

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

SATHİ KAPLAMA TASARIMININ MEKANİSTİK-AMPİRİK
YÖNTEMLER İLE DEĞERLENDİRİLMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Uğur HALAT

AĞUSTOS 2024

TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

SATHİ KAPLAMA TASARIMININ MEKANİSTİK-AMPİRİK
YÖNTEMLER İLE DEĞERLENDİRİLMESİ

Uğur HALAT

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"İNŞAAT YÜKSEK MÜHENDİSİ"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 08/ 07 / 2024

Tezin Savunma Tarihi : 06 / 08 / 2024

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Şeref ORUÇ

İkinci Danışman : Doç. Dr. Murat BOSTANCIOĞLU

Trabzon 2024

ÖNSÖZ

“Sathi Kaplama Tasarımının Mekanistik-Ampirik Yöntemler İle Değerlendirilmesi” isimli bu tez Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Programı’nda hazırlanmıştır.

Tez çalışmam boyunca hiçbir desteğini esirgemeyen ve bilim insanı olma yolundaki ilk adımlarımı atarken kıymetli bilgileriyle ve tecrübesiyle yolumu aydınlatan danışman hocam Sayın Prof. Dr. Şeref ORUÇ’ a teşekkür eder saygılar sunarım. Bu çalışmayı bana öneren, lisans eğitimimden itibaren emeğini üzerimden esirgemeyen, çalışmamın her aşamasında benimle ilgilenen, bilgi ve deneyimlerinden her zaman yararlandığım ikinci danışman hocam Sayın Doç. Dr. Murat BOSTANCIOĞLU’ na teşekkürü bir borç bilirim. Doğduğum günden beri elimi hiç bırakmayan, hayatım boyunca aldığım tüm kararlarda bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım ve her kararında arkamda olan, maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen ve bugünlere gelmemde en büyük paya sahip olan annem Fatma HALAT’ a ve babam Ahmet Turan HALAT’ a teşekkür eder, minnettarlığımı sunarım.

Son olarak çalışmalarım süresince desteğini her zaman hissettiren ve varlıkları ile güç veren, başarılarımla mutlu olan eşim Burcu SEÇKİN HALAT’ a ve kızım Duha Melis HALAT’ a sevgilerimi sunar teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasının bundan sonraki çalışmalara katkı sağlamasını temenni ederim.

Uğur HALAT

Trabzon 2024

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Sathi Kaplama Tasarımının Mekanistik-Ampirik Yöntemler İle Değerlendirilmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Şeref ORUÇ’un sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

06/08/2024

Uğur HALAT

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
ŞEKİLLER DİZİNİ	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XI
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XII
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Karayolu Altyapısı	1
1.2. Karayolu Üstyapısı	2
1.2.1. Rijit Üstyapılar	2
1.2.2. Esnek Üstyapılar	2
1.2.3. Esnek ve Rijit Üstyapıların Karşılaştırılması.....	4
1.3. Esnek Kaplama Dizaynı	5
1.4. Yüksek Standartlı Esnek Kaplamalar.....	5
1.4.1. Alt Temel Tabakası	7
1.4.2. Temel Tabakası	7
1.4.3. Granüler Temel Tabakası.....	8
1.4.4. Plentmiks Temel (PMT) Tabakası	8
1.4.5. Çimento Bağlayıcılı Temel (ÇBT) Tabakası	8
1.4.6. Kaplama Tabakaları	8
1.4.7. Bitümlü Sıcak Karışım (BSK)	8
1.4.8. Bitümlü Temel Tabakası.....	9
1.4.9. Binder Tabakası	10
1.4.10. Aşınma Tabakası.....	10
1.4.11. Ilık Asfalt Karışımlar	10
1.4.12. Soğuk Asfalt Karışımlar.....	11
1.5. Düşük Standartlı Esnek Kaplamalar.....	11
1.5.1. Makadam Temeller	12
1.5.2. Koruyucu Satıh Tabakaları	12

1.5.3. Sathi Kaplamalar	13
1.5.4. Tek Kat Sathi Kaplamalar	14
1.5.5. Çift Kat Sahti Kaplamalar	14
1.6. Türkiye Karayollarında Sathi Kaplamaların Kullanımı ve Önemi	15
1.7. Sathi Kaplamalarda Kullanılan Malzemeler	17
1.7.1. Agregalar	17
1.7.2. Agregalara Uygulanan Deneyler	19
1.7.3. Bitümlü Bağlayıcılar	21
1.7.4. Bitümlü Bağlayıcılara Uygulanan Deneyler	24
1.8. Sathi Kaplama Dizaynı	25
1.8.1. Abağın Kullanımı	27
1.9. Esnek Üstyapıların Yapısal Tasarımı	29
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR	31
3. BULGULAR VE TARTIŞMA	36
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	57
5. KAYNAKLAR	59
ÖZGEÇMİŞ	

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

SATHİ KAPLAMA TASARIMININ MEKANİSTİK-AMPİRİK YÖNTEMLER İLE DEĞERLENDİRİLMESİ

Uğur HALAT

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Şeref ORUÇ
İkinci Danışman: Doç. Dr. Murat BOSTANCIOĞLU
2024, 62 Sayfa

Sathi kaplamalar, trafik hacminin düşük olduğu yollarda sıklıkla kullanılan bir esnek üst yapı çeşididir. Ülkemizde sathi kaplamalı yolların yapısal tasarımında, taban zemini esneklik modülü (M_R) ve $T_{8.2}$ değerlerinin esas alındığı AASHTO yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntem yük, yükleme durumu, temas gerilmesi, tabaka malzemelerinin özellikleri ve çevresel koşullar gibi parametrelerin değişimine yeterince uyum sağlayamamaktadır. Bu çalışmada AASHTO tasarım grafiğinden farklı $T_{8.2}$ ve farklı M_R değerleri için okunan alt temel kalınlıklarına bağlı olarak üretilen 101 farklı kesitin mekanik analizi yapılmış ve ampirik transfer denklemleri ile tekerlek izinde oturmaya bağlı yol ömrü değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler AASHTO yöntemi ile hesaplanan yol ömrü değerleri ile kıyaslanmış ve AASHTO yöntemi ile uyumlu ampirik transfer denklemlerinin bulunması amaçlanmıştır. Çalışmada ayrıca 101 adet kesit için hesaplanan mekanik tepkiler ile $T_{8.2}$ değerleri bir dağıtım grafiğinde birleştirilerek oluşan eğri denkleminde ampirik transfer denklemi katsayıları elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Sathi kaplamalar, Mekanistik-Ampirik tasarım, AASHTO yöntemi, Transfer modelleri

Master Thesis

SUMMARY

EVALUATION OF CHIP SEAL DESIGN WITH MECHANISTIC EMPIRICAL METHODS

Uğur HALAT

Karadeniz Technical University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Şeref ORUÇ
Co-advisor: Doç. Dr. Murat BOSTANCIOĞLU
2024, 62 Pages

Chip seals are a type of flexible pavement frequently used on roads with low traffic volume. In our country, the AASHTO method, based on subgrade elastic modulus (M_R) and $T_{8.2}$ values, is used in the structural design of chip seals. This method cannot adequately adapt to changes in parameters such as load, loading type, contact pressure, properties of layer materials and environmental conditions. In this study, mechanical analysis of 101 different sections produced depending on the subbase thicknesses read for different $T_{8.2}$ and different M_R values from the AASHTO design chart was studied, and pavement life values due to rutting failure were calculated with empirical transfer equations. The calculated values were compared with the $T_{8.2}$ values of the AASHTO method and aimed to find empirical transfer equations compatible with the AASHTO method. In the study, empirical transfer equation coefficients were obtained from the resulting curve equation by combining the mechanical responses calculated for 101 cross-sections and $T_{8.2}$ values in a distribution graph.

Key Words: Chip seals, Mechanistic-Empirical design, AASHTO method, Transfer models

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1. Karayolu enkesiti.....	1
Şekil 2. Sathi kaplamalı bir yolun üstyapı tabakalarında oluşan gerilme dağılımları (Gürer, 2010).....	3
Şekil 3. Asfalt betonu kaplamalı bir yolun üstyapı tabakalarında oluşan gerilme dağılımları (Gürer, 2010)	4
Şekil 4. Yüksek standartlı esnek kaplama tabaka tipleri	6
Şekil 5. Yüksek standartlı esnek üst yapı en kesiti	7
Şekil 6. Tek kat uygulanan sathi kaplama kesiti (Aşma, 2022)	14
Şekil 7. Çift kat uygulanan sathi kaplama kesiti (Aşma, 2022)	15
Şekil 8. KGM yol ağı istatistikleri.....	16
Şekil 9. Köy yolları istatistikleri.....	17
Şekil 10. Agregaların biçim durumuna göre görünümü.....	18
Şekil 11. Agregaların yüzey durumuna görünümü.....	19
Şekil 12. Agregaların porozite yapısına göre görünümü.....	19
Şekil 13. Bitüm miktarı tayini abağı.....	27
Şekil 14. Sathi kaplamalı esnek üst yapılar için projelendirme abağı.....	28
Şekil 15. Üstyapı tasarım yöntemleri	29
Şekil 16. Üst yapı kesiti.....	33
Şekil 17. KENLAYER programı giriş arayüzü.....	34
Şekil 18. $T_{8.2}$ ve M_R değerlerine bağlı olarak elde edilen alt temel kalınlıkları gösterimi ($T_{8.2}=100.000-600.000$)	36
Şekil 19. $T_{8.2}$ ve M_R değerlerine bağlı olarak elde edilen alt temel kalınlıkları gösterimi ($T_{8.2}=800.000-3000.000$)	37
Şekil 20. Taban zemini üzerindeki ϵ_v değerleri.....	38
Şekil 21. ϵ_v değerlerine bağlı olarak hesaplanan N_r değerleri ($M_R =2000$ psi).....	39
Şekil 22. ϵ_v değerlerine bağlı olarak hesaplanan N_r değerleri ($M_R =3000$ psi).....	39
Şekil 23. ϵ_v değerlerine bağlı olarak hesaplanan N_r değerleri ($M_R =4000$ psi).....	39
Şekil 24. ϵ_v değerlerine bağlı olarak hesaplanan N_r değerleri ($M_R =5000$ psi).....	40
Şekil 25. ϵ_v değerlerine bağlı olarak hesaplanan N_r değerleri ($M_R =6000$ psi).....	40
Şekil 26. ϵ_v değerlerine bağlı olarak hesaplanan N_r değerleri ($M_R =7000$ psi).....	40
Şekil 27. ϵ_v değerlerine bağlı olarak hesaplanan N_r değerleri ($M_R 8000$ psi).....	41
Şekil 28. ϵ_v değerlerine bağlı olarak hesaplanan N_r değerleri ($M_R =9000$ psi).....	41

Şekil 29. ϵ_v değerlerine bağlı olarak hesaplanan N_r değerleri ($M_R = 10000$ psi).....	41
Şekil 30. ϵ_v değerlerine bağlı olarak hesaplanan N_r değerleri ($M_R = 12000$ psi).....	42
Şekil 31. ϵ_v değerlerine bağlı olarak hesaplanan N_r değerleri ($M_R = 14000$ psi).....	42
Şekil 32. ϵ_v değerlerine bağlı olarak hesaplanan N_r değerleri ($M_R = 16000$ psi).....	42
Şekil 33. ϵ_v değerlerine bağlı olarak hesaplanan N_r değerleri ($M_R = 18000$ psi).....	43
Şekil 34. ϵ_v değerlerine bağlı olarak hesaplanan N_r değerleri ($M_R = 20000$ psi).....	43
Şekil 35. Shell N_r /AASHTO $T_{8.2}$ oranları.....	44
Şekil 36. TRRL N_r /AASHTO $T_{8.2}$ oranları.....	45
Şekil 37. $\epsilon_v - T_{8.2}$ eğrileri ve denklem katsayıları ($M_R=2000$ psi)	46
Şekil 38. $\epsilon_v - T_{8.2}$ eğrileri ve denklem katsayıları($M_R=3000$ psi)	46
Şekil 39. $\epsilon_v - T_{8.2}$ eğrileri ve denklem katsayıları($M_R=4000$ psi)	47
Şekil 40. $\epsilon_v - T_{8.2}$ eğrileri ve denklem katsayıları($M_R=5000$ psi)	47
Şekil 41. $\epsilon_v - T_{8.2}$ eğrileri ve denklem katsayıları($M_R=6000$ psi)	48
Şekil 42. $\epsilon_v - T_{8.2}$ eğrileri ve denklem katsayıları($M_R=7000$ psi)	48
Şekil 43. $\epsilon_v - T_{8.2}$ eğrileri ve denklem katsayıları($M_R=8000$ psi)	49
Şekil 44. $\epsilon_v - T_{8.2}$ eğrileri ve denklem katsayıları($M_R=9000$ psi)	49
Şekil 45. $\epsilon_v - T_{8.2}$ eğrileri ve denklem katsayıları($M_R=10000$ psi)	50
Şekil 46. $\epsilon_v - T_{8.2}$ eğrileri ve denklem katsayıları($M_R=12000$ psi)	50
Şekil 47. $\epsilon_v - T_{8.2}$ eğrileri ve denklem katsayıları($M_R=14000$ psi)	51
Şekil 48. $\epsilon_v - T_{8.2}$ eğrileri ve denklem katsayıları($M_R=16000$ psi)	51
Şekil 49. $\epsilon_v - T_{8.2}$ eğrileri ve denklem katsayıları ($M_R = 18000$).....	52
Şekil 50. $\epsilon_v - T_{8.2}$ eğrileri ve denklem katsayıları ($M_R = 20000$ psi)	52
Şekil 51. Tüm ϵ_v - $T_{8.2}$ değer çiftleri için elde edilen dağıtım grafiği	54
Şekil 52. Başarı oranları	55
Şekil 53. ZC1 noktasındaki ϵ_r değerleri ile $T_{8.2}$ ilişkisi	56
Şekil 54. ZC2 noktasındaki ϵ_v değerleri ile $T_{8.2}$ ilişkisi	56

TABLolar DİZİNİ

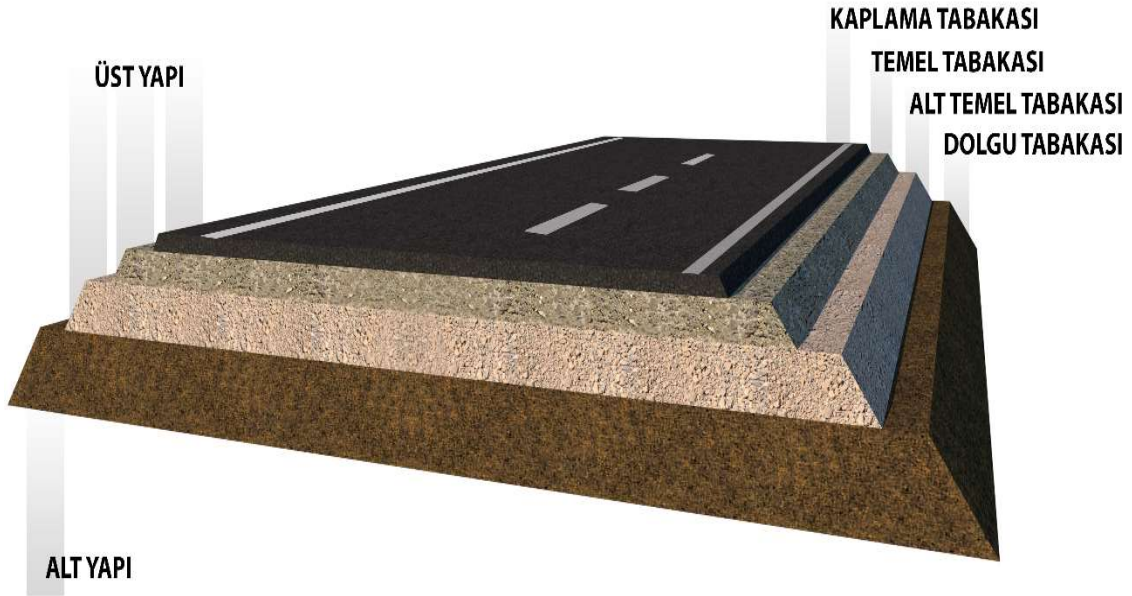
	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. KGM yol ağında bulunan yolların kaplama cinsleri (01.01.2024 itibariyle) (KGM, 2024).....	15
Tablo 2. KGM yol ağı dışında bulunan yolların kaplama cinsleri (01.01.2024 itibariyle) (Yönetimler, 2023).....	16
Tablo 3. Tiplerine göre sıvı petrol asfaltları	22
Tablo 4. Kullanım yerlerine göre sıvı petrol asfaltları	22
Tablo 5. Tiplerine göre asfalt emülsiyonları	23
Tablo 6. Kullanım yerlerine göre bitüm emülsiyonları	23
Tablo 7. Farklı kuruluşlar için bozulma modeli katsayıları (Behiry, 2012; Muniandy & Aburkaba, 2013).....	32
Tablo 8. Okuma noktaları	34
Tablo 9. Önerilen f_4 ve f_5 katsayıları	52

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

$T_{8.2}$	: Eşdeğer standart dingil yükü
f_4, f_5	: Sabitler
R^2	: Bağımsız test istatistiği
ε_r	: Yatay çekme birim şekil değiştirmeleri
ε_v	: Düşey basınç birim şekil değiştirmeleri
N_f	: Yorulmaya bağlı bozulma için gerekli yük tekrar sayısı
N_r	: Tekerlek izine bağlı bozulma için gerekli yük tekrar sayısı
$E_{yüzey}$	: Yüzey tabakası elastisite modülü
ν	: Poisson oranı
E_{temel}	: Temel tabakası elastisite modülü
$E_{alt\ temel}$	: Alttemel tabakası elastisite modülü
a_{temel}	: Temel tabakası izafi mukavemet katsayısı
$a_{alt\ temel}$	: Temel tabakası izafi mukavemet katsayısı
E_{taban}	: Taban zemini elastisite modülü
H	: Tabaka kalınlığı
CBR	: Kaliforniya taşıma oranı
EBO	: Agreganın en küçük boyutlar ortalaması
$\$EGT$	: Şerit başına düşen eşdeğer yıllık ortalama günlük trafik
Md	: Dizayn agrega miktarı
γ_g	: Agreganın gevşek birim hacim ağırlığı
OB	: Agreganın ortalama boyutu
Bt	: Temel bitüm miktarı
MR	: Zemin esneklik modülü

1. GENEL BİLGİLER

Karayolu yapıları, doğal zeminin uygun seviyeye getirilebilmesi ve motorlu araçların gerekli hız, güvenlik ve konforla hareketlerini sağlamak amacıyla, belirlenmiş geometrik standartlara göre projelendirilmiş güzergahlar üzerine inşa edilen tüm yapılar olarak tanımlanır. Karayolu yapısı işlevine, yapım sırasına ve özelliklerine göre **alt ve üstyapı** olmak üzere iki bölüme ayrılmaktadır (Şen, 2006).



Şekil 1. Karayolu enkesiti

1.1. Karayolu Altyapısı

Yapımı tamamlanan bir karayolunda, tesviye edilmiş yüzey ile doğal zemin arasında kalan bölge altyapı olarak adlandırılır. Yolun gövdesini tamamlamak için yan ariyetten ya da ariyet ocağından getirilen malzemeler dolgu kısmını, doğal zemin ise yarma kısmını oluşturmaktadır. Tesviye yüzeyi elde etmek amacıyla yarma kısımlarında yapılan kazı çalışmaları da yolun alt yapısına dahildir. İstinat duvarları, tüneller, viyadükler, köprüler ve menfez gibi sanat yapıları da yolun altyapısını oluşturmaktadır (Şen, 2006).

1.2. Karayolu Üstyapısı

Karayolu üstyapısı, trafik yükünü altyapı için kabul edilebilir bir düzeye indirmek, altyapıyı yüzeyini korumak ve düzgün bir yuvarlanma yüzeyi oluşturmak amacıyla altyapı üzerine yerleştirilen kaplama, temel ve alt temel katmanlarından oluşan yol yapısı olarak tanımlanmaktadır (Şen, 2006).

Üstyapı inşa edilmeden önce, üst yapıya istenilen desteği sağlayacak şekilde altyapı, şartnamelere göre hazırlanır. Üstyapının performansı doğrudan altyapının fiziksel özelliklerine bağlıdır.

Yol üstyapısı, trafik yüklerinin ve yağmur, donma-çözünme gibi doğal koşulların etkisi altındadır. Taşıtların hareketleri esnasında trafik yüklerine bağlı olarak basınç, radyal çekme gerilmeleri ile düşey basınç gerilmeleri oluşmaktadır. Gerilmelerin büyüklüğü dingil yüklerinin tekrar sayısı ile doğru orantılıdır. Yola gelecek tüm dingil yükleri dikkate alınarak yol üst yapısı projelendirilmektedir.

Yol üstyapıları, kaplama tabakasında kullanılacak olan malzemenin özelliklerine, türlerine ve yapım yöntemlerine göre **rijit ve esnek üstyapılar** olmak üzere iki kategoriye ayrılmaktadır (Tunç, 2004).

1.2.1. Rijit Üstyapılar

Trafik hacminin yüksek olduğu otoyollarda ve havalimanlarında araçlara gerekli sürüş konforunu ve güvenliğini sağlamak amacıyla yapılan üstyapı tipidir. Yüklerin büyük bölümü beton plaka tarafından taşınırken, kalan kısım altyapıya aktarılır (Tunç, 2007).

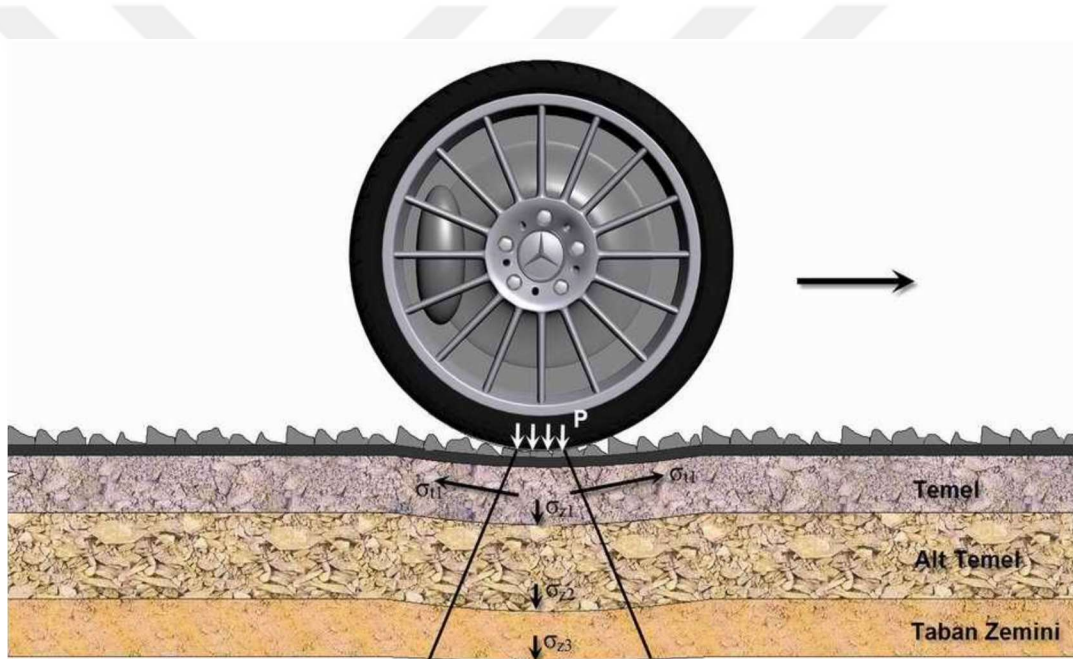
Rijit üst yapıların tasarımı, trafik ve çevresel etkilere yeterli mukavemet gösterecek beton plağın tasarımından ibarettir. Rijit üstyapılar, yükü daha geniş bir alana yaymak ve taban zemininin taşıyabileceği düzeye indirebilmek amacıyla yeterli mukavemete ve yüksek bir elastisiteye sahip olmalıdır (Hımat, 2022).

1.2.2. Esnek Üstyapılar

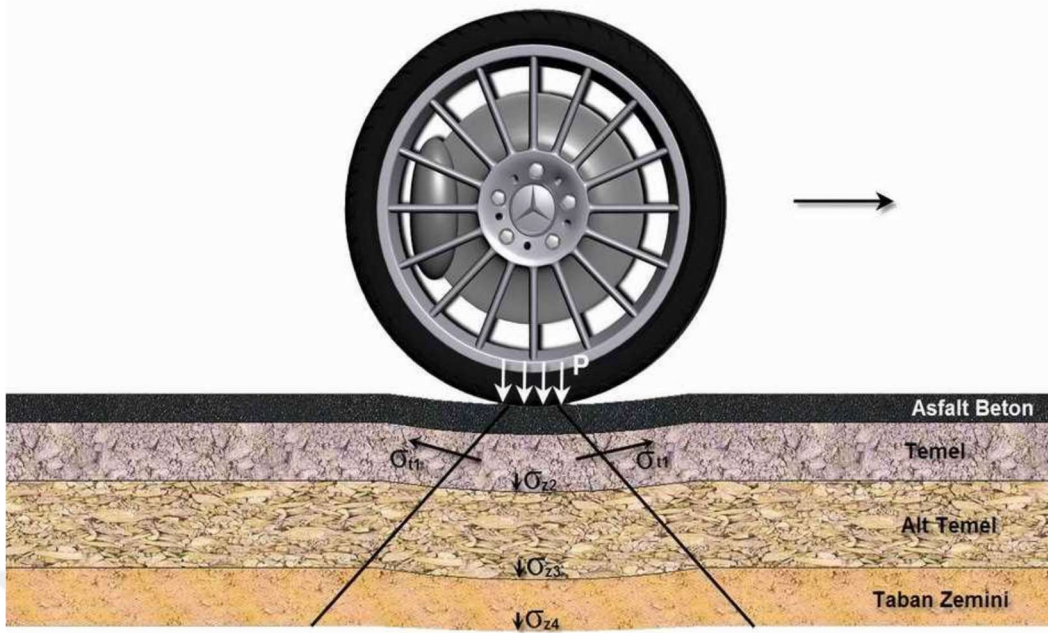
Esnek üstyapılar, trafik güvenliği için yeterli sürtünme, taşıt işletme giderlerinin azaltılması için asgari yuvarlanma direnimi gibi performans özelliklerine sahip ve taşıtların oluşturduğu gerilmelere karşı yeterli stabiliteyi sağlamak amacıyla yol alt yapısı üzerine

inşa edilen ve farklı özelliklere sahip farklı katmanlardan oluşan çok katmanlı yapılardır (Tunç, 2007).

Esnek üstyapılar, tesviye yüzeyi ile sağlam bir temas oluşturan ve trafik yüklerini kaplama, temel ve alt temel tabakalarıyla tabana dağıtan bir üstyapı şeklidir. Esnek üst yapıların performans ve stabilitesi, tane sürtünmesi, kohezyon ve adezyon gibi kullanılacak agrega ve bitümlü bağlayıcının özelliklerine bağlıdır. Esnek üstyapılar, genel olarak kalitelerine göre sathi kaplamalar ve bitümlü sıcak karışımlar olmak üzere iki ayrı türde imal edilirler. Sathi kaplamalı bir yolun üstyapı tabakalarında oluşturduğu gerilme dağılımları Şekil 2’de, asfalt betonu kaplamalı bir yolun üstyapı tabakalarında oluşturduğu gerilme dağılımları Şekil 3’de gösterilmiştir (Çetin, 2012).



Şekil 2. Sathi kaplamalı bir yolun üstyapı tabakalarında oluşan gerilme dağılımları (Gürer, 2010)



Şekil 3. Asfalt betonu kaplamalı bir yolun üstyapı tabakalarında oluşan gerilme dağılımları (Gürer, 2010)

1.2.3. Esnek ve Rijit Üstyapıların Karşılaştırılması

Esnek ve rijit üstyapılar karşılaştırıldığında her iki üst yapı tipinin birbirlerine göre üstünlükleri bulunmaktadır (Tunç, 2007).

Esnek kaplamaların üstünlükleri;

- Hızlı ve kolay bir şekilde inşa edilirler ve rijit kaplamalara kıyasla daha ekonomiktir.
- Bakım-onarım çalışmaları daha kolay ve hızlı bir şekilde yapılır.
- Bakım-onarım esnasında yolun tamamının trafik akışına engel olmadığı için servis yolu yapımına ihtiyaç yoktur.
- Serimi ve sıkıştırılması tamamlanan karışımın ortam sıcaklığına kadar soğumasının ardından yol trafiğe açılır.
- Aşamalı olarak yapılabildiklerinden dolayı yapılacak olan kaplamanın kalınlığı ve kalitesi, artan trafik miktarına göre istenildiği zaman artırılabilir.
- Rijit kaplamalara göre aralarda derz olmadığı için sürüş konforları daha iyidir.

Rijit kaplamaların üstünlükleri;

- Esnek kaplamalara göre mekanik özellikleri daha yüksek olduğundan daha az kalınlıkta yapılabilir ve daha uzun ömürlüdür.
- Bakım-onarım ihtiyaçları çok azdır.
- Esnek kaplamalarda kullanılan asfalt bağlayıcı petrolden üretildiğinden dışa bağımlı iken rijit kaplamalar yerli üretim olan çimentodan imal edilirler.
- Esnek kaplamalar hava ısısının düşük olduğu rüzgarlı ve rutubetli durumlarda inşa edilemezken, rijit kaplamalar 5 °C'nin üstündeki havalarda inşa edilebilirler.
- Açık renkli olmalarından ötürü karanlıkta görünmeleri daha iyidir.
- Esnek kaplamalara göre yağışlı havalardaki kayma dirençleri daha yüksektir.

1.3. Esnek Kaplama Dizaynı

Esnek kaplamalar;

- Düşük standartlı kaplamalar (koruyucu-yüzeysel tabakalar),
- Yüksek standartlı kaplamalar (bitümlü sıcak karışımlar),

olmak üzere iki farklı kalitede yapılırlar.

Ülkemizde kaplama seçimi, toplam eşdeğer standart dingil yükü (8.2 ton) sayısına ($T_{8,2}$) göre;

- $T_{8,2} < 40.000$, ise kaplamasız (stabilize),
- $40.000 < T_{8,2} < 100.000$, ise tek kat sathi kaplama veya kaplamasız,
- $100.000 < T_{8,2} < 500.000$, ise tek kat sathi kaplama,
- $500.000 < T_{8,2} < 2.000.000$, ise çift kat sathi kaplama,
- $T_{8,2} > 2.000.000$, ise beton asfalt (BSK) kaplama,

olarak yapılmaktadır (Tunç, 2007).

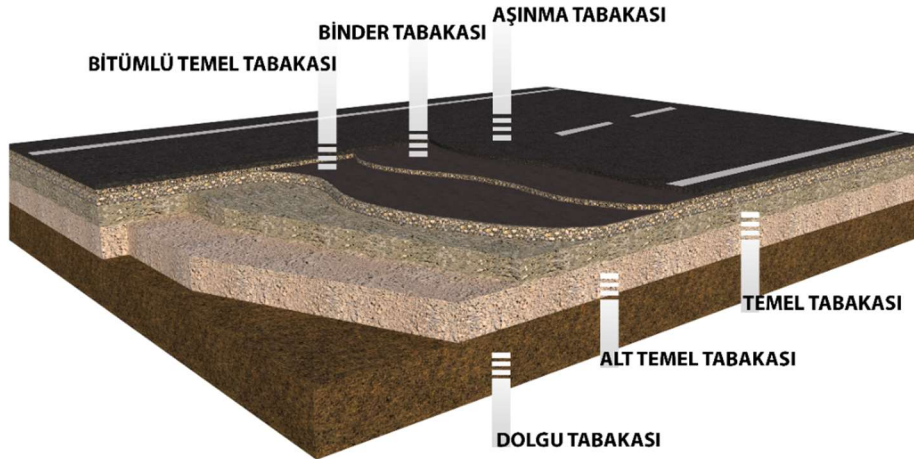
1.4. Yüksek Standartlı Esnek Kaplamalar

Yüksek standartlı esnek kaplamalar çok katmanlı yapılar olup, her tabakanın kalınlığı ve işlevi birbirinden farklıdır. Katmanlarda kullanılacak olan malzemeler ve tabaka kalınlıkları yolun sahip olduğu trafik hacmine, zeminlerin taşıma kapasitesine, çevresel

durumlara, kullanılan malzemenin mekanik özellikleri gibi özellikler dikkate alınarak belirlenir (Tunç, 2007).

Esnek üst yapı tabakaları aşağıdaki gibi sıralanabilir (Şekil 4 ve Şekil 5).

- Temel Tabakaları.
 - Alt temel tabakası
 - Temel tabakası
 - Granül temel tabakası
 - Plentmiks temel (PMT) tabakası
 - Çimento bağlayıcılı temel (ÇBT) tabakası
- Kaplama Tabakaları
 - Bitümlü sıcak karışımlar
 - Bitümlü temel tabakası
 - Binder tabakası
 - Aşınma tabakası
 - Bitümlü soğuk karışımlar
 - Bitümlü ılık karışımlar



Şekil 4. Yüksek standartlı esnek kaplama tabaka tipleri



Şekil 5. Yüksek standartlı esnek üst yapı en kesiti

1.4.1. Alt Temel Tabakası

Esnek kaplamaların en alt tabakası olan alt temel tabakası, düşük elastisiteye veya CBR (Kaliforniya Taşıma Oranı) değerine sahip, iyi dren olabilen granüler malzemelerden imal edilmektedir. Alt temel tabakasında kullanılacak olan agreganın maksimum dane boyutu, permeabilitesi, gradasyonu ve diğer fiziksel özellikleri temel tabakasına nazaran bir miktar farklı olsa da alt temel ile temel tabakasının görevleri bakımından fazla bir fark yoktur (Tunç, 2007).

1.4.2. Temel Tabakası

Alt temel tabakası üzerine, belirli fiziksel özelliklere sahip malzemenin belirli bir kalınlıkta serilip sıkıştırılması ile inşa edilen temel tabakasının en önemli fonksiyonları iyi bir drenaj sağlamak ve don etkisini azaltmaktır. Esas görevi ise, yüzeye gelen yükleri kendi içinde dağıtarak tabanda oluşacak olan kesme ve oturma deformasyonlarının önüne geçmektir (KGM, 2012).

1.4.3. Granüler Temel Tabakası

Granüler temel tabakası, belirli bir gradasyon ve belirli fiziksel özellikleri sağlayan agreganın optimum su içeriğinde yola serilmesi ve maksimum kuru yoğunluk elde edilecek şekilde sıkıştırılması ile oluşturulan bir temel tabakasıdır (Tunç, 2007).

1.4.4. Plentmiks Temel (PMT) Tabakası

Granüler temel tabakasına benzer şekilde, belirli fiziksel özelliklere sahip ve iyi derecelenmiş gradasyondaki agreganın plentde optimum su içeriğinde karıştırılması ve yola serilerek sıkıştırılması sonucu elde edilir (Tunç, 2007).

1.4.5. Çimento Bağlayıcılı Temel (ÇBT) Tabakası

PMT tabakasında olduğu gibi, belirli fiziksel özellikleri sağlayan ve iyi derecelenmiş bir gradasyona sahip agregaya, plentde belirlenen miktarda çimento eklenip optimum su içeriğinde karıştırılması ve yola serildikten sonra silindirler ile yeterince sıkıştırılması sonucu elde edilir (Tunç, 2007).

1.4.6. Kaplama Tabakaları

Ülkemizde yaygın olarak BSK kaplamalar kullanılmaktadır ve her geçen gün kullanımları artmaktadır. BSK'lar hem agreganın hem de asfalt bağlayıcının istenilen bir ısıya kadar ısıtılması ve plentde karıştırılması ile elde edilir. BSK kaplamalar yüksek standarta sahip esnek kaplamaların en üst tabakalarında kullanılır.

Bitümlü soğuk karışımlar ise ülkemizde çok yaygın olarak kullanılmamaktadır. Daha çok kışın acil onarım isteyen işlerde, asfalt plentinin bulunmadığı ya da ekonomik olmadığı durumlarda, az miktarda bitümlü karışım yapılması gereken yerlerde kullanılmaktadır. Bitümlü soğuk karışımlar pahalı olmalarının yanında düşük stabiliteye sahip olmaları sebebiyle çok tercih edilmemektedir (Tunç, 2004).

1.4.7. Bitümlü Sıcak Karışım (BSK)

Ağır ve orta trafiğe maruz yollarda, trafik yüklerini taşımak ve üstyapının diğer tabakalarını çevresel faktörlerin olumsuz etkilerinden korumak için kullanılır. Sıcak

agreganın önceden ısıtılmış asfalt çimentosu ile homojen bir şekilde karıştırılıp, agregaya yüzeylerinin kaplanması ile elde edilir. Sathi kaplamaya göre bitümlü karışımlar çok daha pahalıdır. Bitümlü karışımların fiziksel özelliklerinin belirlenmesi ve belirli koşullara uyması gerekir.

BSK tasarımlarında aşağıda verilen özellikler dikkate alınır.

- Stabilité, BSK kaplamaların taşıt trafiğine açıldıktan sonra, taşıtların dinamik ve statik yüklerinden dolayı bozulmalara karşı gösterdiği dirençtir. Agregataneleri arasında oluşan boşluk ve bitüm ile agregat arasındaki adezyon karışımının kayma mukavemetini etkilemektedir.
- Durabilite, BSK'nın çevresel faktörler (iklim vb.) ve trafik yüklerinin neden olduğu bozulmalara ve aşınmaya karşı göstermiş olduğu direnç olarak tanımlanır.
- Yorulma Mukavemeti, BSK'nın tekrar eden eğilme gerilmelerine karşı çatlaklar oluşmadan göstermiş olduğu dirençtir.
- İşlenebilirlik, BSK'nın yola serimi ve sıkıştırılması sırasında gösterdiği kolaylıktır.
- Geçirimsizlik, BSK'ların hava ve suyu geçirmesinin ölçüsüdür.
- Kayma direnci, Yolda güvenli ulaşımın sağlanabilmesi için sürücünün frenleme yapması sonucu, güvenli mesafede durabilmesi için tekerlek bandajının yol kaplaması ile arasındaki dirençtir.
- Esneklik, yolun uzun dönem kullanılması sonucunda taban zemini, alt temel ve temel tabakalarının oturmasına karşı BSK tabakalarının kırılmadan uyum sağlama yeteneğidir.

BSK kaplamalar genel olarak üst üste inşa edilen üç farklı tabakadan oluşmaktadır.

- Bitümlü temel tabakası
- Binder tabakası
- Aşınma tabakası (Sağlık & Güngör, 2008).

1.4.8. Bitümlü Temel Tabakası

Bitümlü temel tabakası taşıtlara uygun bir yuvarlanma yüzeyi oluşturmak, trafikten dolayı oluşacak olan aşındırma etkilerine karşı gelmek amacıyla imal edilir. Yüzeysel

suların yapıya sızmasını engellemek ve temel tabakasına gelen kayma gerilmelerini azaltmak diğer görevleridir (Gürer, 2010).

1.4.9. Binder Tabakası

Binder tabakası, aşınma ile bitümlü temel tabakası arasında yer almaktadır. Binder terim olarak temel tabakası ile aşınma tabakasını birleştirerek bağlayan tabakadır. Binder tabakası; yoğun gradasyonlu geleneksel tip asfalttan oluşur. Üzerinde oluşan trafik yüklerinin bitümlü temel tabakasına dağıtılarak iletilmesini sağlar. Binder tabakası aşınma tabakasından gelen yükü temel tabakasına aktararak çeşitli bozulmaların oluşmasını önlemektedir (Özügür, 2015).

1.4.10. Aşınma Tabakası

Aşınma tabakası, trafik yüklerinin ve iklim koşullarının deforme edici etkilerine doğrudan maruz kalan en üst tabakadır. Aşınma tabakası trafik yüklerine doğrudan maruz kaldığı için mukavemeti ve kayma direnci yüksek, gürültü seviyesinin ise düşük olması gerekmektedir. Ayrıca diğer tabakalara göre yüksek kalitedeki malzemelerle yapılması gerektiğinden maliyeti de fazladır (Özügür, 2015).

1.4.11. Ilık Asfalt Karışımlar

BSK'ların plentte üretilmesi, yola serilmesi ve silindirajı sırasında sağlanması gereken sıcaklık değerinin çeşitli teknolojiler veya viskozite azaltıcı katkıları yardımıyla düşürülmesine olanak sağlayan bir üretim tekniğidir. Esas amacı BSK ile aynı mukavemette, durabilitede ve performansa sahip karışımı daha düşük sıcaklık derecelerinde üretmektir.

Ilık asfalt karışım yöntemi ile sıcaklık düşürülmeden BSK üretimi için daha geniş bir sıcaklık aralığında serme ve sıkıştırma imkânı da sağlanmaktadır. Geleneksel BSK'da plent tesisinde üretim sıcaklıkları 140°C-180°C arasında olurken ılık asfalt karışım tekniği ile bu sıcaklıklar yaklaşık olarak 40°C kadar düşürülebilmektedir (KGM, 2021).

1.4.12. Soğuk Asfalt Karışımlar

Soğuk asfalt karışımlar (bitümlü soğuk karışım), oda sıcaklığında karıştırılan agrega ile bitüm veya bitüm emülsiyonunun karışımıdır. Aynı sıcaklıkta yayılır ve yoğunlaşır. Soğuk agrega, bitüm ile karıştırma süresince nemli olabilir, ancak sıvı asfalt sıcaklığı agreganın nemini kurutacak kadar olması gerekmektedir. Soğuk karışım asfalt uzun mesafelere taşınabilir ve daha sonra yayılabilir, depolanabilir, daha sonra kullanılabilir. 95°C veya daha yüksek bir sıcaklıkta bitümle karıştırılır ve aynı sıcaklık aralığında yayılır ve sıkıştırılır. Türkiye’de bitümlü soğuk karışımların kullanımı çok yaygın değildir, fakat kış mevsiminde acil tadilat yapılması gereken yerlerde, ekonomik olmayan veya asfalt plentinin olmadığı durumlarda soğuk asfalt karışımı az miktarda küçük alanlarda kullanılır (KGM, 2021).

1.5. Düşük Standartlı Esnek Kaplamalar

Düşük trafik hacmine sahip yollarda ($T_{8.2} < 2$ milyon), trafik yüklerinin tekerrür sayısının düşük olması sebebiyle daha az kaliteli malzemeler ile daha ince ve ileri teknoloji gerektirmeyen, düşük standartlı kaplamaların yapımı daha ekonomiktir.

Düşük standartlı esnek kaplamalar, trafik hacmi düşük olan (8,2 ton standart dingil yüküne sahip 20 yıldaki tekerrür sayısının 2 milyondan az veya günlük ağır taşıt trafiğinin 500’den az olan) yollarda ekonomik olup istenilen performansı karşılayabilmektedirler (Tunç, 2007).

Düşük standartlı esnek kaplama tipleri aşağıdaki gibidir.

- Makadam Temeller
- Koruyucu Satıh Tabakaları
- Sathi Kaplamalar
 - Tek tabaka sathi kaplamalar
 - Çift tabaka sathi kaplamalar

1.5.1. Makadam Temeller

Makadam temeller, düşük trafik hacmine sahip yollarda, stabilize kaplamaların iyileştirilmesi ile elde edilen düşük standartlı esnek bir kaplama çeşididir. Bir alt temel tabası üzerine veya doğrudan taban zemini üzerine de yapılabilirler.

Makadam temeller üç farklı şekilde yapılmaktadır (Tunç, 2007).

- Penetrasyon makadam temeller (bitüm emdirme).
 - Bitümlü makadam temeller (harç tipi).
 - Suyla kaynatılmış makadam temeller (bağlayıcısız stabilizasyon).
- i. Penetrasyon makadam temeller; sathi kaplama yapımındaki agrega ve asfalt uygulama sırasının tersidir. Hazırlanan granül temelden sonra sıkıştırılan agrega üzerine asfalt çimentosu uygulanır. Penetrasyon makadam temel tabakasında AC 70/100 ve AC 120/150 penetrasyon sınıfında bitüm kullanılır.
 - ii. Bitümlü makadam temeller; düşük trafik hacmine sahip yollarda koruyucu satıh tabakası veya sathi kaplama altına, bir alt temel tabakası üzerine kırılmış çakıldan veya kırmataş malzemeden hazırlanan kaba gradasyona sahip agregaya bitümlü bağlayıcı eklenerek elde edilen karışımlar ile oluşturulur. Bundan dolayı uygun kalınlık ve özellikteki alt temel tabakası üzerine uygulanan düşük kaliteli bitümlü temel tabakasıdır. Karışımda AC 60/70 ve AC 85/100 penetrasyonuna sahip asfalt çimentosu kullanılmaktadır.
 - iii. Suyla kaynatılmış makadam temeller; çok düşük trafiğe sahip yollarda kullanılan ancak ülkemizde yaygın olarak kullanılmayan, koruyucu bir örtme tabakası altında kullanılan düşük standartlı esnek kaplama tipidir. Stabilize kaplamanın uygun bir şekilde iyileştirilmesi sonucu imal edildiklerinden dolayı stabilize kaplamalara göre daha üstündür.

1.5.2. Koruyucu Satıh Tabakaları

Mevcut BSK kaplamanın ömrünü uzatmak, okside olmuş ve agrega üzerindeki bitüm filminin trafik etkisiyle soyulduğu kaplama yüzeylerini yenilemek, kaplama rengini değiştirerek araçlar için daha iyi görüş şartları sağlamak, kaplamayı hava ve nemin bozucu etkilerinden korumak ve yolun sürtünme direncini arttırmak amaçlarıyla genelde polimer

katkılı bitüm ile inşa edilen koruyucu bakım–onarım amaçlı sathi kaplama tabakasıdır (Tunç, 2007).

1.5.3. Sathi Kaplamalar

Trafik hacminin düşük olduğu yollarda sathi kaplamalar çok yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tip kaplamalarda ilk olarak bir temel tabakası üzerine ince bir film katmanı şeklinde sıvı asfalt uygulanır. Ardından uygun şekil ve boyuttaki agreganın serilip silindirler yardımıyla sıkıştırılmasıyla elde edilir. Ekonomik olmasının yanında uygulama tekniğinin basit olması sathi kaplamaların en büyük avantajlarıdır.

Sathi kaplamalar trafiğin yoğunluğuna göre bir temel tabakası üzerine tek veya çift kat olarak yapılabilir. Bitümlü yüzey tabakasını su ve hava etkilerinden korumak için yüzeysel geçirgenliği azaltmak, kayma direnci yüksek yüzeyler elde etmek ve kaplamanın ömrünü artırmak için eski beton asfalt kaplama üzerlerine de uygulanabilmektedir.

Sathi kaplamaların fonksiyonları (Tunç, 2007);

- Kaymaya karşı dirençli yüzeyler elde etmek.
- Trafik etkilerinden dolayı temel tabakasının bozulmalarının önüne geçmek.
- Düzgün yüzeyler elde ederek sürüş konforunu artırmak.
- Yüzeysel geçirimsizliği sağlayarak temel tabakasının stabilitesini artırmak olarak sayılabilir.

Sathi kaplamanın kullanım ömrüne ve performansına etki eden başlıca etkenler aşağıdaki gibi sıralanabilir (Tunç, 2007).

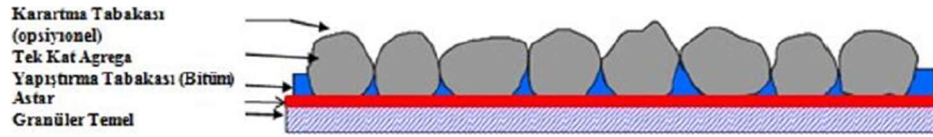
- Mevcut yol yüzeyi
- Bağlayıcı cinsi
- Çevresel faktörler
- Agreganın tipi ve boyutları
- Taşıt trafiği

Sathi kaplamaların olumsuzlukları ise;

- Pürüzlü bir yapıya sahip olduğu için sürüş konforu düşük ve tekerlek ile yol arasındaki sürtünmeden dolayı gürültü fazladır.
- Agregaların kopması ve tekerleklerden sıçraması sonucu diğer araçlara zarar verme ihtimali yüksektir.
- Taşıma gücü yok denecek kadar az olması sebebi ile taşıt trafiğinde ağır taşıt oranının fazla olduğu ve ağır dingil yüküne sahip yollarda kullanımı uygun değildir.
- Sık bakım ve onarıma ihtiyaç duyar ve kısa ömürlüdür (Erdoğan, 2023).

1.5.4. Tek Kat Sathi Kaplamalar

“Karayolları Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi” ne göre, proje süresi boyunca $T_{8,2}$ 'nin 500.000'den az olduğu yollarda yüzey kaplaması olarak tek kat sathi kaplama uygulanır. Yapımı tamamlanmış ve astarlanmış granüler temel tabakası veya mevcut eski sathi kaplama üzerine bitümlü bağlayıcının yüzeye uygulanmasının hemen ardından üniform gradasyonlu agregata tabakasının serilip silindirler yardımı ile sıkıştırılması şeklinde yapılır. Şekil 6'da tek kat uygulanan sathi kaplama kesiti gösterilmiştir (Çetin, 2012).

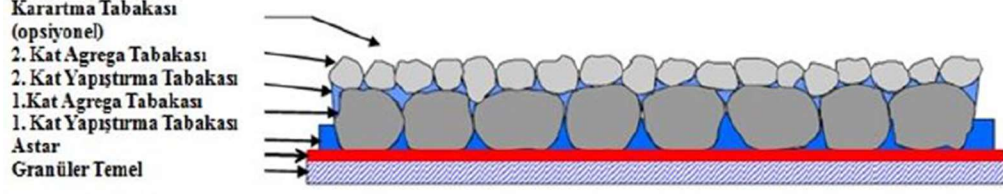


Şekil 6. Tek kat uygulanan sathi kaplama kesiti (Aşma, 2022)

1.5.5. Çift Kat Sathi Kaplamalar

“Karayolları Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi” ne göre proje süresi boyunca $T_{8,2}$ 'nin 500.000-3.000.000 arasında olduğu yollarda yüzey kaplaması olarak çift kat sathi kaplama uygulanır. Yapımı tamamlanmış ve astarlanmış granüler temel tabakası veya mevcut eski sathi kaplama üzerine önce bitümlü bağlayıcı tabakası sonra üzerine üniform gradasyonlu agregata tabakasının serilip silindirler yardımı ile sıkıştırılmasının ardından sathi kaplamanın tekrar aynı şekilde uygulanması ile iki kat olarak yapılır. Çift kat sathi kaplamalarda birinci tabakada kullanılan agreganın nominal boyutu ikinci tabakada

kullanılan agreganın en büyük boyutunun yarısından daha büyük olmamalıdır Şekil 7’de çift kat uygulanan sathi kaplama kesiti gösterilmiştir (Çetin, 2012).



Şekil 7. Çift kat uygulanan sathi kaplama kesiti (Aşma, 2022)

1.6. Türkiye Karayollarında Sathi Kaplamaların Kullanımı ve Önemi

Esnek üstyapılar, ülkemizde ve dünyada yol yapımında daha yaygın olarak kullanılmaktadır.

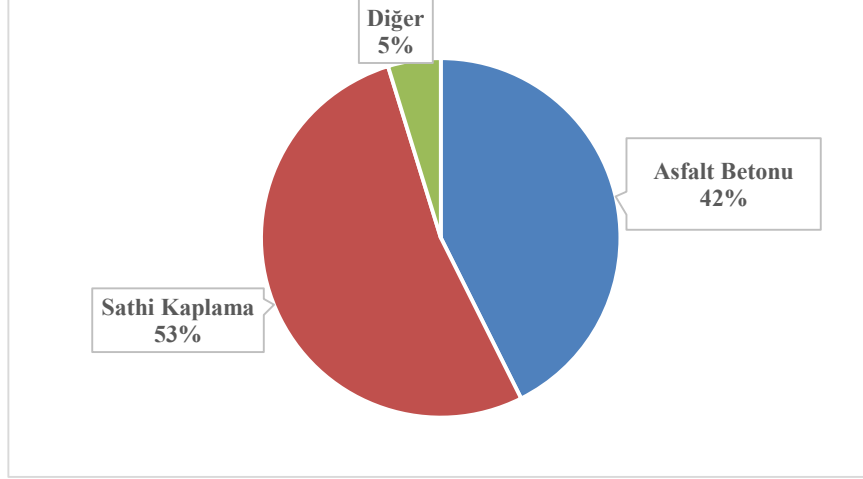
1 Ocak 2024 tarihi itibari ile KGM’nin sorumluluğu bünyesinde bulunan karayolu uzunluğu, toplam 68.654 km. olup, 3 sınıfa ayrılmaktadır (KGM, 2024).

- İl yolu
- Otoyol
- Devlet yolu

Tablo 1. KGM yol ağında bulunan yolların kaplama cinsleri (01.01.2024 itibariyle) (KGM, 2024)

	Asfalt Betonu	Sathi Kaplama	Parke	Stabilize	Toprak	Diğer Yollar	TOPLAM
Otoyol	3.726	-	-	-	-	-	3.726
Devlet Yolu	20.135	10.387	45	22	-	275	30.864
İl Yolu	6.018	25.182	225	276	299	2.064	34.064
TOPLAM	28.789	35.569	270	298	299	2.339	68.654

Tablo 1’deki veriler incelendiğinde esnek üst yapıların otoyollarda %100, devlet yollarında %98.8, il yollarında ise %91.3 oranında uygulama alanı bulunduğu görülmektedir.



Şekil 8. KGM yol ağı istatistikleri

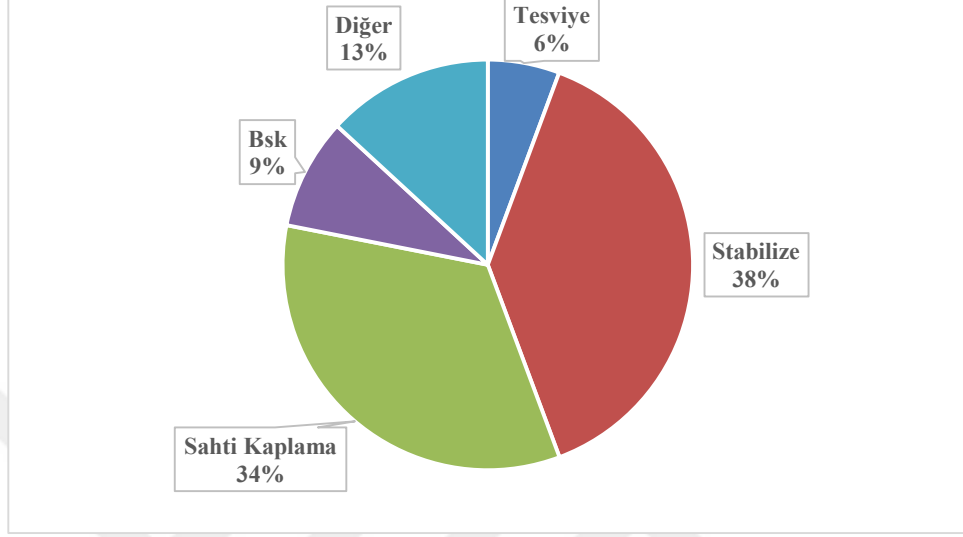
KGM'nin yol ağına olmayan, diğer kuruluşların sorumluluğunda bulunan;

- Orman yolları,
- Köy yolları
- Turistik yollar
- Şehir içi yollardır (KGM, 2024)

Tablo 2. KGM yol ağı dışında bulunan yolların kaplama cinsleri (01.01.2024 itibariyle)
(Yönetimler, 2023)

	Ham Yol	Tesviye	Stabilize	Asfalt		Parke	Beton		Toplam
				Sathi	BSK		Klasik	SSB	
1. Derece	1.354	5.060	42.321	50.414	14.747	1.393	5.710	1.175	122.173
2. Derece	1.723	5.205	19.681	8.317	577	244	180	35	35.961
Köy İçi	1.765	379	12.638	6.511	1.260	11.090	627	100	34.368
Toplam	4.842	10.933	74.640	65.242	16.8	12.727	6.517	1.30	192.502

Tablo 2'deki veriler incelendiğinde Karayolları Genel Müdürlüğü sorumluluğunda olmayan toplam yol ağının %47.9'unun kaplamasız olduğu, kaplamalı yolların ise %81.1'inin esnek kaplama olarak imal edildiği görülmektedir.



Şekil 9. Köy yolları istatistikleri

2023 yılı sonu itibarıyla 192 bin 502 km yol ağının %38.77'si stabilize, %42.51'i asfalt (%33.89'u sathi kaplama, %8.62'si bitümlü sıcak karışım), %5.53'ü tesviye, %6.61'i parke, %4.07'si beton ve %2.51'i ham yoldur. Tablo 1 ve Tablo 2 birlikte değerlendirildiğinde 164.928 km kaplamalı yolun 101.642 km'sinin (%61.6) sathi kaplama olarak imal edildiği görülmektedir.

1.7. Sathi Kaplamalarda Kullanılan Malzemeler

Sathi kaplama yapımında kullanılan malzemeler agregalar ve bitümlü bağlayıcılar olmak üzere ikiye ayrılabilir.

1.7.1. Agregalar

Yol kaplamasının stabilitesini sağlayan agregalar, kullanım miktarı olarak da sathi kaplama inşaatında önemli bir yere sahiptir. Alt temel ve temel tabakalarının tamamı, BSK'ların ağırlıkça %90-95'i, rijit kaplamaların ise ağırlıkça %70-80'i agregadan oluşur

Agregalar çeşitli özelliklere göre sınıflandırılır.

Mineralojik sınıflandırma: Genel olarak agregalar yapay taş, kırmataş ve dere malzemesi olarak elde edilir. Sahip olduğu olumsuz özelliklerden dolayı dere malzemesi (kum-çakıl) agregalar alt temel tabakasında kullanılırken diğer tabakalarda kullanılmazlar. Yol kaplamaları için kullanılacak en uygun agrega sınıfı kayaların kırılması sonucu elde edilen kırmataş agregalarıdır.

Gradasyon sınıflandırması: Karışımın stabilite ve işlenebilirlik özelliğinin belirlenmesinde agrega gradasyonu kullanılır. Karışım içerisindeki en büyük boyut 25,4 mm (1")'den fazla ise işlenebilirlik azalırken, karışımın yoğunluk ve stabilitesi artmaktadır.

Yüzey alanı ve boşluk sınıflandırması: Agregada danelerinin toplam yüzey alanı ve arasındaki boşlukların toplamı, karışımların (bağlayıcı-bağlayıcısız) tüm özelliklerini doğrudan etkileyen başlıca unsurlardır. Maksimum dane çapı, gradasyon, dane biçimi gibi faktörler toplam yüzey alanı ve toplam boşluk hacmini etkilemektedir.

Boyut sınıflandırması: Agregalar elek numaralarına göre üç boyutla sınıflandırılır;

- 4,76 mm (No.4) eleğin üzerinde kalan kısım kaba agrega.
- 4,76 mm elekten geçen ve 0,075 mm (No.200) elek üzerinde kalan kısım ince agrega.
- 0,075 mm elekten geçen kısım filler agrega.

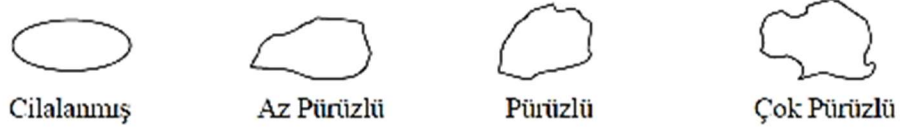
Biçim sınıflandırması: Yol kaplamalarında kullanılan agrega danelerinin biçimleri, işlenebilirlik, sıkışma direnci, stabilite, yoğunluk, içsel sürtünme açısı, CBR ve kayma mukavemeti özelliklerini etkiler. Biçim olarak agregalar Şekil 10'da gösterildiği gibi yuvarlak ve köşeli olarak sınıflandırılır.



Şekil 10. Agregaların biçim durumuna göre görünümü

Yüzey yapısı sınıflandırması: Agregaların yüzey yapısı, danelerin pürüzlülük veya cilalılık durumunu ifade eder. Agregada danelerinin yüzey pürüzlülüğü kayma mukavemeti, içsel sürtünme açısı, asfalt ile adezyon kuvveti ve stabilite ile doğru orantılıdır.

işlenebilirlik ile ters orantılıdır. Pürüzlülük arttıkça agreganın boşluk hacmi, sıkışmaya karşı direnci ve degradasyon gibi olumsuz özellikleri de artmaktadır. Agregadan beklenen özellikler yönünden agrega yüzey yapısı önemli ölçüde etki etmektedir. Agregalar yüzey yapısı olarak Şekil 11’de gösterildiği gibi pürüzlü, düzgün ve cilalı olarak sınıflandırılır.



Şekil 11. Agregaların yüzey durumuna görünümü

Özgül ağırlık sınıflandırması: Karışım hesaplarında kullanılan parametrelerden biri olan özgül ağırlıkların önceden tespit edilmesi gerekir.

Porozite sınıflandırması: Agregada danelerinin belirli bir porozite (su emme yeteneğine sahip boşlukların miktarı) seviyesine sahip olması gerekmektedir. İstenilen poroziteye sahip agrega daneleri bitümün emilmesini kolaylaştıracağından dolayı agrega ile bağlayıcı arasında güçlü bir yapışma oluşacak ve stabilite artacaktır. Ayrıca suyun etkisi ile bağlayıcı tabakasının soyulması azalacaktır. Ancak yüksek derecede poroziteye sahip agregaların yoğunluklarının az olmasından dolayı karışım stabilitesi düşmektedir. Ayrıca istenilenden fazla bitüm kullanımı sıcak havalarda kuma ve terleme sorunlarını oluşturmaktadır. Porozite yapısal olarak Şekil 12’de gösterildiği gibi sınıflandırılır.



Şekil 12. Agregaların porozite yapısına göre görünümü

1.7.2. Agregalara Uygulanan Deneyler

Yol kaplamalarının performansına önemli ölçüde etki eden agregaların fiziksel özelliklerinin iyi bilinmesi gerekir. Bu sebeple agregalara çeşitli deneyler uygulanarak fiziksel ve mekanik özellikleri tayin edilir.

Elek analizi deneyi: Agregada karışımının boyutsal olarak oranlandırılması ve gradasyonun şartnameye uygun olup olmadığının analizi elek analizi deneyi ile yapılmaktadır.

Soyulma mukavemeti deneyi: Soyulma mukavemeti deneyinin amacı agrega ile bitüm arasındaki adezyonun azalmasına sebep olan su ve sıcaklık etkisinin belirlenmesidir. Kullanılan agreganın bazalt, kalker gibi farklı cinslerde olması, bitümlü bağlayıcının sınıfı soyulma miktarını etkiler. Soyulma mukavemetini artırmak için deneysel yöntemler ile tespit edilen oranlarda katkı maddeleri asfalt çimentosuna katılır.

Hava tesirlerine karşı dayanım deneyi (donma deneyi): Uzun bir süre boyunca çevresel faktörler etkisi altında kalan agregaların donma-çözülme mukavemetlerinin ölçülmesi amacıyla $MgSO_4$ ve Na_2SO_4 çözeltileri kullanılarak yapılan bir deneydir. Deneyde kullanılan yöntem ile çevresel faktörlerden dolayı oluşacak yaklaşık 500 donma-çözülme döngüsü simüle edilmektedir.

Yassılık indeksi deneyi: Şekil olarak agrega danelerinin ince, uzun ve yassı olmaması veya belirlenen bir sınır değerinde olması gerekir. Bu deneyde agrega kalınlığının nominal boyuta oranı 0,6 daha küçük ise, agrega daneleri yassı olarak tanımlanır.

Agrega içindeki kil topakları ve ufalanabilir danelerin tespiti deneyi: İnce agreganın istenilen düzeyde nonplastik özelliğe sahip olabilmesi için agreganın plastiklik değerini artıran maddelerden kolay ufalanabilir daneler ve kil topakları miktarının tayini bu deney ile yapılır.

Los angeles aşınma deneyi: Agregada danelerinde darbe ve aşındırma etkisiyle oluşan aşınma seviyesinin bulunmasını sağlayan deneydir. .

Özgül ağırlık deneyi: Agregada fiziksel özelliklerinin tayin edilmesi ve karışım hesabının yapılabilmesi için bu deney yapılmaktadır.

Cilalanma deneyi: Laboratuvar ortamında gerçek yol yüzeyine benzer koşullar oluşturularak, trafik yükü altındaki agreganın sürtünme ile aşındırılması sonucu meydana gelen cilalanma değeri tayin edilir.

Kırılmışlık yüzdesi deneyi: Dere malzemesi agreganın kırılması sonucu, agregaların tam olarak kırılmış olarak kabul edilebilmesi için agreganın en az iki yüzünün kırılması gerekir. Bu deney, dere malzemesinden kırılma sonucu elde edilen agregaların ağırlıkça kırılmışlık yüzdesinin belirlenmesi amacıyla yapılır.

Yapışma deneyi: Bu deneyin amacı agrega ile bitümlü bağlayıcı arasındaki yapışmanın su etkisi altında ne kadar azaldığının bulunmasıdır. Sathi kaplama uygulamasında kullanılacak olan agrega tanelerine uygulanır.

Su absorpsiyon deneyi: Bitümlü karışım hesabında kullanılan bu deney ayrıca agrega porozluğunun belirlenmesinde de kullanılmaktadır.

1.7.3. Bitümlü Bağlayıcılar

Bitüm, doğal ya da ısı etkisiyle ergime sonucu oluşan hidrokarbonların bir karışımı veya bunların bir birleşimidir. Bu karışım katı, yarı katı, sıvı ve gaz halinde olabilir. Yapıştırıcı özelliğe sahip olmasının yanında, metal dışı türevleri ile bir arada bulunan ve CS₂ içerisinde tamamen çözünen maddedir (KGM, 2021).

Bitümlü bağlayıcılar;

- Katranlar
- Asfaltlar

olmak üzere ikiye ayrılırlar.

Katranlar, doğal halde bulunabilen veya kömürün damıtılması sonucunda elde edilen, sıvıdan yarı katıya kadar kıvamlılıkları değişebilen bitümlü malzemelerdir.

Asfaltlar ise rengi siyah-koyu kahverengi arasında değişen ve katı ya da yarı katı halde bulunan, çözücü eklenerek veya ısıtılması ile sıvı hale geçebilen malzemedir. Bu malzeme kaya ve göl asfaltları şeklinde doğal halde bulunabildiği gibi petrolün damıtılması sonucu da elde edilebilir. Sathi kaplamalar ve BSK uygulamalarında kullanılan bitümler petrol esaslı bitümlerdir

Ülkemizde bitümlerin sınıflandırılmasında genellikle penetrasyon derecesine göre sınıflandırma kullanılmaktadır. Amerika'da viskoziteye göre veya Superpave sisteminde performans derecesine göre sınıflandırma yöntemleri de bulunmaktadır.

Yol inşaatında bitümler aşağıdaki şekillerde kullanılır,

- Sıvı petrol asfaltları,
- Penetrasyon sınıfı bitümler,
- Bitüm emülsiyonları

Sıvı petrol asfaltları, Bitümün sıvılaştırılması amacıyla içerisine petrol türevi benzin, gazyağı veya bakiye yağ eklenmesi sonucu elde edilmektedir.

- Bakiye yağ eklenmesi sonucu yavaş kür olan (SC) sıvı petrol asfaltları,
- Gazyağı eklenmesi sonucu orta hızda kür olan (MC) sıvı petrol asfaltları,
- Benzin eklenmesi sonucu çabuk kür olan (RC) sıvı petrol asfaltları üretilir.

Kullanılan bitümün oranına ve sınıfına, eklenen çözücü miktarına göre farklı sınıflarda sıvı petrol asfaltı tipleri elde edilir. Sıvı petrol asfaltlarının tipleri Tablo 3’de kullanım yerleri Tablo 4’de verilmiştir.

Tablo 3. Tiplerine göre sıvı petrol asfaltları

Yavaş Kür Olanlar	SC-70	SC-250	SC-800	SC-3000	
Orta Hızda Kür Olanlar	MC-30	MC-70	MC-250	MC-800	MC-3000
Hızlı Kür Olanlar	RC-70	RC-250	RC-800	RC-3000	

Tablo 4. Kullanım yerlerine göre sıvı petrol asfaltları

Sathi Kaplamada	RC-800	RC-3000		
Yapıştırma tabakasında	RC-70	RC-250		
Soğuk Karışım	MC-300	MC-800	RC-800	RC-800
Astar tabakasında	MC-30	MC-70		

Bitüm emülsiyonları; emülsiyon tanım olarak, normal şartlarda birbirine karışmayan ve birbiri içinde çözünmeyen iki farklı sıvının, bazı kimyasal katkı maddeleri (emülgatör) kullanılarak tek faz halinde, homojen olarak karıştırılmasıdır.

Bitüm küreciklerinin su içinde dağıtılması ile bitüm emülsiyonları oluşur. Ancak, bu şekilde oluşturulan emülsiyonun ömrü uzun olmaz, kısa bir süre içerisinde asfalt kürecikleri birbirine yapışarak sudan ayrılır. Bunu önlemek için, emülgatör (emülsiyon verici madde) katılarak, asfalt kürecikleri etrafında emülgatör filmi oluşturulur ve kendi aralarında birleşmeleri önlenir.

Emülgatör cinsine bağlı olarak yol üst yapılarında kullanılan asfalt emülsiyonları ikiye ayrılır.

- Katyonik Bitüm Emülsiyonları
- Anyonik Bitüm Emülsiyonları

Agrega ile bitüm emülsiyonu karıştırıldığında veya yolun yüzeyine uygulandığında asfalt kürecikleri sıvı ortamdan ayrılarak agregaların üzerine yapışır ve serbest kalan su buharlaşır bu olaya kesilme adı verilir.

Viskozitelerine ve kesilme hızlarına göre yol üst yapılarında kullanılan asfalt emülsiyonlarının türleri ve kullanım yerleri sırasıyla Tablo 5 ve Tablo 6 verilmiştir.

Tablo 5. Tiplerine göre asfalt emülsiyonları

Bitüm Emülsiyonu	Yavaş Hızda Kesilen	Orta Hızda Kesilen	Çabuk Hızda Kesilen
Katyonik	CRS-1	CMS-2	CSS-1
	CRS-2	CMS-2h	CSS-1h
Anyonik	RS-1	MS-2	RS-1
	RS-2	MS-2h	SS-1h
		RS-1	

Tablo 6. Kullanım yerlerine göre bitüm emülsiyonları

Sathi Kaplamada	CRS-1, CRS-2, RS-1
Yapıştırma tabakasında	CRS-1, CRS-2, RS-1, RS-2
Soğuk Karışım	SS-1, MS-2
Astar tabakasında	SS-1h, SS-1, CSS-1, CSS-2

1.7.4. Bitümlü Bağlayıcılara Uygulanan Deneyler

Bitümlü bağlayıcıların karakterizasyonunda kullanılan başlıca deneyler aşağıda kısaca özetlenmiştir (KGM, 2012).

Penetrasyon Deneyi: Bitümlü bağlayıcının kıvamını veya sertliğini tespit etmek amacıyla yapılan bir deneydir. Asfalt çimentosunun kıvamını ölçmek amacıyla, standart bir iğne 100 gramlık bir yük altında 5 saniye boyunca dikey olarak bitüm numunesine batırılır ve bu batma mesafesi 0,1 milimetre cinsinden ölçülür. Penetrasyon değeri, bitümün kıvamı ile ters orantılıdır; bu değer arttıkça bitüm daha yumuşak hale gelir.

Trikloretilende çözünürlük: İçerisinde mineral madde olmayan ya da çok az olan bitümlü bağlayıcının benzen, karbon sülfür ve trikloretilen gibi organik çözücüler ile çözünürlüğünün tespit edilmesi için yapılır. Bitümlerin trikloretilen içerisinde %99 oranında çözülmesi gerekir.

Yumuşama noktası: Bitümlü bağlayıcının akmaya başladığı sıcaklık, yüzük-bilya yöntemiyle belirlenen yumuşama noktası sıcaklığı olarak tanımlanır. Penetrasyon değeri ile birlikte bitümün sıcaklık hassasiyetinin belirlenmesinde kullanılan bir değerdir. Yüksek yumuşama noktasına sahip bitümlerin viskoziteleri genellikle yüksektir, bu da BSK yapımı için gereken sıcaklıkların artmasına neden olur.

Parlama noktası: Bir maddenin yüksek sıcaklıkta ısıtılması sonucu oluşan buharın alev temasında geçici olarak parladığı ancak yanmadığı en düşük sıcaklık olarak tanımlanır. Bu değer, bitümlü bağlayıcının ısıtılması sırasında meydana gelebilecek herhangi bir tutuşma ve alev alma riskinin önlemesi açısından önemlidir.

Parlama noktası, Cleveland Açık Kabı (asfalt çimentoları ve SC sıvı petrol asfaltları için) veya **Tagliabue Kapalı Kabı** (15-74 °C aralığı için) ile (MC ve RC sıvı petrol asfaltları için) tespit edilir.

İnce film halinde ısıtma: Karışımın plentte hazırlanmasında ve yolda serme-sıkıştırma işlerinin yapılması sırasında bitümlü bağlayıcıda oluşan yaşlanmanın simüle edildiği deneydir. Bu deneyin amaçlarından birisi bitümde ısıya bağlı kütle kaybının tespit edilmesi iken diğeri fiziksel deneyler için yaşlandırılmış bitüm numunesi elde etmektir.

Fraass kırılma noktası: Bu deney, bitüm ve modifiye bitümlere uygulanarak düşük sıcaklıklardaki bitümün davranışı belirlenir. Bu deney ile bitümün kritik sertliğe (stiffness) ulaştığı ve kırıldığı sıcaklık (-30°C'ye kadar) tespit edilir. Özellikle soğuk bölgelerde kullanılmaya uygun bitüm türünün belirlenmesi için uygundur.

Özgöl ağırlık: Piknometre yöntemi ile belirlen özgül ağırlık, 25 °C sıcaklıktaki bitümlü malzemenin, havadaki ağırlığının aynı sıcaklık ve aynı hacimdeki havası alınmış destile suyun ağırlığına oranıdır.

Viskozite: Asfaltın kıvamı ve akmaya karşı direnci viskozite ile ölçülür. Asfalt kıvamı artarak yarı-katı hale yaklaşması sonucunda vizkozite değeri artar.

Bu deneyin amacı asfaltların karıştırma ve sıkıştırma sırasında akma özelliklerini belirlemektir.

Asfaltın viskozitesi, karıştırma sıcaklığı için 170 ± 20 santistok ve sıkıştırma sıcaklığı için 80 ± 30 santistok olarak belirlenir.

1.8. Sathi Kaplama Dizaynı

Sathi kaplama dizaynı;

- Agregas ve Bitüm miktarının tayini,
- Alt temel-Temel kalınlığının belirlenmesi,

olmak üzere başlıca ikiye ayrılabilir.

Dünya genelinde sathi kaplamalarda kullanılan agregas ve bitüm miktarının belirlenmesinde kullanılan dizayn yöntemlerinin gelişimi incelendiğinde, ilk dizayn metodunun 1934 yılında Yeni Zelanda'da Hanson tarafından geliştirildiği görülmektedir. Bu metodun ardından, 1953 yılında geliştirilen ve sonraki yıllarda modifiye edilen Kearby metodu özellikle Amerika Birleşik Devletleri Teksas eyaletinde kullanılmıştır. Daha sonra, Hanson metodunu temel alan Birleşik Krallık (UK) (1963), Mcleod (1969), Yeni Zelanda (2005), Avustralya (2006) ve Güney Afrika (2007) gibi dizayn metotları geliştirilmiştir (KGM, 2020).

Bu yöntemlerin ortak noktası, ilk tasarım yaklaşımı olan Hanson metodunda tanımlanan Agregaların En Küçük Boyutlarının Ortalaması (EBO), agreganın trafik etkisiyle bitüme gömülme miktarı ve boşluk yüzdesinin temel alınmasıdır.

Sathi kaplamalarda kullanılan agregas ve bitüm miktarının belirlenmesinde aşağıdaki işlem adımları takip edilmektedir

Sathi kaplamalarda kullanılan agregas ve bitüm miktarı aşağıdaki şekilde belirlenir.

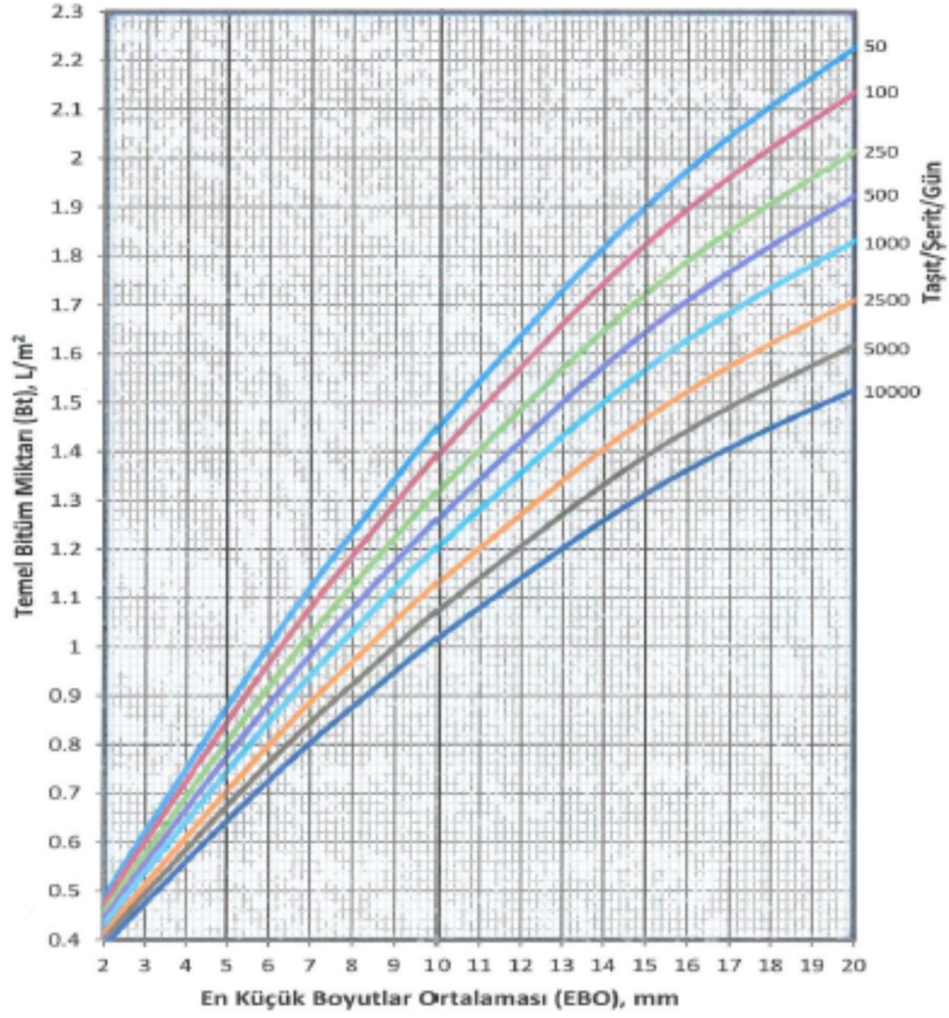
- Agregas Ortalama Boyutu ve Yassılık İndeksi değeri kullanılarak EBO hesaplanır.

- Her bir trafik şeridi için “Şerit Başına Düşen Eşdeğer Yıllık Ortalama Günlük Trafik (ŞEGT)” bulunur.
- Hesaplanan ŞEGT ve EBO değerleri ile temel bağlayıcı miktarı Şekil 13’deki abak abaktan okunur.
- Modifiye bitüm düzeltme faktörleri ve iklim ile yüzey dokusu düzeltmeleri kullanılarak dizayn bağlayıcı uygulama miktarı hesaplanır.
- Gevşek birim ağırlık ve EBO değerleri yardımı ile sathi kaplama tabakasının türüne göre kullanılacak agrega miktarı Eşitlik (1) ve (2) yardımıyla tespit edilir (KGM, 2008)

$$M_d = \frac{EBO * \gamma_g}{1000} \quad (1)$$

$$M_d = \frac{EBO * \gamma_g}{950} \quad (2)$$

Eşitliklerde, dizayn agrega miktarı M_d (kg/m²), agreganın gevşek birim hacim ağırlığı γ_g (kg/m³) ile ifade edilmektedir.

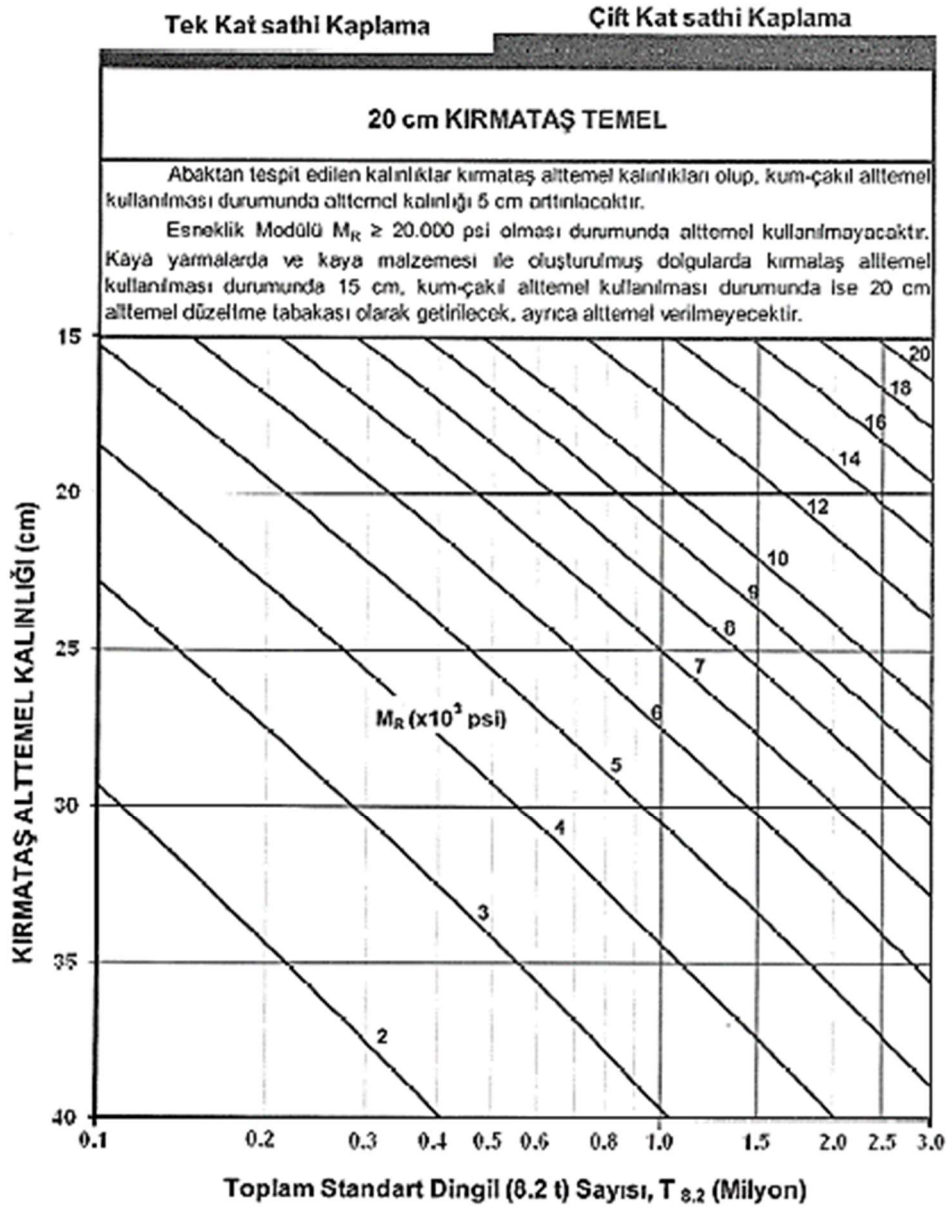


Şekil 13. Bitüm miktarı tayini abağı

Sathi kaplama tasarımında temel ve alt temel kalınlıkları, zemin elastisite modülü (M_R) değeri ile yolun proje süresi boyunca geçecek toplam standart dingil yükü sayısına göre Şekil 14'deki abak yardımıyla tayin edilebilir (KGM, 2020).

1.8.1. Abağın Kullanımı

M_R ve $T_{8.2}$ değerleri tespit edildikten sonra, üstyapı kalınlıkları şu şekilde belirlenir.



Şekil 14. Sathi kaplamalı esnek üst yapılar için projelendirme abağı

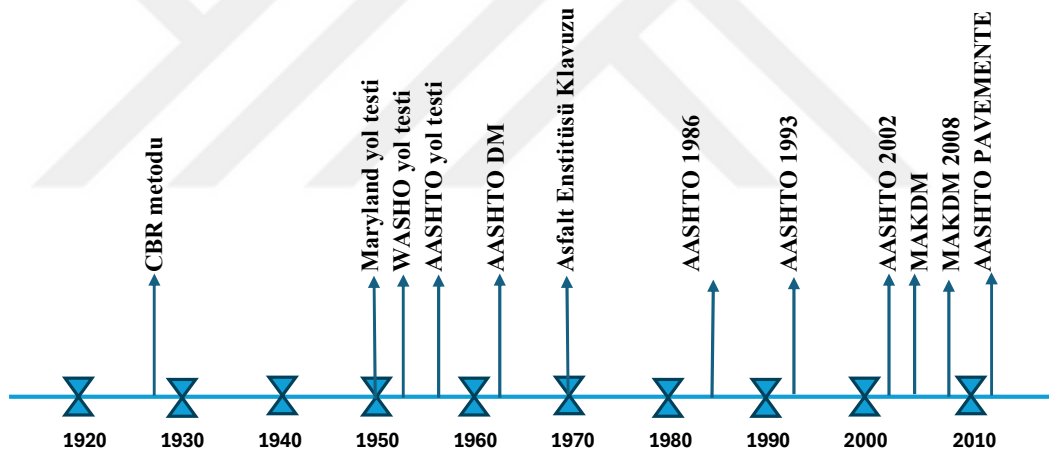
Abakta 10 yıl olarak belirlenen proje süresi ile beraber, yolun önem durumu değerlendirilerek, proje süresini daha kısa veya daha uzun almak mümkündür.

$T_{8.2}$ sayısı yatay ekseninde bulunarak, eksene dik bir doğru çizilir. Bu doğrunun M_R değerini (psi) gösteren eğik çizgi ile kesiştiği nokta tespit edilir. Bu noktadan yatay eksene paralel bir doğru çizilerek düşey ekseni kestiği nokta istenilen alt temel kalınlığını belirler. Abağın üst kısmından ise $T_{8.2}$ 'ye karşı gelen temel kalınlığı ve sathi kaplama tipi seçilir (Sağlık & Güngör, 2008).

1.9. Esnek Üstyapıların Yapısal Tasarımı

Çevresel etkilere ve trafik yüküne maruz kalan yol üst yapılarında, yorulma ve tekerlek izinde oturma gibi bir takım bozulma ve deformasyonlar meydana gelir. Bu bozulmalar yolun servis ömrü kısalmaktadır. Kaplamada oluşan deformasyonlar, kaplamanın bu yük ve etkilere karşı göstermiş olduğu mekanik tepkiler (gerilme, birim şekil değiştirme ve yer değiştirme) ile tanımlanmaktadır. Üstyapı tasarımı, kaplamada meydana gelen tepkilerin belirli bir sınır değeri aşmaması için gerekli tabaka kalınlıklarının ve üstyapı kesitinin belirlenmesini içerir (Huang, 2004; Tunç, 2007; Chen, 2009).

Üstyapı alanında araştırmalar yapan farklı kuruluşların üstyapı tasarımı için önerdikleri çeşitli yöntemler mevcuttur Şekil 15’de bu yöntemlere ilişkin genel bir kronoloji sunulmuştur.



Şekil 15. Üstyapı tasarım yöntemleri

CBR değerine dayanan ampirik yöntem, Terzaghi'nin taşıma gücü formülasyonuna bağlı olarak geliştirilen kayma göçmesi sınır yöntemi, Burmister'ın iki tabaka teorisine dayalı deplasman sınır yöntemi, arazi deneylerinden elde edilen regresyon denklemlerinin kullanıldığı AASHTO yöntemi ve yük altındaki kesitte oluşan mekanik tepkilerin ampirik transfer denklemleri ile yol ömrüne dönüştürüldüğü Mekanistik-Ampirik (M-A) yöntem kronolojik sıralamada yer alan başlıca yöntemler olarak sıralanabilir (Huang, 2004; Tunç, 2007; Hafeez, Shan, Ali, & Ahmed, 2017).

Türkiye Karayolları esnek üst yapı tasarımında kullanılan AASHTO yönteminin tarihsel gelişimi ve değişen tasarım parametreleri aşağıda kısaca özetlenmiştir;

AASHTO-1972 tasarım yöntemi: Bu tasarım yöntemi ile kaplama tabakalarında kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri ve tabaka kalınlıkları ile yükleme koşullarının (dingil yükü ve tekrar sayısı) kaplama üzerindeki etkileri ile kaplama performansının tekerrür eden yükler altında nasıl değiştiği incelenmiştir. Üst yapı tabakalarının kalınlıklarının belirlenmesi amacıyla kullanılan eşitlik AASHTO yol testlerindeki gözlem ve ölçümlere dayanarak geliştirilmiştir. AASHTO yönteminde, bir kaplamanın performansının ölçüsü (Servis yeteneği) taşıtların güvenli ve konforlu bir şekilde seyahat edebilmesidir. AASHTO yol testinde, kaplamanın hizmete açıldığı andan hizmet ömrü sonuna kadar geçen sürede azalan servis yeteneğine bağlı olarak performansının nasıl değiştiği incelenmiş ve bu verilere dayanarak tasarım formülleri oluşturulmuştur.

AASHTO-72 tasarım yönteminde, sırasıyla şu adımlar izlenir: İlk olarak, üstyapı tabanının CBR değeri belirlenir. Ardından, yolun proje ömrü boyunca maruz kalacağı toplam standart dingil yükü sayısı hesaplanır. Bölge faktörü, şerit faktörü ve yolun son hizmet kabiliyeti indeksi belirlenir. Tasarım denklemi yardımıyla üstyapı sayısı (SN) belirlenir. Tabaka kalınlıkları ile izafi mukavemet katsayılarının çarpımının en az SN değerini vermesini sağlayan tabaka kalınlıkları tespit edilir. Son olarak, her bir tabakanın CBR değerlerine göre kalınlıklar tekrar kontrol edilir ve yetersiz olan kalınlıklar artırılır. (Armağan, 2019).

AASHTO-1986 tasarım yöntemi: 1986 tasarım yöntemi, zemin taşıma gücü yerine zemin esneklik modülü (M_R) değerini, bölgesel faktör (R) yerine rasyonel değerlere bağlı çevresel etkileri kullanmak suretiyle 1972 tasarım yöntemine göre daha gerçekçi yaklaşımlar sunar. 1986 yönteminde trafik tahminine bağlı olarak ortaya çıkabilecek hata risklerini azaltmak amacıyla güvenilirlik katsayısı (R) denkleme eklenmiştir. Ayrıca, bu yöntemde zemindeki şişme ve donma özelliklerinden kaynaklanan servis yeteneği kaybı da dikkate alınır (Armağan, 2019).

AASHTO 1993 tasarım yöntemi: 1986 rehberinden sonra, 1993 yılında AASHTO tasarım rehberinin gözden geçirilmiş bir versiyonu yayınlanmış, ancak esnek üstyapı tasarım yönteminde bir değişiklik yapılmamıştır. Taban zemininin taşıma gücü ve yolun maruz kaldığı toplam standart dingil yükü sayısı, üstyapı kalınlıklarını etkileyen iki önemli faktör olarak tasarımda yer almaktadır. Taban zemini M_R değeri, laboratuvar deneyleriyle

belirlenebilir veya CBR değerine bağlı olarak abaklar ya da formüller kullanılarak hesaplanabilir (Armağan, 2019).

AASHTO-2002 tasarım yöntemi: 1993 yılından sonra taşıt teknolojilerinde büyük ilerlemeler kaydedilmiş ve trafikteki ağır taşıt sayısı, araçların dingil yapıları ve taşıt tekerlekleri ile yola iletilen gerilmeler önemli derecede artmıştır. Ayrıca AASHTO 1993 tasarım yöntemi, sadece belirli bir coğrafi bölgeyi dikkate aldığından, değişen iklim koşullarının üstyapıda meydana getirdiği etkileri belirlemek mümkün değildir. AASHTO yol testleri sırasında herhangi bir drenaj uygulaması yapılmamıştır. Sıralanan bu nedenlerle mevcut üstyapılar, özellikle kalıcı deformasyonlara karşı yetersiz kalmıştır. . AASHTO 2002 tasarım yönteminde yol performansının değerlendirilmesinde termal çatlaklar, yorulma çatlakları ve tekerlek izinde oturma gibi parametreler dikkate alınmaya başlanmıştır. Performans problemlerini azaltmak için, üstyapının geometrik düzgünlüğü ve sürüş kalitesinin bir ölçütü olan Uluslararası Düzgünlük Endeksi (IRI) de dikkate alınmıştır. (Armağan, 2019).

AASHTO 2002 yöntemi, AASHTO 1993 yöntemine kıyasla tasarımcılara değişen veri setleri için (tabaka malzemeleri, aks düzenleri, dingil yükleri, tekerlek lastiği özellikleri, tekerlek iç basıncı, iklimsel ve çevresel koşullar) yeni bir tasarım yaklaşımı sunmaktadır. Bu yöntem hem detaylı verileri hem de ampirik formülleri tasarım sürecinde kullanma imkanı sağlar. Ayrıca tasarımlar, yerel bazda kalibre edilebilmektedir. (Armağan, 2019).

AASHTO-2002 tasarım yöntemi öncesinde kullanılan tasarım denklemleri Ottawa, Illinois'te belirli bir coğrafi lokasyonda belirli sayıda üst yapı kesitinde yapılan deneylere bağlı olarak ortaya koyulmuştur. Değişen malzeme, lokasyon, iklim, trafik ve yükleme şartları yöntemin geçerliliğini sorgulamaya açık hale getirmiş ve son yıllarda, tasarımda yeni malzemelerin, farklı yük ve dingil kombinasyonlarının ve değişen çevresel koşulların kullanımına imkan veren M-A yöntemler sıklıkla kullanılmaya başlanmıştır (Bostancıoğlu, 2021).

M-A yöntemlerin mekanistik aşamasında, kaplama performans kriterleri veya kaplama mekanik tepkileri (gerilme, deplasman, birim şekil değiştirme) matematiksel modeller kullanılarak hesaplanır. Ampirik aşamada ise, bu mekanik tepki değerleri ampirik transfer denklemleri yardımıyla kaplamada meydana gelen yorulma ve tekerlek izi gibi deformasyonları ile ilişkilendirilir (Mehdi Mashayekhi, 2011; Behiry, 2012; Mousa, Abo-Hashema, Gadallah, & Mousa, 2015; Carvalho & Schwartz, 2006).

M-A yöntemlerde, tahmin ve gözlemden ziyade sayısal analiz kullanılması, daha gerçekçi sonuçlara ulaşmayı sağlamaktadır (Abut, 2022).

Bu çalışmanın amacı Türkiye Karayollarında sathi kaplamaların tasarımında kullanılan ve taban zemini esneklik modülü değeri ile $T_{8.2}$ değerini ilişkilendiren ampirik AASHTO yönteminin kısıtlılıklarını ortadan kaldırmak ve farklı taban zemini esneklik modülü, farklı tekerlek yükleri, yükleme koşulları ve çevresel koşulları dikkate alan tasarım denklemini ortaya koymaktır.



2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bu tez çalışmasının amacı düşük standartlı esnek kaplamaların tasarımında kullanılan AASHTO-93 yönteminin farklı taban zemini, esneklik modülü ve standart dingil yükü değerleri için önermiş olduğu kesitleri mekanik olarak çözümlemek ve AASHTO-93 yöntemi ile aynı aralıkta yol ömrü değerlerini veren ampirik transfer denklemini ortaya koymaktır. AASHTO-93 tasarım yöntemi sadece 80 kN (8.2 ton) dingil yükü etkisindeki kesitlerin tasarımı amacıyla kullanılmakta, ayrıca tasarımda yalnızca taban zemininin taşıma gücü dikkate alınmaktadır. Dingil yüklerinin, yük konfigürasyonlarının (tekil ve dual teker, tandem, tridem yükleme gibi) tekerlek temas basıncı ve temas alanının, tabaka malzemelerinin ve çevresel koşulların değişimi tasarımda dikkate alınmamaktadır. AASHTO-93 yöntemi ile uyumlu transfer denkleminin belirlenmesi durumunda üst yapı tasarımına etki eden tüm parametrelerin tasarımdaki etkileri analiz edilebilecek ve AASHTO-93 yöntemi desteklenecektir.

Kaplama analizinde yüke bağlı deformasyonlarla ilişkili iki kritik mekanik tepki, taban zemini üzerinde oluşan düşey basınç birim şekil değiştirmeleri (ϵ_v) ve asfalt tabakası altında oluşan yatay çekme birim şekil değiştirmeleridir (ϵ_r) (Behiry, 2012; Muniandy & Aburkaba, 2013).

ϵ_v değerinin belirli bir limit değer üzerinde olması durumunda , taban zemininde kalıcı deformasyonlar meydana gelmekte ve kaplama tekerlek izinde oturmaya bağlı olarak bozulmaktadır. ϵ_r değerinin aşırı olması durumunda, asfalt tabakasında çekme çatlakları oluşmakta ve kaplama yorulmaya bağlı olarak bozulmaktadır (Adhikari, Shen, & You, 2009; Behiry, 2012; Mousa, Abo-Hashema, Gadallah, & Mousa, 2015; Ekwulo & Eme, 2009).

Bu iki kritik mekanik tepkiyi esas alarak geliştirilmiş çok sayıda transfer denklemi ve yorulma/tekerlek izi modeli bulunmaktadır. Bu modellere ait genel denklemler Eşitlik (3) ve (4)'de, bu modellerde kullanılan katsayılar (f_1 - f_5) ise Tablo 7'de gösterilmiştir (Behiry, 2012; Muniandy & Aburkaba, 2013).

$$N_f = f_1 \epsilon_r - f_2 E_{yüzey} - f_3 \quad (3)$$

$$N_r = f_4 (\epsilon_v)^{-f_5} \quad (4)$$

Tablo 7. Farklı kuruluşlar için bozulma modeli katsayıları (Behiry, 2012; Muniandy & Aburkaba, 2013)

	AI	Shell	USACE	BRRC	TRRL
f₁	7.95E-02	6.85E-02	497.156	4.92E-14	1.66E-10
f₂	3.291	5.671	5	4.76	3.565
f₃	0.854	2.363	2.66	0	0
f₄	1,37E-09	6,15E-07	1,81E-15	3,05E-09	1,13E-06
f₅	4.477	4	6,527	4,35	3,75

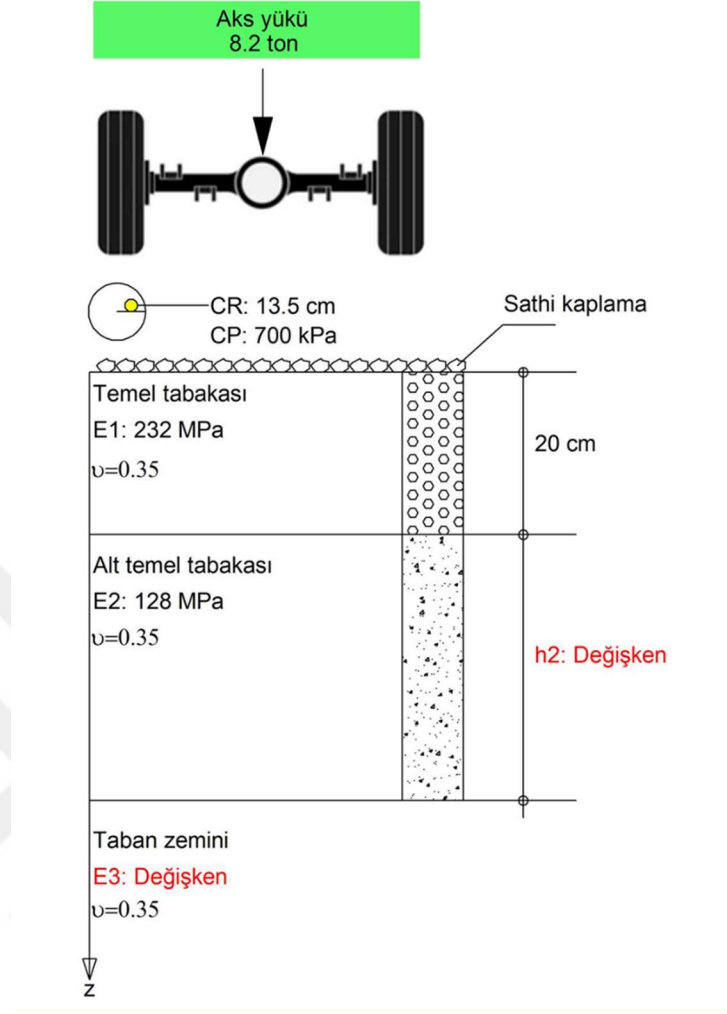
(AI: Asfalt Enstitüsü, USACE: ABD Ordusu Mühendisler Birliği, BRRC: Belçika Yol Araştırma Merkezi, TRRL: Ulaşım ve Yol Araştırma Laboratuvarı)

Eşitliklerde, N_f yorulmaya bağlı bozulma için gerekli yük tekrar sayısını, N_r tekerlek izine bağlı bozulma için gerekli yük tekrar sayısını, $E_{yüzey}$ yüzey tabakasının elastisite modülünü (psi) belirtmektedir.

Çalışmada taban zemini üzerinde alt temel ve temel tabakaları ile sathi yüzey kaplamasından oluşan geleneksel bir üst yapı kesiti, seçilmiş olup, tabaka kalınlıkları z ekseninde tanımlanmıştır (Şekil 16). Mekanik analizlerde tabaka malzemeleri lineer elastik olarak tanımlanmış ve elastisite modülü ve Poisson oranı değerleri kullanılarak karakterize edilmişlerdir (Sağlık & Güngör, 2008; Hadi & Bodhinayake, 2003).

Analizlerde kullanılmak üzere alt temel ve temel tabakası esneklik modülü değerleri, Esnek Üst Yapılar Projelendirme rehberinde alt temel ve temel tabakası için belirlenmiş izafi mukavemet katsayılarının (0.15 ve 0.13) Eşitlik (5) ve (6) ile dönüştürülmesi sonucu elde edilmiştir. Sathi kaplamanın bir taşıma gücü olmadığı için elastisite modülü tanımlaması yapılmamış, sathi kaplamaya etki eden tekerlek yükü doğrudan alt tabakalara aktarılmıştır.

Tabakalara ait mekanik özellikler (Elastisite modülü, poisson oranı ve izafi mukavemet katsayısı değerleri), AASHTO yöntemine uygun şekilde tanımlanmış yükleme durumu Şekil 16'da verilmiştir. Kesit üzerindeki tekerlek yükü tekil aks üzerinde 80 kN (8.2 ton) olarak belirlenmiş ve bu yük akstaki tekil tekerleklere eşit olarak (40 kN) paylaştırılmıştır. Tekerlek temas basıncı literatür ile uyumlu olarak 700 kPa seçilmiştir (Hadi & Bodhinayake, 2003). 40 kN yükün 700 kPa temas gerilmesi oluşturabilmesi için gerekli tekerlek temas alanı 13.5 cm olarak hesaplanmıştır (Bostancıoğlu, 2020).



Şekil 16. Üst yapı kesiti

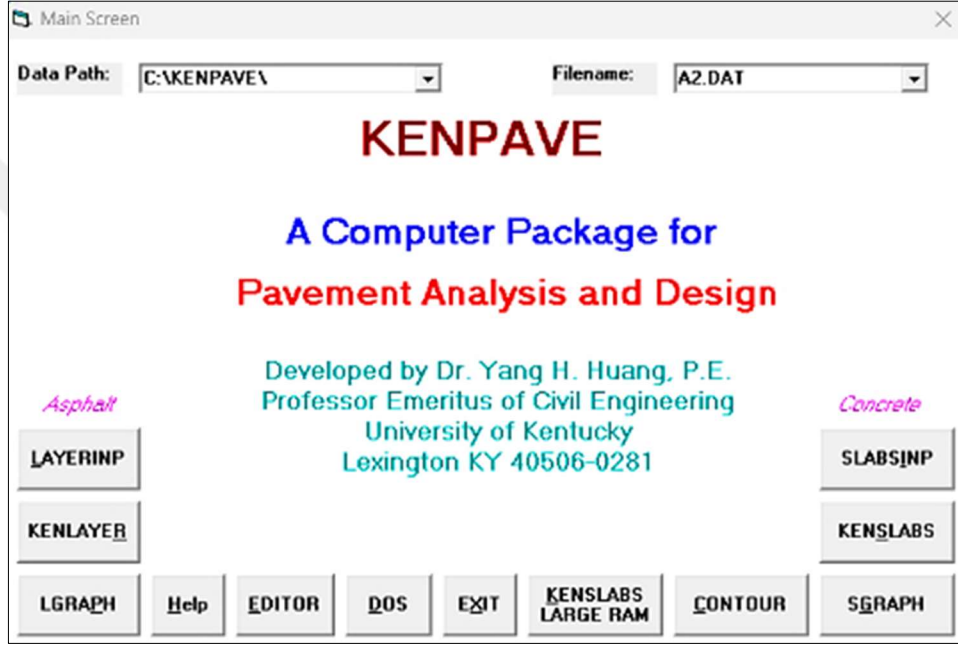
$$a_{temel} = 0,249 * \log(E_{temel}) - 0,977 \quad (5)$$

$$a_{alt temel} = 0,277 * \log(E_{alt temel}) - 0,839 \quad (6)$$

Eşitlik (5) ve (6)'da (a_{temel}) ve ($a_{alt temel}$) sırasıyla temel ve alt temel tabakalarının izafi mukavemet katsayılarını, (E_{temel}) ve ($E_{alt temel}$) ise sırasıyla temel ve alt temel tabakalarının elastisite modülü (psi) değerlerini belirtmektedir.

Şekil 16'da gösterilen alt temel tabakası kalınlığı (h_2), değişen taban zemini esneklik modülü ve $T_{8.2}$ değerlerine bağlı olarak Şekil 14'de verilen tasarım abağından okunmuştur. Üst yapı tasarımında etkisi çok az olan tabaka Poisson oranı değerleri (ν) tüm tabakalar için 0,35 olarak belirlenmiştir (Huang, 2004; Hadi & Bodhinayake, 2003; Sarkar, 2016).

Kesitin mekanik çözümlemesi ve yük altındaki tepki değerlerinin bulunması amacıyla KENLAYER yazılımı kullanılmıştır (Şekil 17). KENLAYER, tabakalı üst yapı sistemlerinin farklı yükleme koşulları (tekil ve dual tekerlek, tandem ve tridem aks konfigürasyonu gibi) altındaki mekanik tepkilerinin bulunmasında literatürde başarıyla kullanılan bir yazılımdır. KENLAYER yazılımında tabaka malzemeleri lineer elastik, non-lineer elastik ve viskoelastik olarak tanımlanabilmektedir.



Şekil 17. KENLAYER programı giriş arayüzü

Çalışmada M-A tasarım yöntemi ile kaplama ömrü değerlerinin elde edilmesi amacıyla mekanik tepki değerleri Şekil 16'da verilen 4 kritik noktada hesaplanmıştır. Noktalara ait açıklamalar Tablo 8'de verilmiştir.

Tablo 8. Okuma noktaları

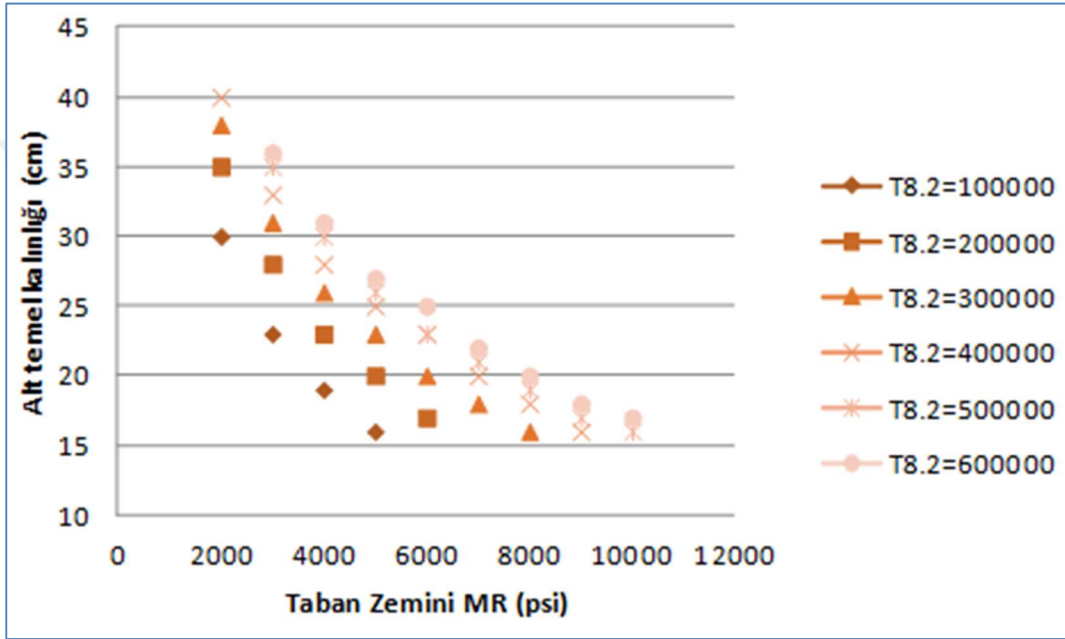
Okuma Noktası	Nokta Açıklaması
ZC1	Temel tabakası altı
ZC2	Alt temel tabakası üstü
ZC3	Alt temel tabakası altı
ZC4	Taban Zemini üstü

Literatür bilgisi incelendiğinde M-A tasarımda yorulmaya bağlı yol ömrü değerlerinin hesaplanması için bitümlü tabaka altındaki yatay birim şekil değiştirme değerleri (ϵ_r) kullanılırken tekerlek izinde oturmaya bağlı yol ömrü değerlerinin hesaplanmasında taban zemini üzerindeki düşey birim şekil değiştirme değerleri (ϵ_v) kullanılmaktadır. Sathi kaplamalarda belirli bir kalınlıkta bitümlü tabaka bulunmadığı için yol ömrü değerlerinin elde edilmesinde yorulma bozulması yerine tekerlek izinde oturma bozulmasının kullanılması gerektiği ve **ZC4** noktasının kritik olduğu öngörülmüştür.

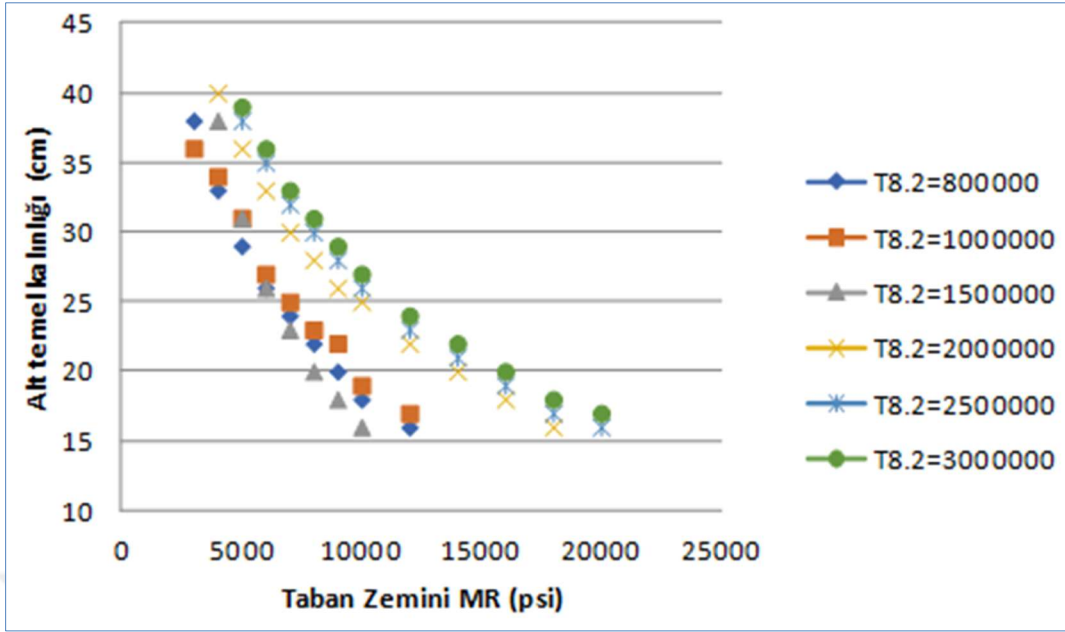
ZC4 noktasının kritik mekanik tepki noktası olarak belirlenmesi sebebiyle Şekil 14'te verilen tasarım abağında farklı $T_{8.2}$ ve farklı M_R değerleri için oluşturulan 101 farklı kombinasyon için türetilen kesitlerde ZC4 noktasındaki düşey birim şekil değiştirme değerleri belirlenmiş ve tekerlek izinde oturmaya bağlı yol ömrü denklemleri kullanılarak analiz edilen her bir kesitin N_r değerleri hesaplanmıştır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Esnek Üst Yapı Projelendirme Rehberinde verilen $T_{8.2}$ (100.000 ve 3.000.000 aralığında) ve taban zemini M_R değerleri (2.000-20.000 psi aralığında) için Şekil 14'deki sathi kaplama tasarım abağı kullanılarak Şekil 18 ve Şekil 19'da gösterildiği gibi gerekli alt temel kalınlıkları elde edilmiştir. Temel tabakası kalınlığı tüm kesitler için Esnek Üst Yapı Projelendirme Rehberinde önerildiği şekilde 20 cm kırmataş olarak uygulanmıştır.



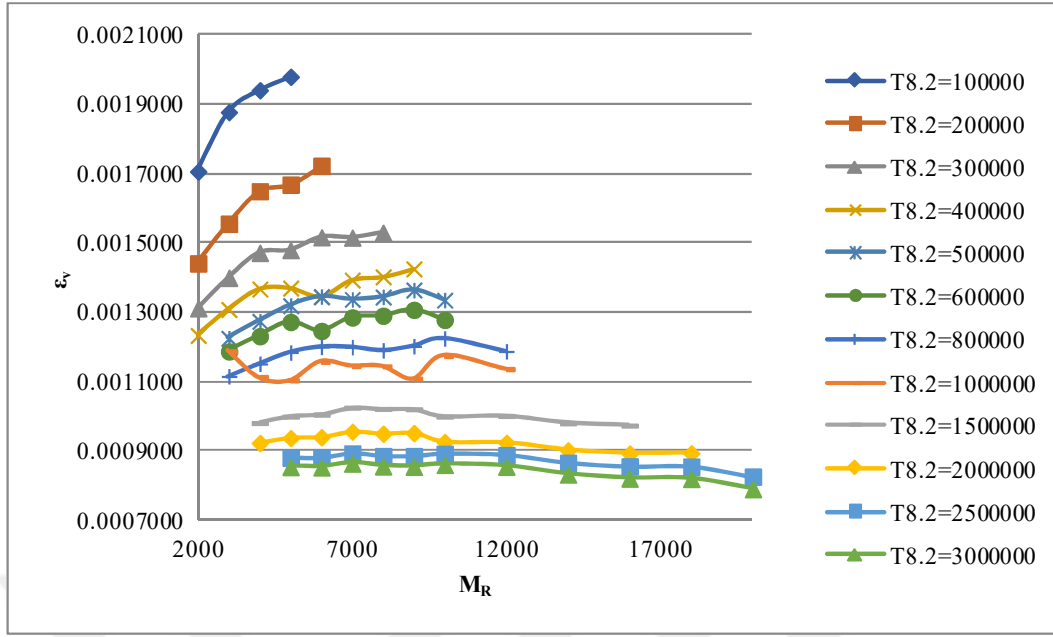
Şekil 18. $T_{8.2}$ ve M_R değerlerine bağlı olarak elde edilen alt temel kalınlıkları gösterimi ($T_{8.2}=100.000-600.000$)



Şekil 19. $T_{8.2}$ ve M_R değerlerine bağlı olarak elde edilen alt temel kalınlıkları gösterimi ($T_{8.2}=800.000-3000.000$)

Şekil 18 ve Şekil 19 incelendiğinde aynı taban zemini M_R değerine sahip kesitlerde $T_{8.2}$ değeri arttıkça alt temel kalınlıkları da artmaktadır. Temel tabakası kalınlığı sabit kalırken trafik yükünün artmasına bağlı olarak taban zeminine iletilecek gerilmelerin azaltılması amacıyla AASHTO yöntemi alt temel kalınlığını artırarak önlem almaktadır.

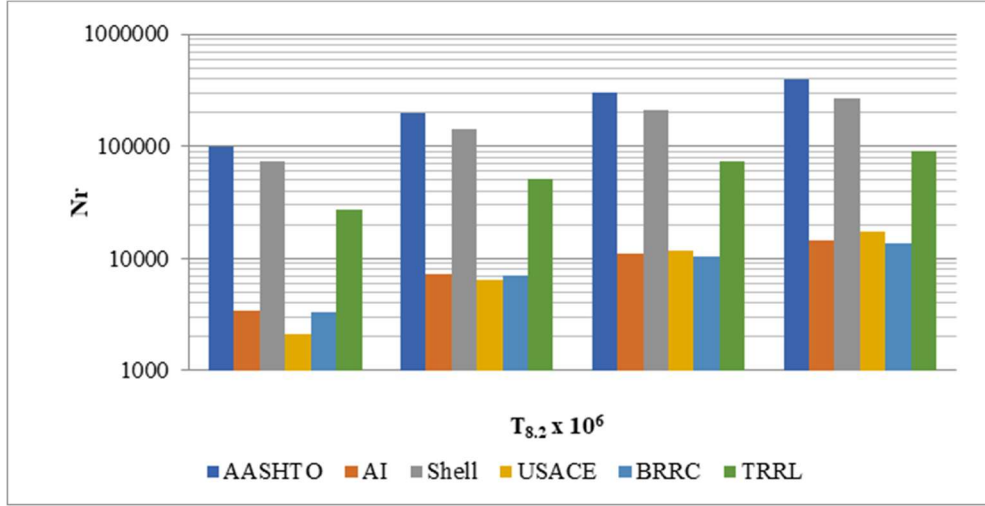
AASHTO sathi kaplama tasarım abağının artan trafik yükü değerlerine bağlı olarak alt temel tabakası kalınlığını artırması sonucunda taban zemini üzerindeki deformasyon değerlerinin nasıl değiştiğini belirlemek amacıyla değişen tüm trafik yükü ve taban zemini M_R değerleri için ϵ_v grafiği çizilmiştir (Şekil 20).



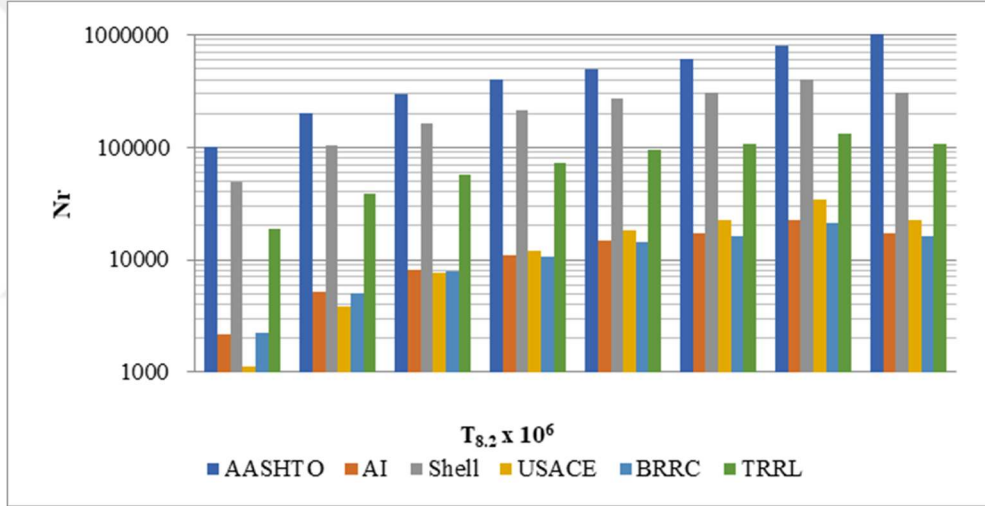
Şekil 20. Taban zemini üzerindeki ε_v değerleri

Şekil 20 incelendiğinde AASHTO yönteminin taban zemini üzerinde sabit bir deformasyon için üst yapı tasarımı yapmadığı görülmektedir. Trafik yükü değerinin düşük olduğu kesitlerde ($T_{8.2} = 100.000, 200.000, 300.000$) önerilen alt temel kalınlığı daha yüksek birim deformasyona sebep olurken $T_{8.2}$ değerinin 1.000.000 ve üzerinde olduğu kesitlerde önerilen alt temel kalınlıkları birim deformasyon değerini azaltmış ve yol ömrünü artırmıştır. Ayrıca düşük $T_{8.2}$ değerleri için taban zemini rijitliğinin artması deformasyon değerlerini artırmıştır. Taban zemini rijitliğindeki artış oranı ile alt temel kalınlığı azalma oranlarının birbirleri ile uyumsuz olması bu deformasyon artışının sebebi olarak gösterilebilir. Daha yüksek $T_{8.2}$ değerlerinde (özellikle $T_{8.2} > 1.500.000$ iken) ise birim deformasyon değerlerinin birbirlerine yakın olduğu görülmektedir.

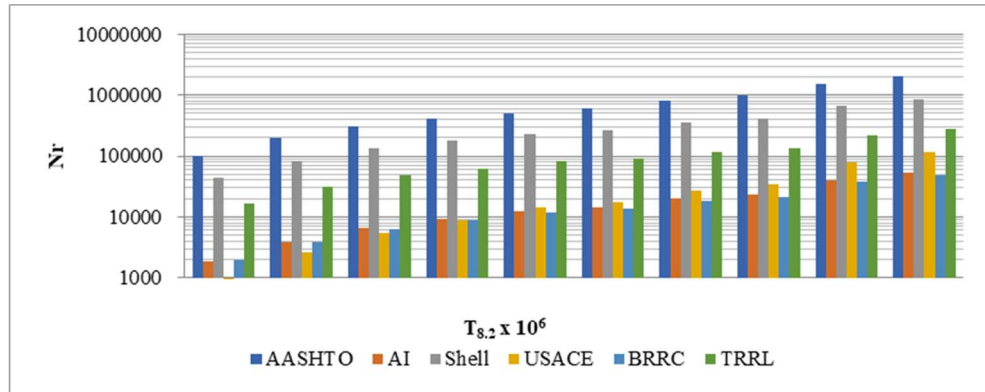
Mevcut çalışmanın temel amacı, AASHTO yönteminde belirtilen $T_{8.2}$ değerlerini sağlayan kritik mekanik tepki noktalarının belirlenmesi ve ampirik tasarım denkleminin elde edilmesidir. Bu amaçla taban zemini üzerindeki (ZC4 noktasındaki) ε_v değerlerine bağlı olarak farklı kurumlarca önerilen ampirik transfer denklemleri yardımıyla (Tablo 7) tekerlek izinde oturmaya bağlı yol ömrü değerleri elde edilmiş ve bu değerler AASHTO yönteminin önerdiği $T_{8.2}$ değerleri ile kıyaslanmıştır (Şekil 21 ile Şekil 34 arası).



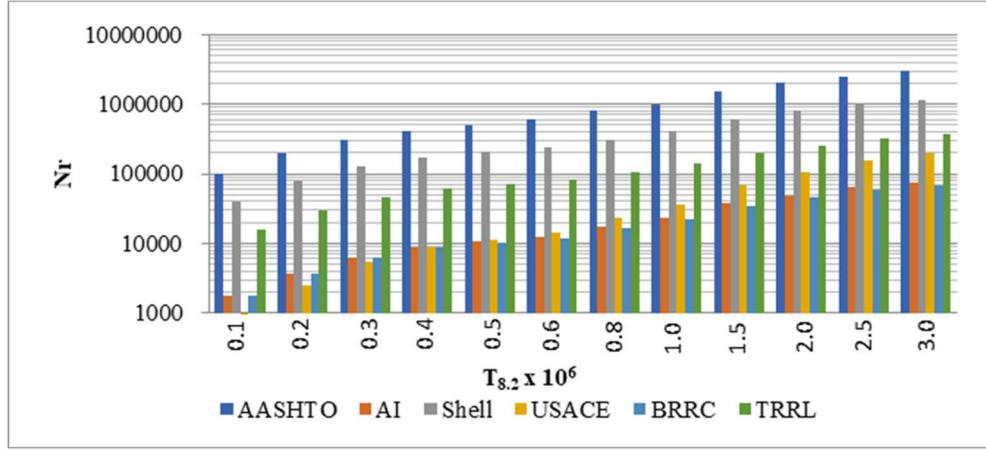
Şekil 21. ε_v değerlerine bağlı olarak hesaplanan N_r değerleri ($M_R = 2000$ psi)



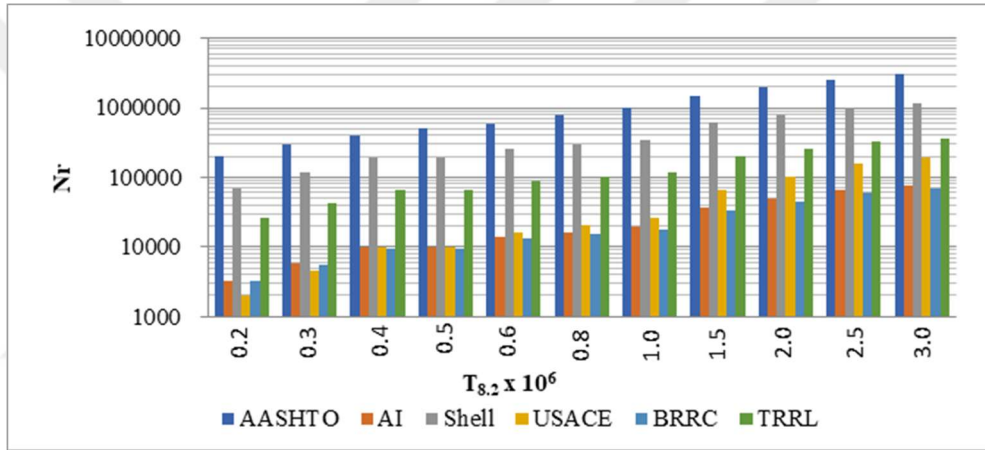
Şekil 22. ε_v değerlerine bağlı olarak hesaplanan N_r değerleri ($M_R = 3000$ psi)



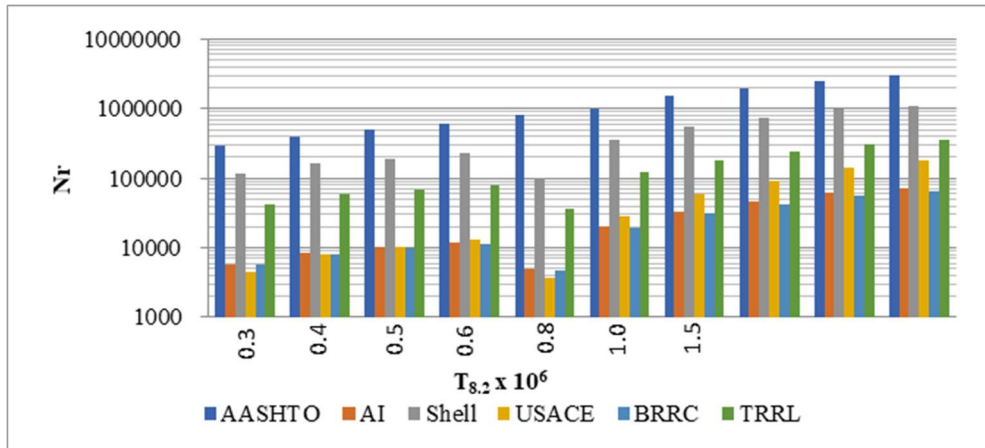
Şekil 23. ε_v değerlerine bağlı olarak hesaplanan N_r değerleri ($M_R = 4000$ psi)



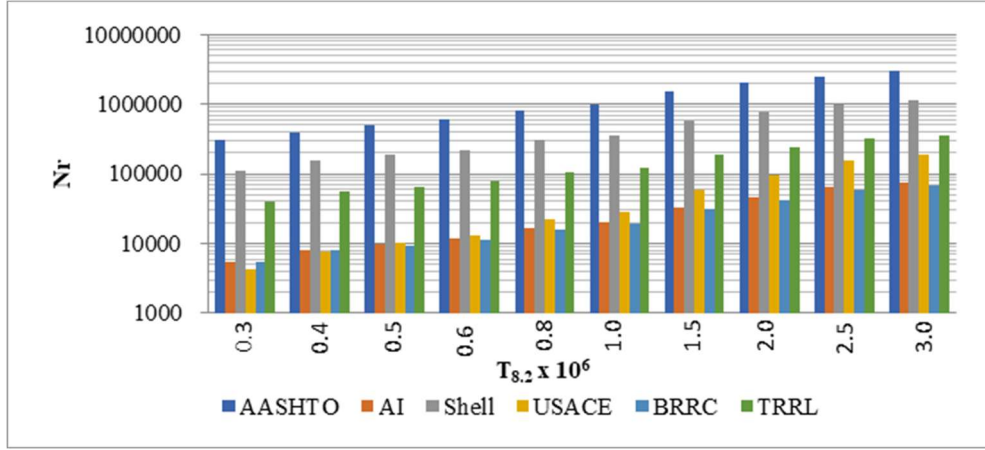
Şekil 24. ε_v değerlerine bağlı olarak hesaplanan N_r değerleri ($M_R = 5000$ psi)



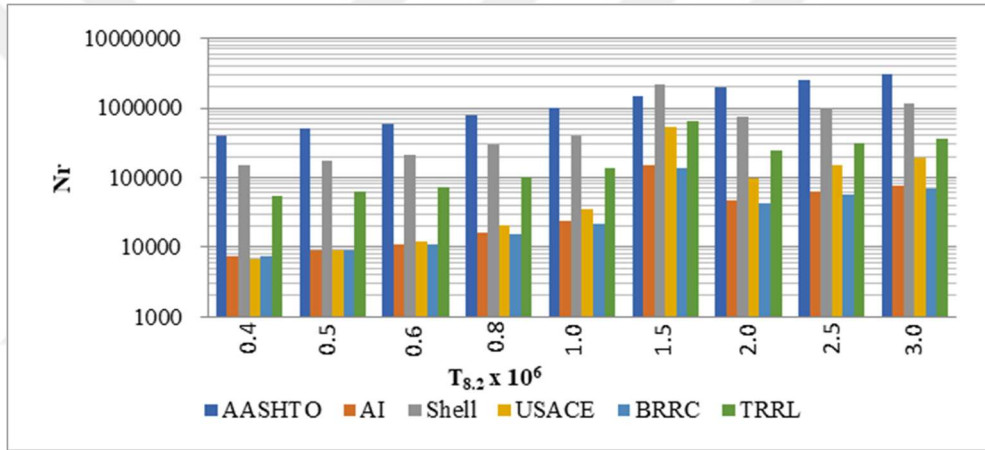
Şekil 25. ε_v değerlerine bağlı olarak hesaplanan N_r değerleri ($M_R = 6000$ psi)



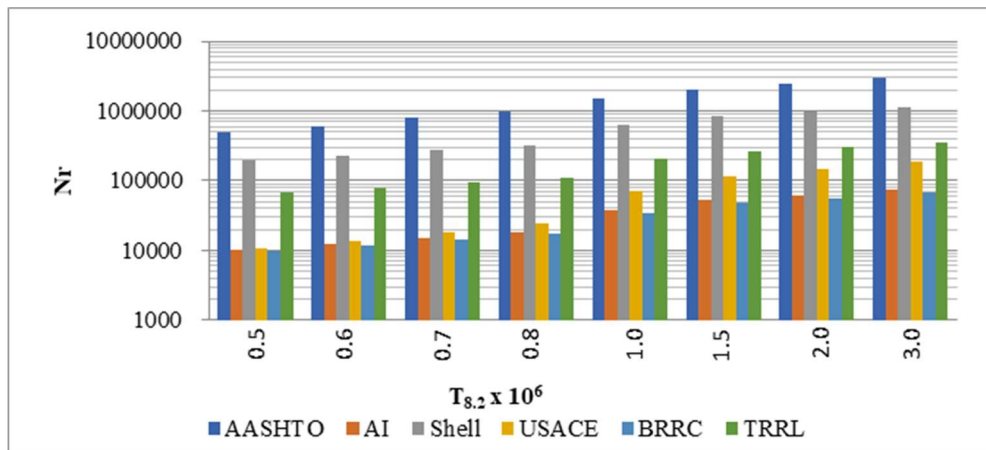
Şekil 26. ε_v değerlerine bağlı olarak hesaplanan N_r değerleri ($M_R = 7000$ psi)



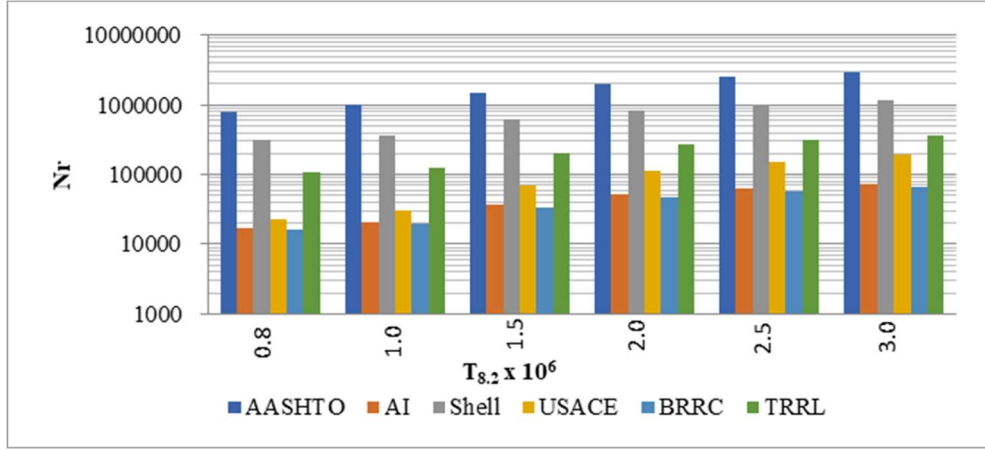
Şekil 27. ε_v değerlerine bağlı olarak hesaplanan N_r değerleri ($M_R = 8000$ psi)



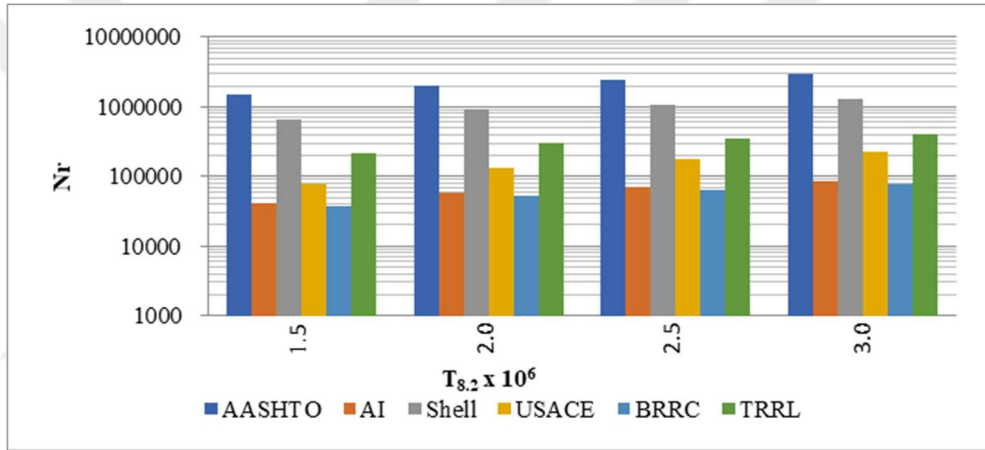
Şekil 28. ε_v değerlerine bağlı olarak hesaplanan N_r değerleri ($M_R = 9000$ psi)



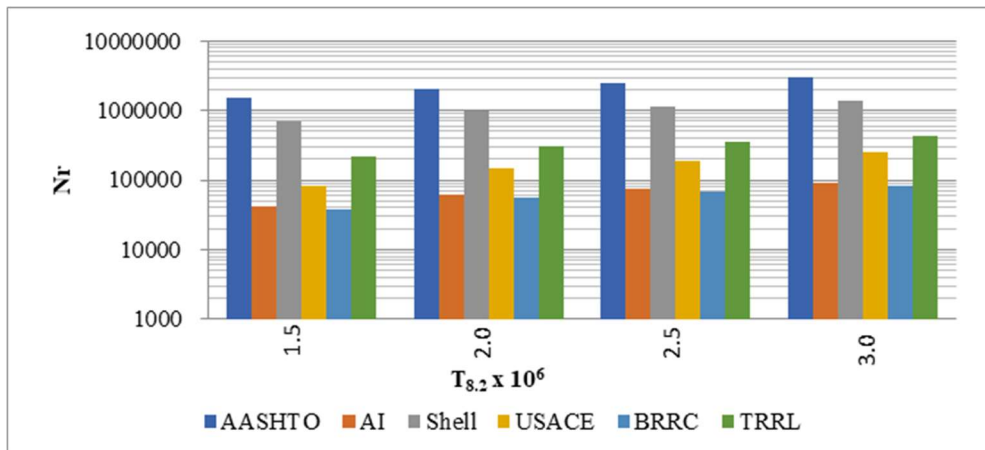
Şekil 29. ε_v değerlerine bağlı olarak hesaplanan N_r değerleri ($M_R = 10000$ psi)



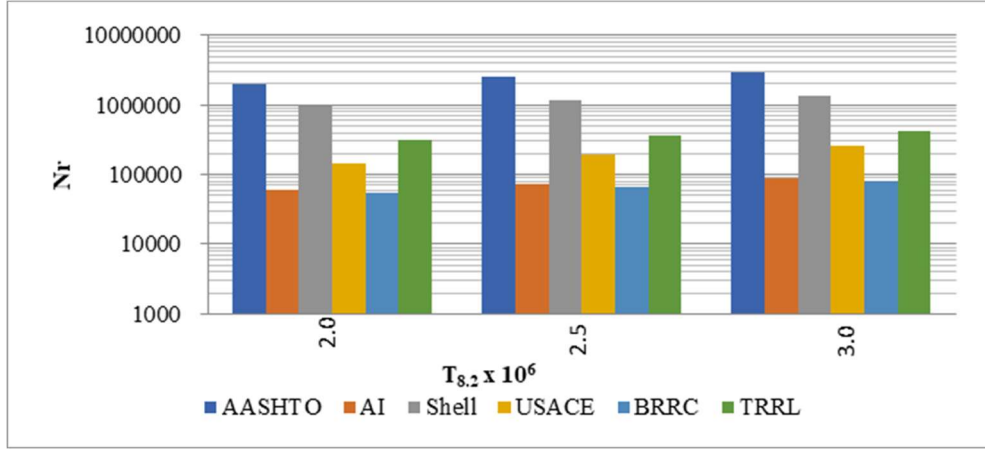
Şekil 30. ε_v değerlerine bağlı olarak hesaplanan N_r değerleri ($M_R = 12000$ psi)



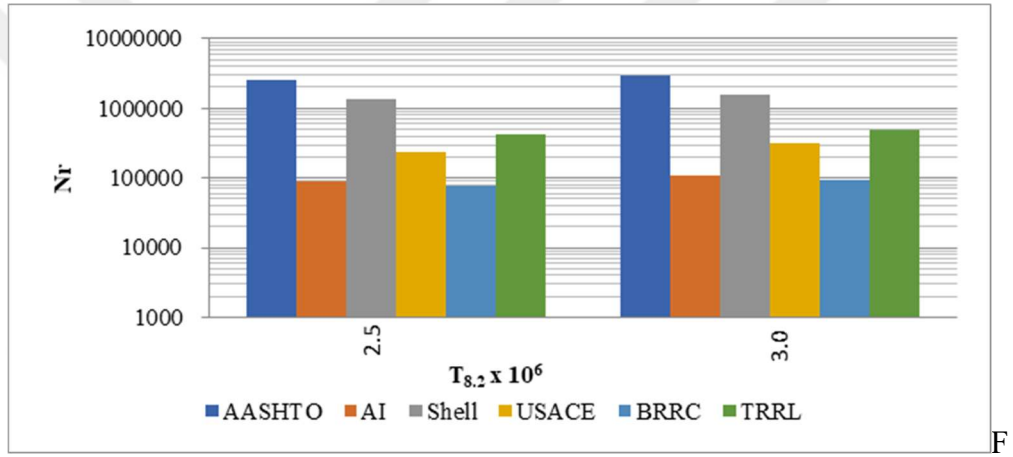
Şekil 31. ε_v değerlerine bağlı olarak hesaplanan N_r değerleri ($M_R = 14000$ psi)



Şekil 32. ε_v değerlerine bağlı olarak hesaplanan N_r değerleri ($M_R = 16000$ psi)



Şekil 33 ε_v değerlerine bağlı olarak hesaplanan N_r değerleri ($M_R = 18000$ psi)



Şekil 34. ε_v değerlerine bağlı olarak hesaplanan N_r değerleri ($M_R = 20000$ psi)

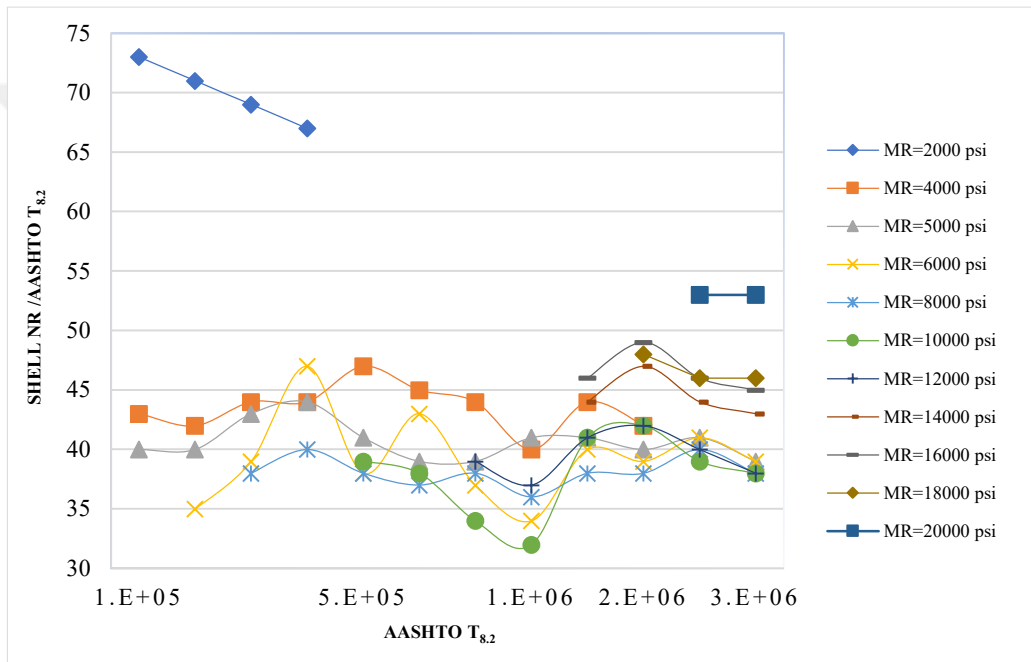
Şekil 21 ve Şekil 34 arasındaki grafikler incelendiğinde AASHTO tarafından tasarımda kullanılan $T_{8.2}$ değerlerine en yakın trafik yükü değerlerini sağlayan yöntemlerin Shell ve TRRL yöntemleri olduğu görülmektedir. Belirtilen bu iki yöntemin N_r denkleminde eşitlik (4)'de yer alan f_4 ve f_5 katsayıları birbirleri ile uyumludur ($f_4 = 6.15E-07$ ve $1.13E-06$ ve $f_5 = 4$ ve 3.75 sırasıyla).

Diğer üç yöntem için de f_5 katsayıları her ne kadar Shell ve TRRL yöntemleri ile uyumlu olsa da f_4 katsayılarının daha düşük olmaları yol ömrü değerlerini azaltmaktadır (Tablo 7).

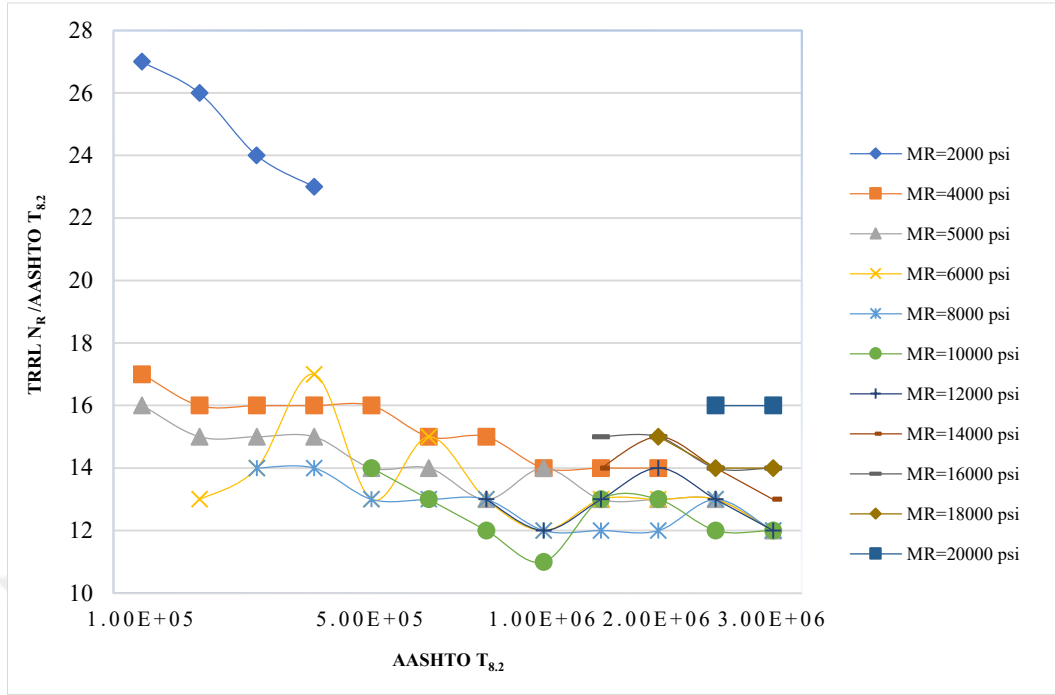
Yapılan bu analizler sonucunda AASHTO yöntemi ile uyumlu sonuçlar verecek bir model için f_4 katsayısının $E-06$ veya $E-07$ mertebesinde, f_5 katsayısının ise $3.75-6$

aralığında olması beklenir. Shell ve TRRL yöntemleri ile hesaplanan N_r değerlerinin AASHTO yönteminin önerdiği $T_{8.2}$ değerlerine oranları Şekil 35 ve Şekil 36’de verilmiştir.

Şekil 35 ve Şekil 36 incelendiğinde Shell yöntemi N_r sonuçlarının AASHTO değerleri ile %30 - %50 arasında değişen oranlarda uyumlu olduğu görülmektedir. M_R değerinin 2000 psi olduğu kesitlerde Shell yönteminin AASHTO yöntemi ile daha yakın sonuçlar verdiği, M_R değerinin 20.000 psi olduğu kesitlerde de oranların %50 üzerinde olduğu görülmektedir. Ancak AASHTO $T_{8.2}$ veya taban zemini M_R değerlerindeki artışa bağlı olarak net bir yakınsama elde edilememiştir.



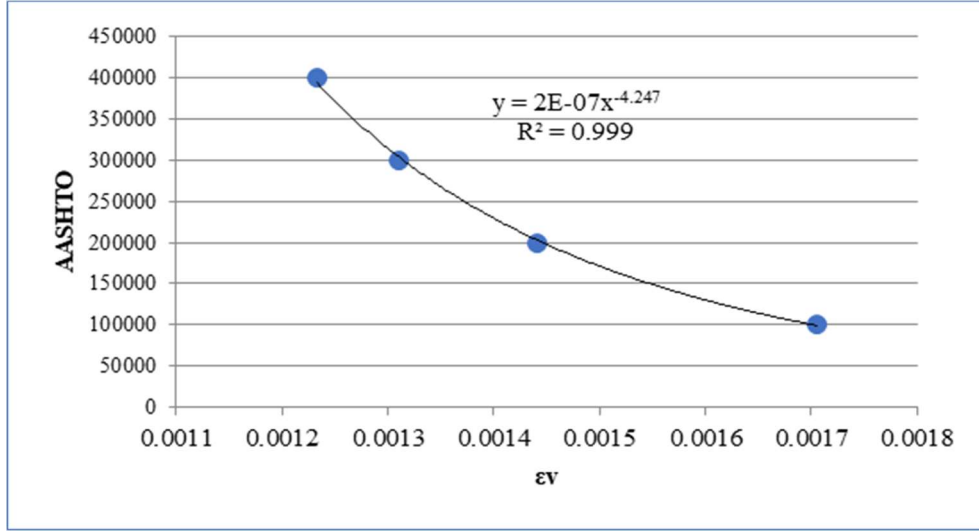
Şekil 35. Shell N_r /AASHTO $T_{8.2}$ oranları



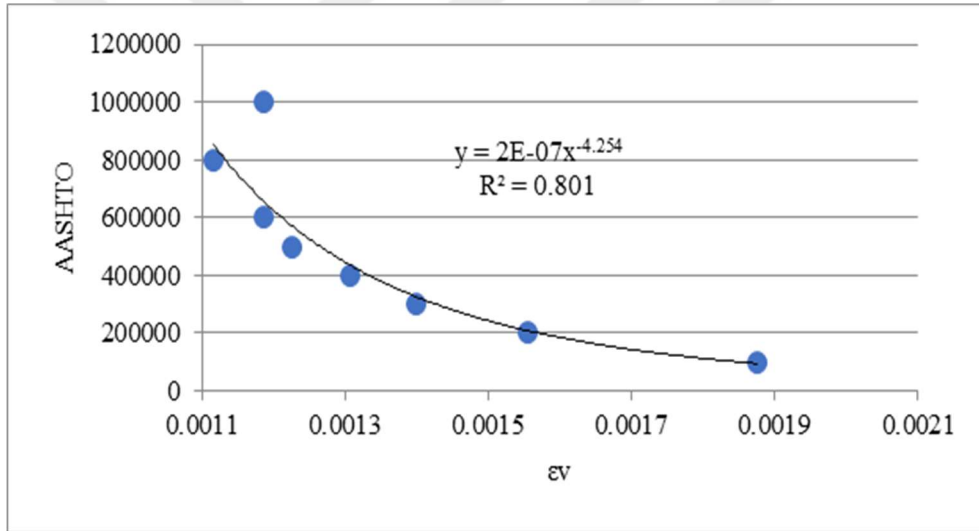
Şekil 36. TRRL N_r /AASHTO $T_{8.2}$ oranları

TRRL yöntemi N_r sonuçlarının da Shell yöntemi ile benzer biçimde olduğu görülmektedir. Ancak TRRL yönteminin kullandığı katsayıların farklı olması sebebiyle AASHTO yöntemi ile yakınsama oranları %12 ile %18 arasında hesaplanmıştır.

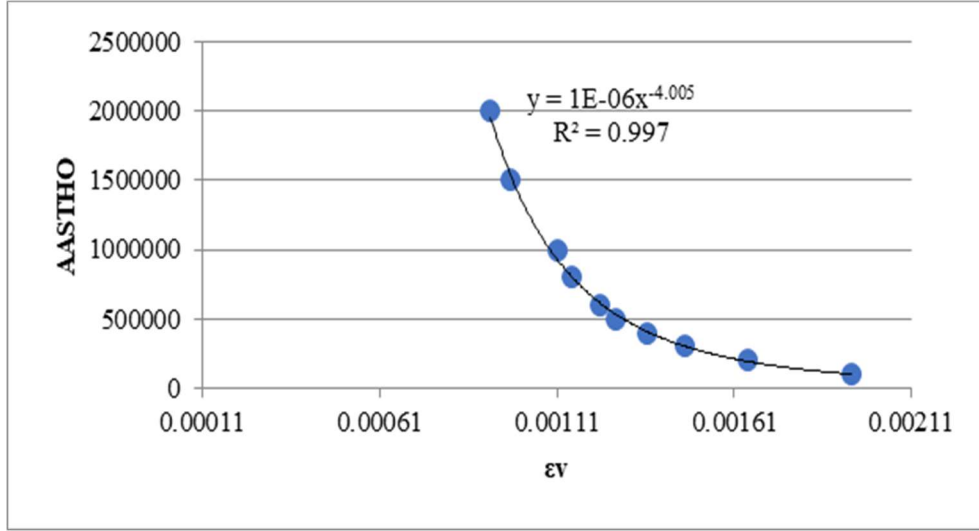
Shell ve TRRL yöntemlerinin AASHTO yöntemi $T_{8.2}$ değerlerine yakınsama aralıklarının sınırlı olması sebebiyle taban zemini üzerindeki ε_v değerleri ile AASHTO yönteminin önerdiği $T_{8.2}$ değerleri farklı her bir M_R değeri için dağıtım grafiğinde işaretlenmiş ve oluşan eğrilerin denklemleri çıkartılarak (Şekil 37 ile Şekil 50 arası) tekerlek izinde oturma transfer denklemi için katsayı önerisinde bulunulmuştur.



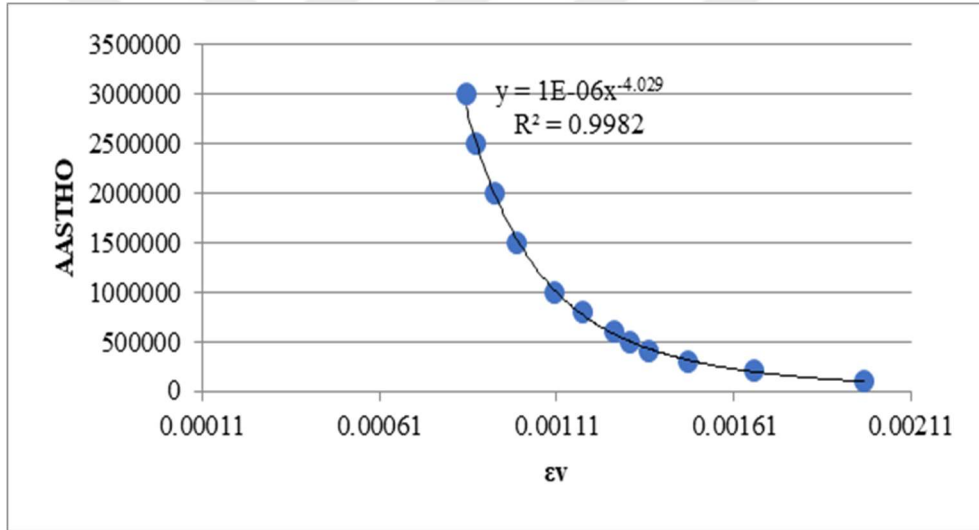
Şekil 37. $\epsilon_v - T_{8.2}$ eğrileri ve denklem katsayıları ($M_R=2000$ psi)



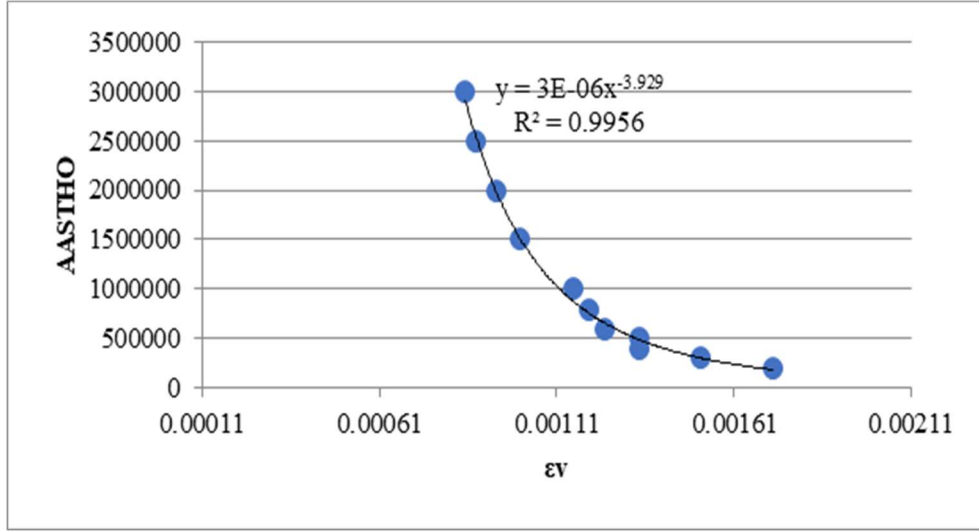
Şekil 38. $\epsilon_v - T_{8.2}$ eğrileri ve denklem katsayıları ($M_R=3000$ psi)



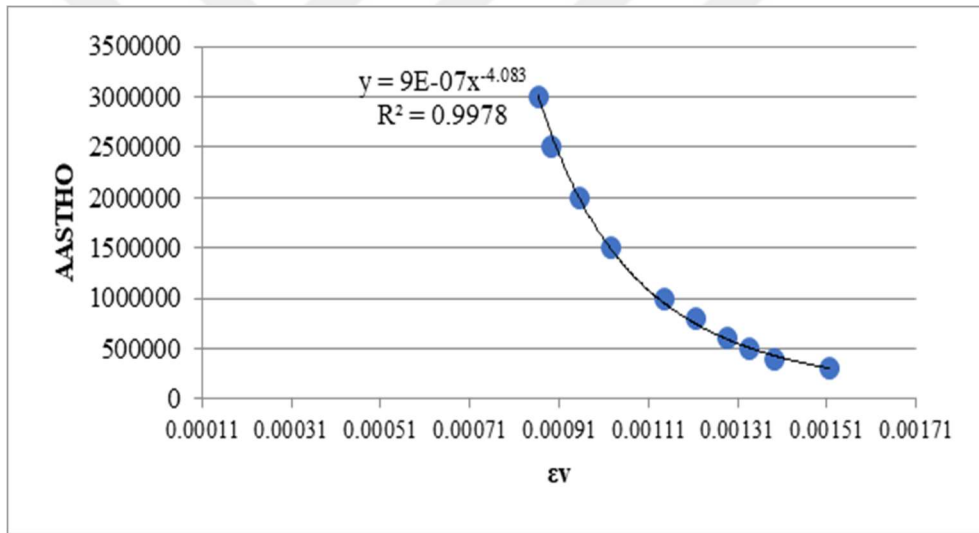
Şekil 39. $\epsilon_v - T_{8.2}$ eğrileri ve denklem katsayıları ($M_R = 4000$ psi)



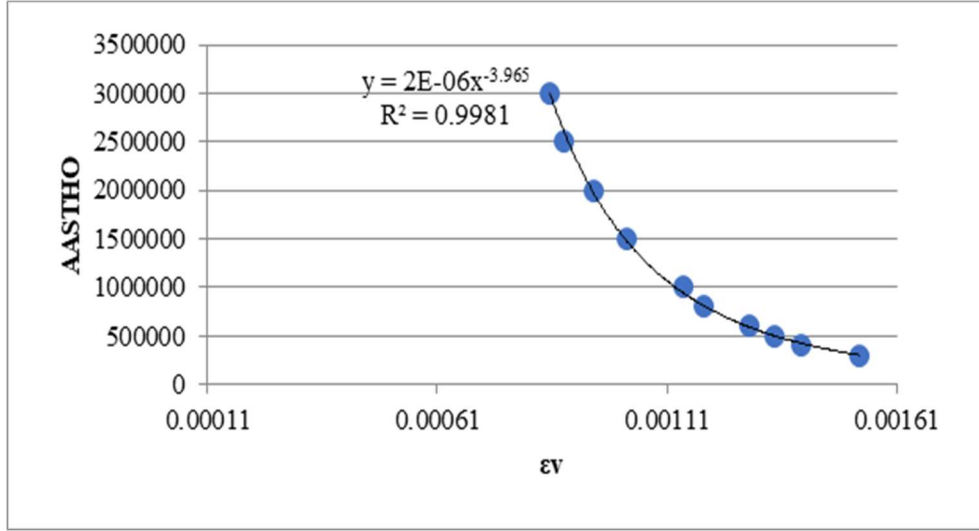
Şekil 40. $\epsilon_v - T_{8.2}$ eğrileri ve denklem katsayıları ($M_R = 5000$ psi)



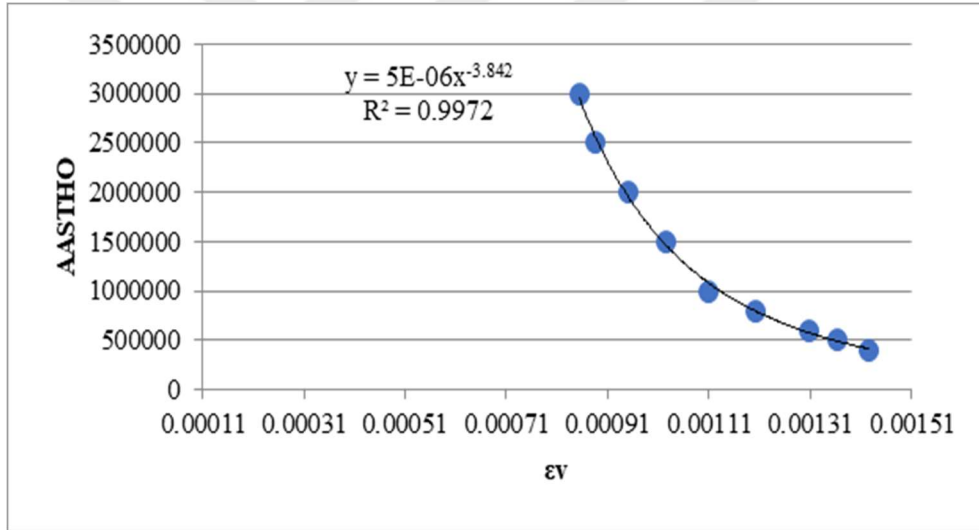
Şekil 41. $\epsilon_v - T_{8.2}$ eğrileri ve denklem katsayıları($M_R=6000$ psi)



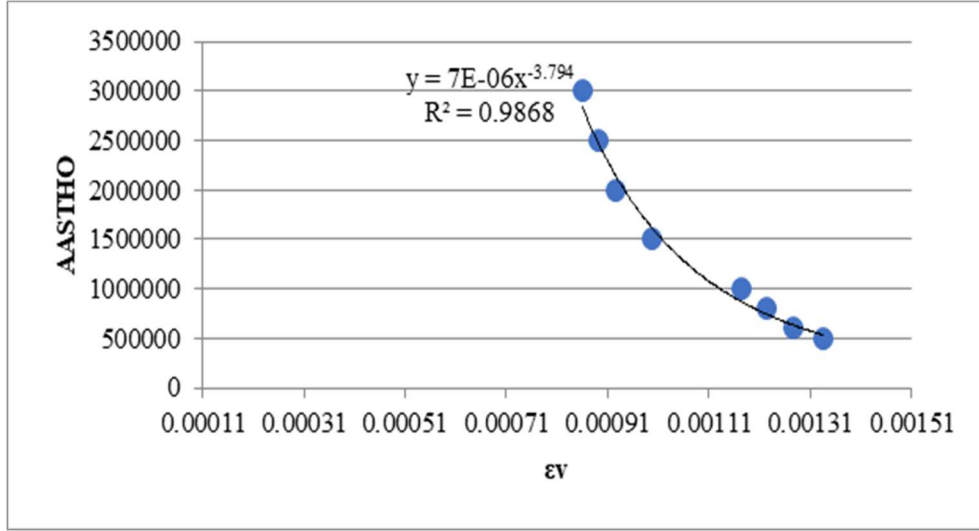
Şekil 42. $\epsilon_v - T_{8.2}$ eğrileri ve denklem katsayıları($M_R=7000$ psi)



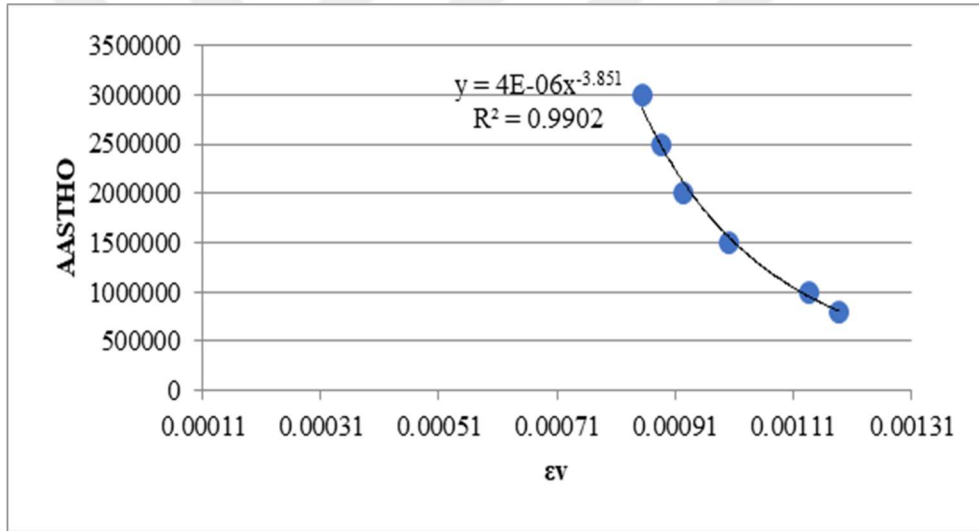
Şekil 43. $\epsilon_v - T_{8.2}$ eğrileri ve denklem katsayıları($M_R=8000$ psi)



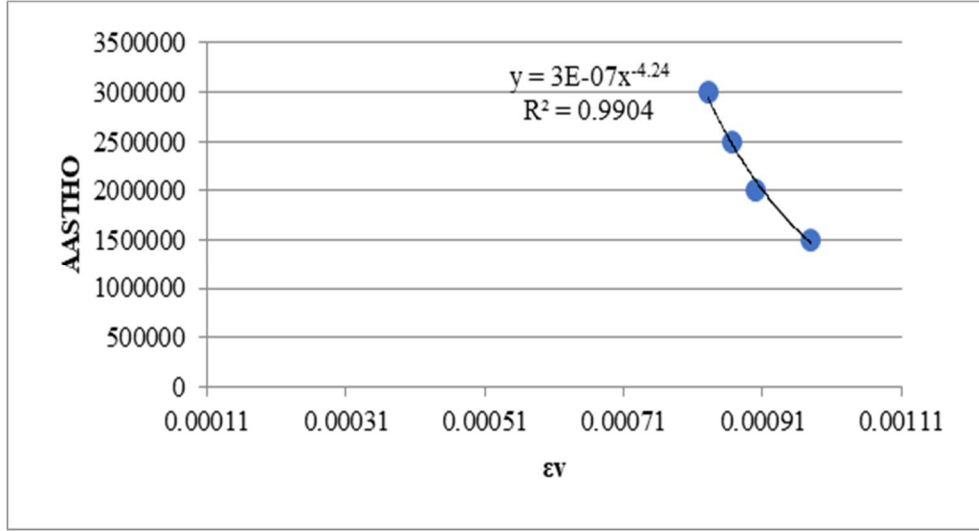
Şekil 44. $\epsilon_v - T_{8.2}$ eğrileri ve denklem katsayıları($M_R=9000$ psi)



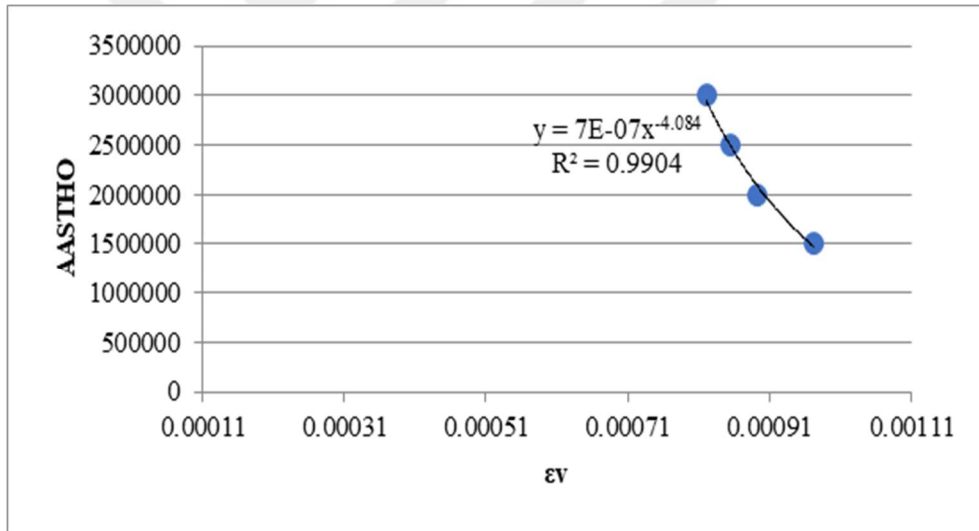
Şekil 45. $\epsilon_v - T_{8.2}$ eğrileri ve denklem katsayıları($M_R=10000$ psi)



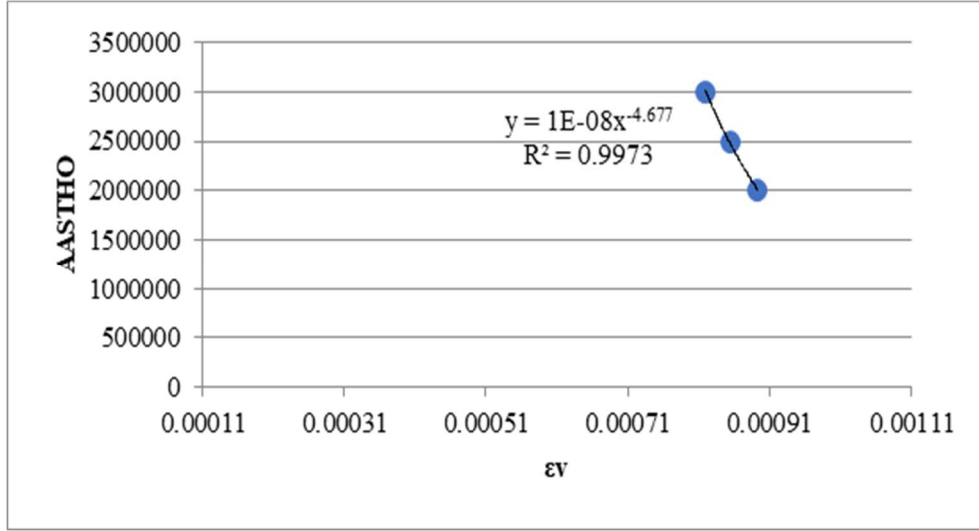
Şekil 46. $\epsilon_v - T_{8.2}$ eğrileri ve denklem katsayıları($M_R=12000$ psi)



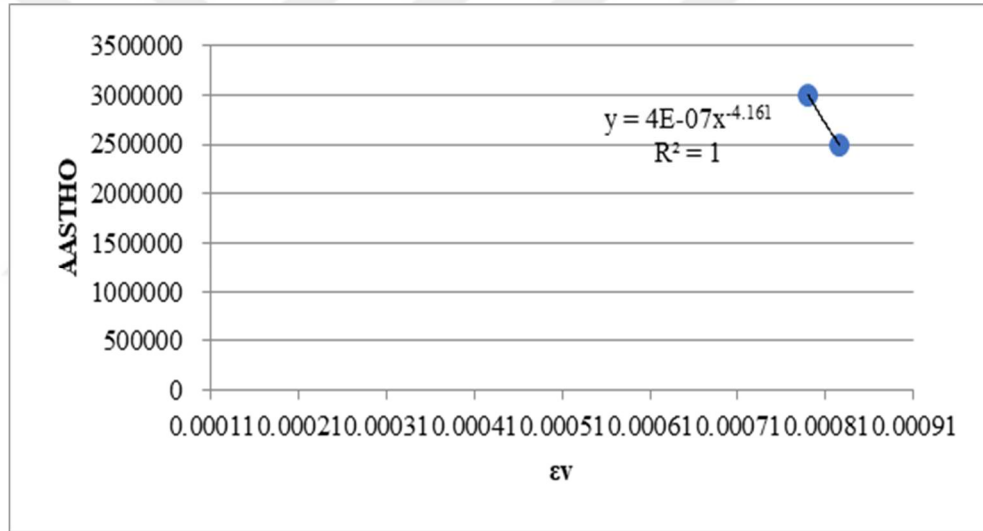
Şekil 47. $\epsilon_v - T_{8.2}$ eğrileri ve denklem katsayıları ($M_R = 14000$ psi)



Şekil 48. $\epsilon_v - T_{8.2}$ eğrileri ve denklem katsayıları ($M_R = 16000$ psi)



Şekil 49. $\epsilon_v - T_{8.2}$ eğrileri ve denklem katsayıları ($M_R = 18000$)



Şekil 50. $\epsilon_v - T_{8.2}$ eğrileri ve denklem katsayıları ($M_R = 20000$ psi)

Şekil 37 ile Şekil 50 arasında verilen eğri denklemleri kullanılarak elde edilen f_4 ve f_5 katsayıları Tablo 9’de verilmiştir.

Tablo 9. Önerilen f_4 ve f_5 katsayıları

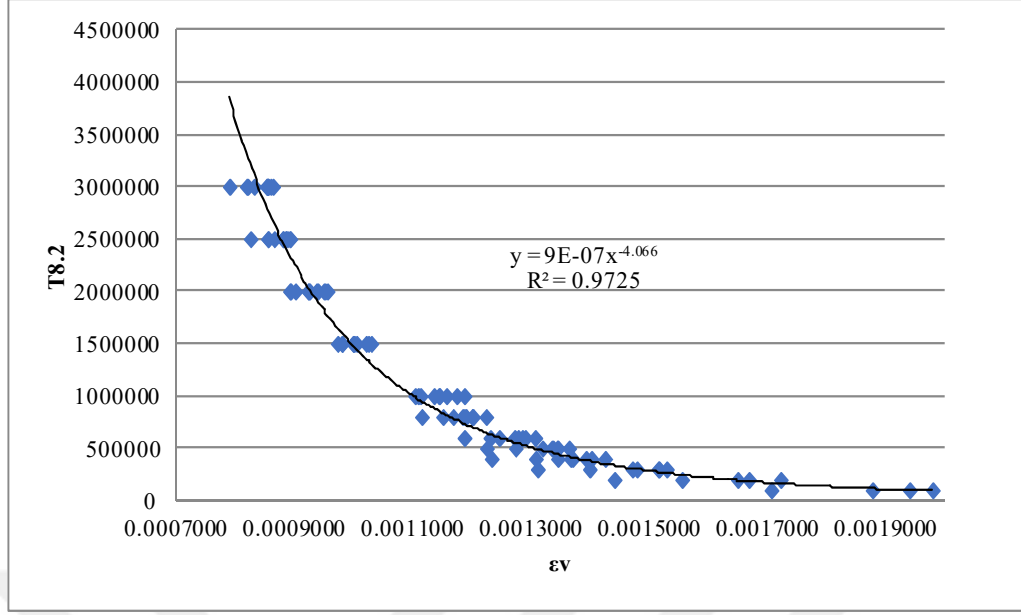
Taban Zemini M_R değeri (psi)	f_4	f_5
2000	2E-07	4.247
3000	2E-07	4.254
4000	1E-06	4.005

5000	1E-06	4.029
6000	3E-06	3.929
7000	9E-07	4.083
8000	2E-06	3.965
9000	5 E-06	3.842
10000	7E-06	3.794
12000	4E-06	3.851
14000	3E-07	4.24
16000	7E-07	4.084
18000	1E-08	4.677
20000	4E-07	4.161
ORTALAMA	1.48E-06	4.080

Tablo 9’da her bir farklı taban zemini M_R değeri için f_4 ve f_5 katsayıları elde edilmiştir. Ancak kullanımda her bir M_R değeri için ayrı katsayılarla çalışmak pratik olmayacağı için Tablo 9’de verilen değerlerin ortalaması hesaplanarak genel bir N_r eşitliği (7) elde edilmiştir. Bununla birlikte Tablo 9’un oluşturulması için kullanılan tüm ε_v - $T_{8.2}$ değer çiftleri tek bir dağıtım grafiğinde (Şekil 51) birleştirilerek tüm noktaları temsil eden eğri denklemi çıkarılmıştır Eşitlik (8).

$$N_r = 1.48E-06(\varepsilon_v)^{-4.080} \quad (7)$$

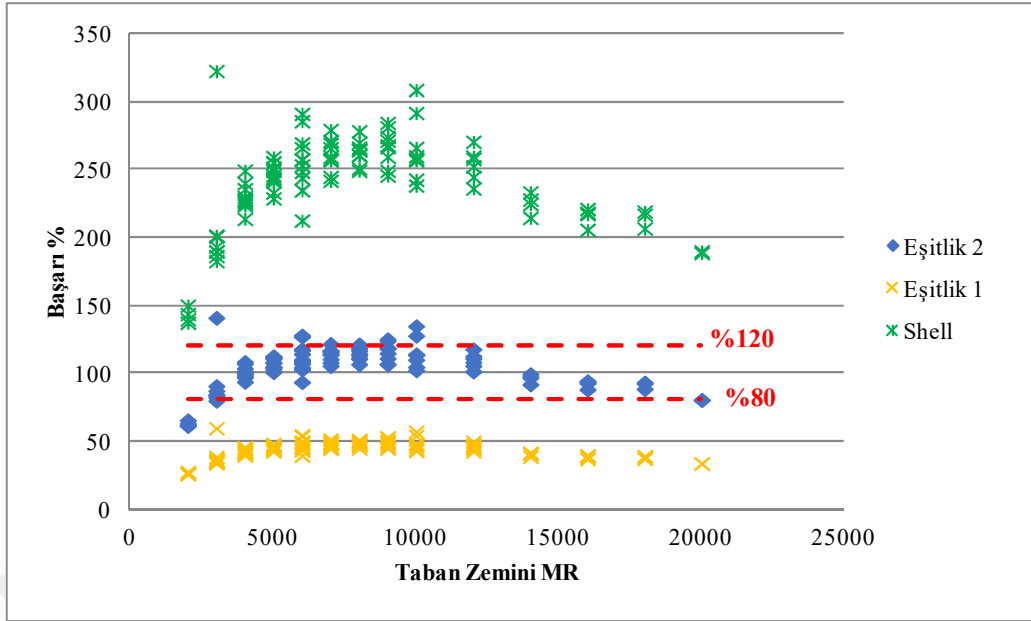
$$N_r = 9E-07(\varepsilon_v)^{-4.066} \quad (8)$$



Şekil 51. Tüm ϵ_v - $T_{8.2}$ değer çiftleri için elde edilen dağıtım grafiği

AASHTO tasarım abağında yer alan $T_{8.2}$ değerleri, (7), (8) ve Shell denklemleri ile elde edilen N_r değerlerine oranlanarak elde edilen başarı oranları (%) Şekil 52’de verilmiştir.

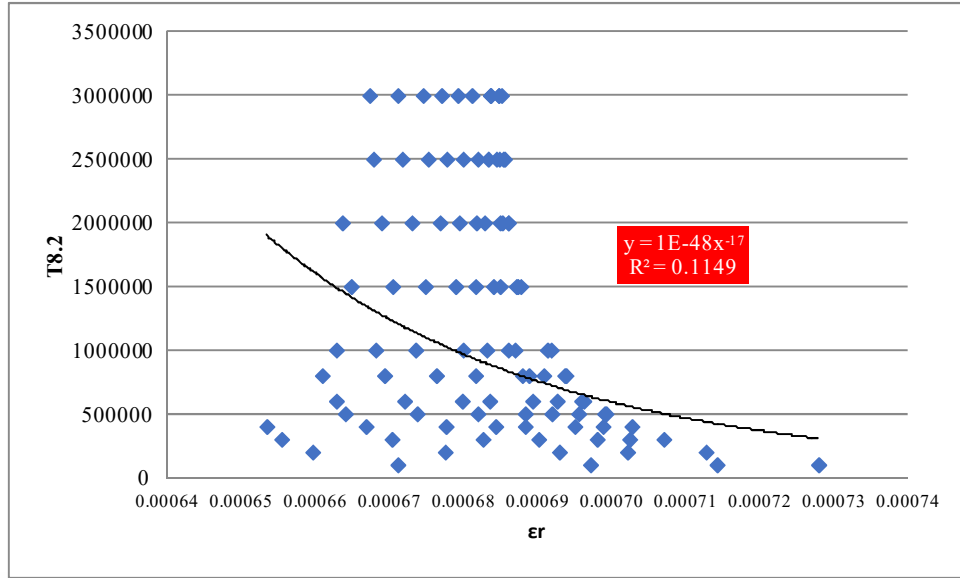
Şekil 52 incelendiğinde Eşitlik (7) ile elde edilen N_r değerlerinin AASHTO $T_{8.2}$ değerlerinden daha yüksek olduğu (Başarı oranları %100’ün altında), Shell yöntemi sonuçlarının ise AASHTO değerlerinden düşük (Başarı oranları %100’ün üstünde) olduğu görülmektedir. Eşitlik (8) ile elde edilen N_r değerlerinin ise %100’e yakın başarı sağladığı görülmektedir. Eşitlik (8) ile elde edilen 101 adet N_r değerinin 88 tanesinin (%87) %100±20 tolerans aralığında yer aldığı görülmektedir. Eşitlik (7) ile elde edilen N_r değerlerinin başarı oranı yaklaşık %50 olarak elde edilirken Shell yönteminin başarı oranları %150-300 aralığında değişmektedir.



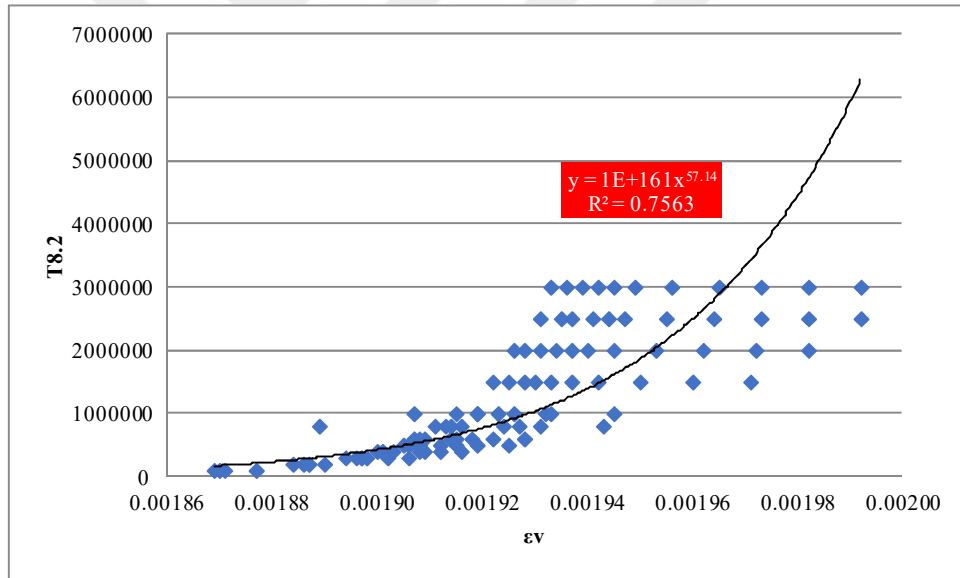
Şekil 52. Başarı oranları

Çalışmanın diğer aşamasında mekanik tepki değeri okunan ZC1 ve ZC2 noktalarından elde edilen birim şekil değiştirme değerlerinin yol ömrü ile ilişkileri analiz edilmiştir. Bu amaçla ZC1 noktasındaki yatay birim şekil değiştirme değerlerinin (ϵ_r) yorulmaya bağlı yol ömrü ile ZC2 noktasındaki düşey birim şekil değiştirme değerlerinin de tekerlek izinde oturmaya bağlı yol ömrü ile ilişkilendirilebileceği öngörülmüştür.

İlgili birim şekil değiştirme değerlerinin $T_{8.2}$ değerleri ile anlamlı bir ilişkilerinin bulunup bulunmadığını belirlemek için tüm analiz kesitlerinden elde edilen birim şekil değiştirme değerleri ile $T_{8.2}$ değerleri dağıtım grafiği ile gösterilmiştir (Şekil 53 ve Şekil 54).



Şekil 53. ZC1 noktasındaki ϵ_r değerleri ile $T_{8.2}$ ilişkisi



Şekil 54. ZC2 noktasındaki ϵ_v değerleri ile $T_{8.2}$ ilişkisi

Şekil 53 ve Şekil 54 değerlendirildiğinde mekanik tepki değerlerinin AASHTO $T_{8.2}$ değerleri ile uyumunun yetersiz olduğu görülmektedir. Özellikle ZC1 noktasındaki ϵ_r değerleri için R^2 değeri 0.1149 olarak elde edilmiştir. Bu durumda yol ömrü değerleri ile mekanik tepkiler arasında bağ kuran bir eşitliğin ortaya konulması mümkün değildir.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

AASHTO yönteminin, eşdeğer standart dingil yükü ve taban zemini M_R değerlerine bağlı olarak önerdiği sathi kaplama en kesitlerinin mekanistik ampirik yöntemle değerlendirildiği bu çalışmadan elde edilen bulgulara bağlı olarak aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir;

- Sathi kaplama tasarımında AASHTO yöntemi tarafından önerilen kesitlerin yol ömrü değerleri ile M-A yöntem ile elde edilen yol ömrü değerlerinin kıyaslanması amacıyla ampirik transfer denklemlerinden tekerlek izinde oturmaya bağlı yol ömrü modelleri (N_r) kullanılmıştır. Sathi kaplama kesitinde, belirli bir kalınlık ve rijitliğe sahip kaplama tabakası bulunmuyor olması, yorulmaya bağlı yol ömrü denklemlerinin kullanılmasını engelleyen temel faktördür.
- AASHTO yönteminin, aynı taban zemini M_R değerlerine sahip kesitlerde değişen $T_{8.2}$ değerlerine bağlı olarak önerdiği kesitler mekanik olarak analiz edildiğinde, $T_{8.2}$ değeri arttıkça kesitlerin deformasyon dirençlerinin arttığı ve taban zemini üzerindeki deformasyonların azaldığı görülmektedir. Bu sonuçlar AASHTO abağının sabit bir deformasyon amacı üzerine çalışmadığını açıkça ortaya koymaktadır. M-A tasarım yöntemleri kullanılarak sabit deformasyon için kesit öneren bir abak ortaya koyulması ilerideki çalışmalar için bir öneri olabilir.
- Aynı taban zemini M_R değerlerine sahip kesitlerde özellikle $T_{8.2}$ değerinin 2.000.000 ve üzerinde olduğu durumlarda birim deformasyon değerlerinin 0.0009 değeri civarında sabit bir değere yaklaştığı söylenebilir.
- AASHTO yöntemi kesitlerinin yol ömrü değerleri ile tekerlek izinde oturmaya bağlı transfer denklemlerinin yol ömrü değerleri kıyaslandığında AASHTO yöntemine en yakın sonuç veren transfer denklemlerinin Shell ve TRRL yöntemleri olduğu görülmektedir. Shell yönteminde yalnızca M_R değerinin 2000 psi olduğu durumlar için AASHTO yöntemine yakınlık oranı %65-75 aralığında iken taban zemini M_R değerleri arttıkça yakınlık oranı değerleri %45 seviyesine düşmüştür. TRRL yöntemi ile elde edilen sonuçların AASHTO yöntemine yakınlık oranı değerleri en fazla %27 seviyesinde elde edilirken M_R değerlerinin artışına bağlı olarak yakınlık değerleri %12-16 aralığına düşmüştür.

- Tekerlek izinde oturmaya bağı transfer denklemlerinin AASHTO yöntemi ile uyumlarının kısıtlı olması sebebiyle mevcut çalışmada taban zemini üzerindeki düşey birim şekil değiştirme değerleri ile AASHTO abağından elde edilen $T_{8.2}$ değerleri farklı M_R değerleri için dağıtım grafiğinde eşleştirilmiş ve grafik denklemlerinden f_4 ve f_5 katsayıları elde edilmiştir. Farklı M_R değerleri için elde edilen tüm f_4 ve f_5 değerlerinin ortalaması alınarak elde edilen f_4 ve f_5 değerlerinin AASHTO yöntemine yakınlık oranları %50 seviyesinde elde edilmiştir.
- Bu çalışmada analiz edilen tüm kesitler için çizilen $\varepsilon_v - T_{8.2}$ grafiğinden elde edilen f_4 ve f_5 katsayılarının ($9E-07$ ve 4.066) AASHTO yöntemine yakınlık oranları %80-%120 aralığında yüksek bir yakınlık seviyesinde elde edilmiştir. Bu bulgulara göre $9E-07$ ve 4.066 katsayılarını kullanarak elde edilen sathi kaplama yol ömrü değerlerinin AASHTO yöntemini yüksek doğrulukla temsil ettiği ve farklı malzeme, dingil yükü, temas basıncı ve iklimsel koşullar için elde edilecek mekanistik sonuçların bu katsayılar ile yol ömrüne dönüştürülerek tasarımda başarı ile kullanılabileceği ortaya koyulmuştur.

5. KAYNAKLAR

- Abubeker, A., & Sigurdur, E. (2016). Viscoelastic response modelling of a pavement under moving load. *Transportation Research Procedia*, 14(748-757).
- Abut, Y. (2022). Sathi Kaplamalı Üstyapı Tasarımında Mekanistik Yaklaşım. *4th International Conference on Applied Engineering and Natural Sciences*. Konya.
- Adhikari, S., Shen, S., & You, Z. (2009). Evaluation of Fatigue Models of Hot-Mix Asphalt through Laboratory Testing. *Transportation Research Record*, 2127(1), s. 36-42.
- Aguib, A. (2013). *Flexible Pavement Design AASHTO 1993 vs. Mechanistic-Empirical Pavement Design*. Master of Science, The American University in Cairo, School of Sciences and Engineering. Cairo.
- Ahmed, A., & Erlingsson, S. (2016). Viscoelastic Response Modelling of a Pavement under Moving Load. *Transportation Research Procedia*, 14, s. 748-757.
- Alhasan, A., Ali, A., Offenbacher, D., Smadi, O., & Lewis-Beck, C. (2018). Incorporating spatial variability of pavement foundation layers stiffness in reliability-based mechanistic-empirical pavement performance prediction. *Transportation Geotechnics*, 17, s. 1-13.
- Alla Abd, E. (2006). The rational use of finite element method in the analysis of flexible pavements. 34, 1185-1211.
- Armağan, K. (2019). *Karayolunun AASHTO Metoduna Göre Tasarımı ve Türkiye Kalibrasyonu*. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora Tezi, Eskişehir.
- Aşma, Ö. (2022). *Sathi Kaplamalarda Asfalt Ve Mermer Atığı Malzemelerin Kullanımının Araştırılması*. Şeyhedeali Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Bilecik.
- Behiry, A. E.-M. (2012). Fatigue and rutting lives in flexible pavement. *Ain Shams Engineering Journal*, 3(4), s. 367-374.
- Bostancıoğlu, M. (2020). AASHTO-93 Yönteminin Mekanistik Ampirik Tasarım Yöntemleri İle Uyumunun Belirlenmesi. 9(2), s. 64-75.
- Bostancıoğlu, M. (2021). Mekanistik ampirik esnek üstyapı tasarım modellerinin tabaka kalınlık ve rijitlik oranlarına bağlı olarak karşılaştırılması. (G. Ü. Dergisi, Dü.) 11(1), s. 91-102.
- Boşnak, M. (2023). *Esnek Üstyapıların Servis Ömrüne Etki Eden Parametrelerin Belirlenmesi*. Mersin Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Mersin.

- Carvalho, R. L., & Schwartz, C. W. (2006). Comparisons of flexible pavement designs - AASHTO empirical versus NCHRP project 1-37A mechanistic-empirical. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research*, 1947, s. 167-174.
- Chegenizadeh, A., Keramatikerman, M., & Nikraz, H. (2016). Flexible pavement modelling using Kenlayer. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 21(7), s. 2467-2479.
- Chen, Y. (2009). *Viscoelastic modeling of flexible pavement*. Doctor of Philosophy, The Graduate Faculty of The University of Akron, Ohio.
- Choudhary, D. K., & Joshi, Y. P. (2014, June). A Detailed Study of Cbr Method for Flexible Pavement Design. 4, s. 239-253.
- Çetin, S. (2012). *Sathi Kaplamalarda Meydana Gelen Bozulmaların Görüntü İşleme Yöntemiyle Analizi*. Isparta Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora Tezi, Isparta.
- David, W. (2004). *Shell Bitüm El Kitabı*. İsfalt.
- Dede, H. (2023). *Farklı Kaynaktan Temin Edilen Agregaların Sathi Kaplama Tasarım Performansına Etkilerinin İncelenmesi*. Bartın Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Bartın.
- Ekwulo, E. O., & Eme, D. B. (2009). Fatigue and rutting strain analysis of flexible pavements designed using CBR methods. (A. J. Technology, Dü.) 3(12), s. 412-421.
- Erdoğan, H. (2023). *Atık Beton Asfalt Agregasının Sathi Kaplama Performansının Değerlendirilmesi*. Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Bilecik.
- Ghanizadeh, A. R., & Ziaie, A. (2015). A Program for Nonlinear Analysis of Flexible Pavements. *International Journal of Integrated Engineering*, 7(1), s. 21-28.
- Gürer, C. (2010). *Sathi Kaplamaların Performansına Etki Eden Parametrelerin İncelenmesi Ve Performans Modeli Geliştirilmesi*. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora Tezi, Isparta.
- Hadi, M. N., & Bodhinayake, B. (2003). Non-linear finite element analysis of flexible pavements. *Advances in engineering software*, 34(11-12), s. 657-662.
- Hafeez, I., Shan, A., Ali, A., & Ahmed, I. (2017). Flexible Pavement Design Evaluation Using Mechanistic-Empirical Approaches. 22.
- Hasan, M. R., & You, J. E. (2015). Effects of mean annual temperature and mean annual precipitation on the performance of flexible pavement using ME design. *International Journal of Pavement Engineering*, 17, s. 647-658.

- Hımat, F. (2022). *Esnek Yol Kaplamalarında Görülen Bozulmaların Üstyapı Performansı Üzerine Etkileri*. Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Samsun.
- Huang, Y. H. (2004). Pavement Analysis And Design. 2, 401-409.
- KGM. (2008). *Esnek Üst Yapılar Projelendirme Rehberi*. Ankara: Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı, Üstyapı Şubesi Müdürlüğü.
- KGM. (2012). *Bitümlü Karışımlar Laboratuvarı Çalışmaları*. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara.
- KGM. (2020). *Sathi Kaplama Dizayn Rehberi*. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara.
- KGM. (2021). *Bitümlü Karışımlar Laboratuvar El Kitabı*. Üst yapı geliştirme şube müdürlüğü, Ankara.
- KGM. (2024). *Yol Ağı Bilgileri*. ocak 1, 2024 tarihinde <https://www.kgm.gov.tr/sayfalar/kgm/sitetr/kurumsal/yolagi.aspx> adresinden alındı
- Li, P., Liu, J., & Zhao, S. (2018). Implementation of stress-dependent resilient modulus of asphalt-treated base for flexible pavement design. *International Journal of Pavement Engineering*, 19(5), s. 439-446.
- Lu, P., Bratlien, A., & Tolliver, D. (2014). *Understanding Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide (MEPDG) for North Dakota Implementation*. Upper Great Plains Transportation Institute North Dakota State University, Fargo.
- Luo, Z., Karki, A., Pan, E., Abbas, A. R., Arefin, M. S., & Hu, B. (2018). Effect of uncertain material property on system reliability in mechanistic-empirical pavement design. *Construction and Building Materials*, 172(488-498).
- Mehdi Mashayekhi, A. A. (2011). *Comparison of mechanistic-empirical and empirical flexible pavement design procedures of AASHTO: A case study*. 5th International Conference Bituminous Mixtures and Pavements, Thessaloniki.
- Mokhtari, A., & Nejad, F. M. (2012). *Mechanistic approach for fiber and polymer modified SMA mixtures* (Cilt 36). Construction and Building Materials.
- Mousa, R. M., Abo-Hashema, M. A., Gadallah, A. A., & Mousa, M. R. (2015). Evaluation of pavement performance prediction models under different traffic and climatic conditions. *14th International Conference on Asphalt, Pavement Engineering, and Infrastructure*, (s. 1-19).
- Muniandy, R., & Aburkaba, E. E. (2013). Comparison of Flexible Pavement Performance Using Kenlayer and Chev PC Software Program. 7(9), 112-119.
- Muniandy, R., & Aburkaba, E. E. (2013). Comparison of Flexible Pavement Performance Using Kenlayer and Chev PC Software Program. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 7(9), 112-119.

- Özügürlü, B. (2015). *Karayolu Esnek Üstyapı Binder Tabakasında Elektrik Ark Ocağı Cürufunun Yapay Agregası Olarak Kullanımının İncelenmesi*. İstanbul teknik üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Rahma, K., Saint-Laurent, D., Horny, P., Hammoum, F., Marsac, P., & Nguyen, M. L. (2020). Effect of climate on asphalt pavement performance using two mechanistic-empirical methods. *International Journal of Pavement Engineering*, s. 1-26.
- Ratnasamy, M., Eltaher, A., & Noor, T. (2013). Comparison of Flexible Pavement Performance Using Kenlayer and Chev PC Software Program. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 7(9), 112-119.
- Roberts, N. (2009). *Asphalt Institute*.
- Sağlık, A., & Güngör, A. G. (2008). *Karayolları Esnek Üstyapı Projelendirme Rehberi*. KGM, Ankara.
- Samad, E. (2011). Sensitivity analysis in flexible pavement performance using mechanistic empirical method (Case study: Cirebon–Losari). *Civil Engineering Forum*, 20, s. 1163-1174.
- Sarkar, A. (2016). Numerical comparison of flexible pavement dynamic response under different axles. *International Journal of Pavement Engineering*, 17(5), s. 377-387.
- Şen, Y. E. (2006). *Uydu Görüntüleri Yardımıyla Yol Üst Yapısında Meydana Gelen Değişimlerin Otomatik Tespiti Ve Yol Bakım Planlaması*. Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Gebze.
- Tang, X., Stoffels, S. M., & Palomino, A. M. (2016). Mechanistic-empirical approach to characterizing permanent deformation of reinforced soft soil subgrade. *Geotextiles and Geomembranes*, 44(3), s. 429-441.
- Tunç, A. (2004). *Kaplama Mühendisliği ve Uygulamaları*. Asil Yayın Dağıtım.
- Tunç, A. (2007). *Yol Malzemeleri ve Uygulamaları*. Nobel Yayıncılık.
- Uz, V. E., Saltan, M., & Gökalp, İ. (2016). Feasibility of Using 4th Power Law in Design of Plastic Deformation Resistant Low Volume Roads. *143*, s. 961-970.
- Yoo, P., I.L.Al-Qadi, M.A.Elseifi, & I.Janajreh. (2007). *Flexible pavement responses to different loading amplitudes considering layer interface condition and lateral shear forces* (Cilt 7). *International Journal of Pavement Engineering*.
- Yönetimler, Y. (2023, Aralık 30). Yerel Yönetimler Genel Müdürlüğü: <https://yerelyonetimler.csb.gov.tr/resmi-istatistik-i-88465> adresinden alındı
- Ziari, H. (2007). Interface condition influence on prediction of flexible pavement life. *Journal of Civil Engineering and Management*, 13(1), s. 71-76.

ÖZGEÇMİŞ

Uğur HALAT, ilköğrenimini Kadı Burhaneddin İlköğretim Okulu'nda bitirdikten sonra lise eğitimini Kongre Lisesi'nde tamamladı. Cumhuriyet Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölümünde lisans eğitimine başladı. 2013 yılında bu bölümden mezun oldu. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim dalında tezli yüksek lisans programına başladı. 2015 yılında başladığı Sivas İl Özel idaresi Yol ve Ulaşım Hizmetleri Müdürlüğünde halen görev yapmaktadır. Evli ve bir kız çocuk babasıdır.

