşdeğer dingil yükü tekerrür sayısı ( $T_{8,2}$ )'na göre esnek kaplama alttemel kalınlıklarının değişimi tabloda görülmektedir. Buna göre  $M_R$  değerinin artmasıyla kaplama kalınlığı azalmakta,  $T_{8,2}$  değeri artmasıyla da kaplama kalınlığı artmaktadır. Yapılan çalışmada, 5 cm kalınlıkta aşınma tabakası, 8 cm kalınlıkta binder tabakası, 12 cm kalınlıkta bitümlü sıcak karışım (BSK) tabakası verilmektedir. Bu verilere göre 2021 KGM birim fiyat listesinden alınan birim fiyat

ve metrekare başına birim fiyat tablosu verilmektedir. Bu tabloya göre 5 cm aşınma tabakası, 8 cm olarak verilen binder tabakası, 12 cm olan BSK temel kaplaması, 20 cm plent-miks temel kaplaması için metrekare birim fiyat toplamda 89,232 TL olmaktadır. Alttemel kaplama kalınlıklarından bulunan değerlerle toplanarak nihai metrekare birim maliyete ulaşılmaktadır. Esnek kaplama maliyet grafiğinde 2000 psi, 8000 psi, 15000 psi ve 25000-40000 psi  $M_R$  değerlerinin maliyete olan etkisi görülmektedir.  $T_{8,2}$  değeri arttıkça 25000-40000 değeri dışındaki maliyet değerleri artmaktadır. Oluşturulan başka grafikte  $0,2 \times 10^6$ ,  $2 \times 10^6$ ,  $20 \times 10^6$ ,  $40 \times 10^6$  ve  $100 \times 10^6$   $T_{8,2}$  değerlerinin değişimi görülmektedir.  $M_R$  değeri arttıkça  $T_{8,2}$  değerlerine göre maliyet azalmaktadır.

Beton kaplamalı üstyapılarda yatak katsayısının artmasıyla kaplama kalınlığının azaldığı görülmektedir. Çalışmada rijit kaplama kalınlık hesabı için C35/40 beton tipi baz alınmaktadır. Diğer taraftan  $T_{8,2}$  değeri arttıkça kaplama kalınlığı artmaktadır. Yapılan çalışmada beton kaplama altına alttemel olarak 20cm plent-miks alttemel kullanılmaktadır. 20 cm plent-miks alttemel ton fiyatı 54,31TL olarak KGM 2021 birim fiyat listesinden alınmaktadır. Verilen grafikte 25 psi, 200 psi ve 1000 psi yatak katsayısı (k) değerleri baz alındığında düşük  $T_{8,2}$  ve yüksek k değerlerinde kaplama kalınlığı, düşük  $T_{8,2}$  ve düşük k değerlerine göre daha az olmaktadır.  $T_{8,2}$  ve k değerleri arttıkça aralarındaki fark da düşmektedir.

Son olarak her üç kaplama türünün karşılaştırılması yapılmaktadır. Nihai maliyet karşılaştırmasını yapmak için sathi kaplama, esnek kaplama ve beton kaplama metrekare birim fiyat değerleri grafik olarak verilmektedir. Bu karşılaştırmaya göre en ekonomik kaplama türü  $3 \times 10^6$   $T_{8,2}$  değerine kadar sathi kaplama olmaktadır.  $3 \times 10^6$   $T_{8,2}$  değerinden fazla değerlerde sathi kaplama önerilmemektedir. Sathi kaplamadan sonra kötü zemin koşullarında ekonomiklik bakımından 5000 psi  $M_R$  ve 200 psi k değerlerine göre  $2,433 \times 10^6$   $T_{8,2}$  değerinin altında esnek kaplama olan BSK asfalt kaplaması gelmektedir.  $2,433 \times 10^6$   $T_{8,2}$  değerinin üzerinde ise rijit kaplama türü daha ekonomik olmaktadır. İyi zemin koşullarında  $3 \times 10^6$   $T_{8,2}$  değerine kadar ekonomik olarak sathi kaplama,  $3 \times 10^6$   $T_{8,2}$  değerinden sonra esnek kaplama ve en son rijit kaplama gelmektedir.



İyi zemin koşullarında ekonomik olarak rijit kaplamalı üstyapılar yerine esnek kaplamalı üstyapılar tercih edilmelidir. Ayrıca ülkemizde kullanılan araç gereç bakımından rijit kaplama yapılması, esnek kaplamalara göre daha güç olmaktadır.

Sathi kaplama; ucuz ve hızlı bir yol kaplama türü olmaktadır. Fakat sürüş konforunun iyi olmaması, sürtünme kuvvetinin yüksek olması, sık aralıklarla değiştirilmesi, taşıma gücünün az olması ve bakım onarım giderlerinin fazla olması gibi sebepler ile bitümlü sıcak karışımlı bir yola göre daha az tercih edilmesi gereken bir kaplama türü olmaktadır.

Kaplama kalınlıklarının tahmin edilmesinde yapılan analizlerde ise YSA modeli ile LR modeli karşılaştırılmıştır. Esnek ve rijit kaplama kalınlıklarında  $T_{8,2} = 4 \times 10^6 - 122 \times 10^6$  arasında toplam 60 veri seti oluşturulmuştur. Esnek kaplama için  $M_R = 5000$  psi, rijit kaplama için ise  $k = 100$  psi değeri kullanılmıştır. Verilen  $T_{8,2}$ ,  $M_R$  ve  $k$  değerlerine göre kaplama kalınlıkları tahmini yapılmaktadır. Veri setinin %75'i yani 45 veri eğitim için, % 25'i yani 15 veri test için kullanılmıştır. Kaplama kalınlıklarının tahmin edilmesinde test sonuçları dikkate alınarak analizler yapılmıştır. Yapılan çalışmada lineer regresyon analizi için HKO, OYH ve Korelasyon hesapları yapılmıştır. Çıkan sonuçlara göre esnek ve rijit kaplama kalınlıklarının tahmininde YSA analizi LR analiz modeline göre daha iyi sonuç vermiştir. Kaplama kalınlıklarının tahmin edilmesinde YSA iyi bir seçenek olmaktadır.

Sonuç olarak sathi kaplama; kısa vadeli ve günlük kaygıları giderir, ancak uzun vadede önemli ekonomik kayıplara neden olur.

Bu çalışmaya göre,  $M_R$  ve  $T_{8,2}$  değerlerine göre en uygun kaplama türü seçilebilmektedir. Seçilen kaplamaların maliyetleri ve tasarım aşamasında hangi üstyapı türünün kullanılması gerektiği incelenebilmektedir. Kaplama kalınlıklarının tahmin edilmesinde LR ve YSA analizleri kullanılabilir. YSA modeli daha iyi tahmin sonuçlarına varmaktadır.

## KAYNAKLAR

- AASHTO, (1986). *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures*, Washington, D.C.
- AASHTO, (1993). *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures*, Washington, D.C.
- Ağar, E. Umar, F., (1985). Yol Üstyapısı, *İstanbul Teknik Üniversitesi Matbaası*, İstanbul.
- Larson, R. M., Vanikar, S., Forster, S. W., (1993). Summary Report-U.S. *Tour of European Concrete Highways-Follow-up Tour of Germany and Austria, FHWA-SA-93-080*, Washington, DC.
- Horne, D., Belancio, G., Carradine Jr, S A., Gaj, S., Hallin, J., Jackson, N., Jordan, C., LUCAS, K., Zink, R., (1997). *FHWA Study of South African Pavement and Other Highway Technologies and Practices*, U.S. Department of Transportation, Washington, DC.
- Arapoğlu, A., S., (2015). Bozulmuş Asfalt Kaplamaların Geri Dönüşüm Maliyet Analizi Ve Optimum Geri Kazanım Mesafesinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, Türkiye.
- Arık, A. (1998). Balıkesir İli Çevresindeki Karayollarında Esnek Üstyapı Bozulmalarının Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, 1998.
- Ayçiçek, S. (2011). Esnek Üstyapılarda İmalat Ve Uygulama Kusurları, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü Kentsel Sistemler Ve Ulaştırma Yönetimi, Bahçeşehir Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
- Bağdatlı, M., E., C., (2010). Esnek Üstyapı Kaplamalarındaki Hasar Özelliklerinin Bakım Maliyetleri Üzerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Namık Kemal Üniversitesi, Kırklareli, Türkiye
- BAKIŞ, A. (2018). Esnek ve Rijit Üstyapılarda Kaplama Kalınlığı ve Üstyapı Maliyetinin En Küçük Kareler Yöntemiyle Hesaplanması. *International Journal of Engineering Research and Development*, 10(2), 119-126.
- Carey, W Irick, W.P. (1962). The Pavement Serviceability-Performance Concept, *Highway Research Board Special Report 61E, AASHO Road Test*.
- Çalışıcı, M., Koç, E., ve Cansız, Ö. F. (2017). Katyonik Asfalt Emülsiyon Stabilizasyonlu Zeminin Esnek Üstyapı Tabaka Kalınlığına Etkisi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 32(2), 231–238.
- Çalışıcı, M., Gürü, M., Çubuk, M. K., ve Cansız, Ö. F. (2018). Improving the aging resistance of bitumen by addition of polymer based diethylene glycol. *Construction and Building Materials*, 169, 283–288.

- Çalışıcı, M. (2018). The Effect of Bitumen Stabilized Subgrade on Cost of the Flexible Pavement. *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*, 5(11), 6–8.
- Çelik, M.(2014). Karadeniz Bölgesi Köy Yolları İçin Rijit Ve Esnek Kaplamanın Mekanistik Ve Maliyet Açısından Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, Türkiye.
- Çevik, N. (2014.). Bazalt Elyafının Beton Yollarda Kullanılabilirliği, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli.
- Desai, C.S. (2001). *User's Manual for the DSC-2D Code for the 2002 Design Guide*, Arizona State University, Arizona.
- Doğan, O. (2006). Esnek Üstyapılı Devlet Yollarındaki Bozulmaların Bulanık Mantık ile Tahmini, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Edis, E. (2007). Asfalt Ve Beton Kaplamalı Yolların Maliyet Yönünden Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği, Mustafa Kemal Üniversitesi, Antakya, Türkiye
- Geçkil, T., Mehmet Tanyıldızı, M., M. (2019). Zemin Taşıma Gücünün Rijit ve Esnek Üstyapıların Kalınlıklarına ve Maliyetlerine Etkisi, *Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi* 31(2), 399-406.
- Giriş, Ü. (2007). Esnek üstyapılar ile rijit üstyapıların teknik ve ekonomik yönden karşılaştırılması. Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye.
- Göktepe, A., B., Açar, E., Lav, A., H.(2005). Esnek üstyapılarda mekanik özelliklerin yapay sinir ağları kullanılarak geri-hesaplanması. *İtü mühendislik dergisi* 4(2), 31-42.
- Guidelines for Skid Resistant Pavement Design (1976). *SRPD-1 AASHTO*, Washington, D.C.
- Ilıcalı, M., Tayfur, S., Özen, H., Sönmez, İ., & Eren, K. (2001). Yıldız Teknik Üniversitesi Yayın Merkezi Başkanlığı. *Asfalt ve uygulamaları, İSFALT, Seçim Ofset, İstanbul*.
- Alatoom, Y. I., Al-Suleiman, T. I. (2021). Development of pavement roughness models using Artificial Neural Network (ANN). *International Journal of Pavement Engineering*, 1-16.
- İyınam, Ş. (1997). Karayollarında Üstyapı Bakım Çalışmalarını Planlama Metodolojisi, Doktora Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- Karaşahin, M. Tığdemir, M. (1995). “Esnek Yol Üstyapı Bakım Çalışmalarında Uzman Sistemler”, 3. Ulaştırma Kongresi, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi, İstanbul.
- Karayolları Genel Müdürlüğü (2008) *Esnek Üstyapı Projelendirme Rehberi*.
- Karayolları Genel Müdürlüğü (2000). *Karayolları Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi, Karayolları Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı*, Ankara.
- Kaşak, S., Komut, M., Altıok, Ş., (2019). Ülkemiz Karayolları İçin Beton Yol Projelendirme Rehberi Çalışmaları Ve Beton Sınıfına Bağlı Beton Plak Kalınlıkları 1. Beton Yollar Kongresi ve Sergisi, Ankara, Türkiye.
- Kök, B. V., Yılmaz, M., Geçkil, A. (2012). Çimento stabilizasyonlu zeminin esnek üstyapı maliyetine etkisi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 18(3), 165-172.
- Kök, E. (2008). Karayolu ve Havaalanı Üstyapı Tasarım Yöntemleri, Karşılaştırması Ve Türkiye Uygulamaları, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ulaştırma Mühendisliği, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
- Kuloğlu, N., Kök, B. V., Yılmaz, M., Tanyıldızı, M. (2011). AASHTO Metodunda Rijit Üstyapı Kaplama Kalınlığına Etki Eden Parametrelerin İncelenmesi, 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), Elazığ, Turkey.
- Mohammad Hossaina, Leela Sai Praveen Gopisetib, Md. Suruz Miahc (2020). Rijit kaplamaların uluslararası pürüzlülük indeksini tahmin etmek için yapay sinir ağı modellenmesi. *Chinese Society of Pavement Engineering International Journal of Pavement Research and Technology*.
- Öztürk, F. (2006). AASHTO 1986 Esnek Yol Üstyapıları Projelendirme Yönteminin Bulanık Mantık Tekniği İle Modellenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, Türkiye.
- Pancar, E.B. (2012). Beton Yol Kaplamaların Sayısal Tasarımında Bilgi Sistemleri ve Yapay Zekâ Yaklaşımı, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Pancar, E.B. (2008). Beton Yollarda Enine Yivlemenin Sürtünmeye ve Basınç Dayanımına Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, On Dokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun.
- Pfeifer, L. (2001). *Beton Kaplamanın Asıl Şartnamesi ve Taşıma Gücü Tasarımı İçin Bir Sistem*, Almanya.
- Sulten, P. (2001). Kayma Dirençli Gürültü Azaltıcı Betonlar, *Federal Otoyol Araştırma Enstitüsü*, Almanya.

Szymański, P., Pikos, M., ve Nowotarski, P. (2017). Concrete road surface with the use of cement concrete-selected results. *Procedia engineering*, 208, 166-173.

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

Tunç, A. (2007). Yol Malzemeleri ve Uygulamaları, *Nobel Yayınevi*, Ankara.

Vqyeux, K. (2001).“Renovation of Two Places at Dinant”, 19th Belgian Road Congress, Belgium.

Yeğınobalı, A.(2003). Ulusal Beton Yollar Kongresi 2002 (Konuşma Metinleri), Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliğı, Ankara.



## DİZİN

### A

AASHTO · x, 3, 4, 5, 9, 13, 16,  
25, 34, 35, 60, 61, 62  
agrega · 1, 6, 21, 22, 24, 26, 29,  
31, 32, 37  
aks · 10, 27, 32, 34  
ampirik · 9  
Analitik · 9  
asfalt · xiii, 3, 4, 19, 25, 27, 29,  
30, 31, 39, 57, 59

### B

beton · x, xiii, 1, 2, 4, 5, 6, 7, 8, 15,  
16, 17, 18, 19, 22, 25, 34, 35,  
36, 37, 48, 51, 53, 54, 57, 58,  
59  
birim fiyat · 41, 42, 45, 46, 51,  
53, 57, 58, 59  
bitüm · 22, 26, 29

### C

CBR · 3, 6, 9

### D

değer · 10, 15  
dingil · 4, 6, 9, 10, 11, 26, 32, 39,  
44, 48, 58  
drenaj · x, 4, 23, 37, 38

### E

EDY · 10  
ekonomik · 1, 4, 6, 7, 9, 25, 59, 61

elastisite · 4, 11, 13, 25, 36  
elastisite modülü · 36  
esnek · x, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 10, 12,  
19, 20, 25, 26, 34, 36, 39, 44,  
45, 46, 53, 54, 58, 59  
esneklik modülü · 39  
Eşdeğerlik Faktörü · 11

### K

kalınlık · 5, 12, 18, 40, 46, 47, 48,  
57, 58  
kaplama · x, 1, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 11,  
14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21,  
22, 23, 24, 25, 30, 31, 32, 34,  
35, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45,  
46, 47, 48, 49, 50, 51, 53, 54,  
55, 56, 57, 58, 59  
karayolları · 1, 6, 24  
Karayolu · 1, 57, 62  
KGM · xiv, 45, 46, 51, 58

### M

maliyet · 1, 2, 3, 5, 25, 39, 41, 42,  
43, 46, 47, 48, 51, 53, 54, 55,  
57, 58, 59  
malzeme · 1, 6, 22, 23  
modülü · 2, 4, 6, 36, 39, 44, 58  
MR · 5, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45,  
46, 47, 48, 54, 55, 57, 58, 59

### P

parametre · 6

### R

rijit · 1, 2, 3, 4, 5, 17, 25, 39, 48,  
49, 58, 59, 61

### S

Sathi · x, 1, 11, 12, 39, 40, 42, 54,  
56, 57, 59

### T

T8,2 · 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45,  
47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 55,  
57, 58, 59  
Tabaka · x, 11, 60  
taban · 1, 2, 6, 11, 21, 39, 58  
tasarım · 4, 16, 17, 23, 24, 26, 37  
tekerlek · xiii, 25, 29  
Temel · 9, 10, 15, 20, 21, 22  
trafik · 1, 4, 10, 16, 19, 24, 25, 30,  
39

### U Ü

Ulaşım · iv, 1  
üstyapı · 1, 2, 3, 4, 5, 6, 9, 10, 11,  
12, 15, 17, 19, 20, 25, 45, 46,  
47, 57

### Y-Z

yatak katsayısı · 6, 50, 52, 58  
Yolcu · 1  
yük · x, 1, 2, 3, 4, 19, 24, 37  
Zemin · 10, 36, 39, 61



# TEKNOVERSITE



teknoversite **AYRICALIĞINDASINIZ**

**İSTE**

