



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



**PROJE LOJİSTİĞİ ALANINDA FAALİYET
GÖSTEREN AŞIRI YÜKLÜ/AŞIRI BÜYÜK
ARAÇLARIN KARAYOLU ÜSTYAPISINA
ETKİSİ VE KENDİNDEN TAHRİKLİ
MODÜLER TAŞIYICI (SPMT) ÖRNEĞİ**

Durmuş Ali YILMAZOK

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalını

Ekim-2019
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Durmuş Ali YILMAZOK tarafından hazırlanan "Proje Lojistiği Alanında Faaliyet Gösteren Aşırı Yüklü/Aşırı Büyük Araçların Karayolu Üstyapısına Etkisi ve Kendinden Tahrikli Modüler Taşıyıcı (SPMT) Örneği" adlı tez çalışması 25/10/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından ~~oy birliği~~ / oy çokluğu ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan
Danışman
Prof. Dr. Osman Nuri ÇELİK



Üye
Dr. Öğr. Üyesi. Yusuf Kağan DEMİR



Üye
Dr. Öğr. Üyesi. Deniz ARSLAN

(OLUNUSUZ GÖRÜŞ) / 

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Hakan KARABÖRK
LEE Müdür. V.

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.



Durmuş Ali YILMAZOK

Tarih: 25.10.2019

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

PROJE LOJİSTİĞİ ALANINDA FAALİYET GÖSTEREN AŞIRI YÜKLÜ/AŞIRI BÜYÜK ARAÇLARIN KARAYOLU ÜSTYAPISINA ETKİSİ VE KENDİNDEN TAHRİKLİ MODÜLER TAŞIYICI (SPMT) ÖRNEĞİ

Durmuş Ali YILMAZOK

Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Osman Nuri ÇELİK

2019, 121 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Osman Nuri ÇELİK
Dr. Öğr. Üyesi. Yusuf Kağan DEMİR
Dr. Öğr. Üyesi. Deniz ARSLAN

Karayolu esnek üstyapı tasarımı; mevcut trafik yükleri ve çevre koşullarında kullanılacak malzemenin özelliklerine göre esnek üstyapının kalınlığının tasarım ömrü boyunca oluşacak gerilmelere karşı koyacak şekilde tespit edilmesi esasına dayanmaktadır. Bu çalışmada, proje taşımacılığı ve lojistiği hakkında süreçlerin tanımı yapılarak proje lojistiği alanında faaliyet gösteren aşırı büyük ve aşırı yüklü taşıtların karayolu üstyapısına yaptığı etkiler incelenmiştir. Son yıllarda giderek önemi artan Özel Proje Taşımacılığı ile ilgili incelemelerde bulunularak, bu sektörde kullanılan özel araçlardan biri olan SPMT (Self-Propelled Modular Transporter/Kendinden Tahrikli Modüler Taşıyıcı) ile ilgili bilgiler verilmiştir. Alışıl gelmiş ebat ve ağırlıktaki yüklerin çok üzerinde yükleri taşımak için kullanılan bu araçların son yıllarda kullanımı giderek artmaktadır. Bu araçlar farklı şekillerde kombine edilerek her türlü ebat ve ağırlıktaki yükü taşıyabilmektedir. Örneğin bir liman vinci, devasa boyutlardaki bir gemi ya da uçak, hatta tonlarca ağırlıktaki bir bina karayolunda bir noktadan bir başka noktaya nakledilebilmektedir. Nakliye esnasında karayolu üstyapısının zarar görmemesi için karayolu üstyapı tasarımının oluşacak gerilmelere karşı koyabilecek şekilde tasarlanması gerekmektedir. Önemli bir yapının bütünsel olarak bir noktadan başka bir noktaya nakledilmesi ile ilgili örnek bir çalışma yapılmış, önemli yapının ebat ve ağırlığını taşıyabilecek kapasitedeki SPMT seçilerek, aks başına düşen ağırlık hesaplanmıştır. Daha sonra SPMT'nin Dingil Eşdeğerlik Faktörü (DEF); ülkemizde ve dünyada halen en çok kullanılan üstyapı tasarım metodu olan AASHTO 1993 tasarım yönteminin hasar formülleri kullanılarak hesaplanmıştır. Mekanik-Ampirik Tasarım Yöntemi kaplama tasarımında ampirik yöntemlere göre son yıllarda giderek daha güçlü bir metot olmaya başladığından, SPMT'nin geçtiği karayolunda aracın aks yükünün, teker arası mesafesinin ve lastik basıncının değişmesi gibi araçla ilgili faktörler ve sıcak asfaltın tabaka kalınlığı, elastisite modülü ve poisson oranının, granüler temel tabaka kalınlığının ve taban zemini esneklik modülünün değişmesi gibi yolla ilgili faktörlerde değişiklik olmasının yorulma hasarı, lastik izi hasarı ve kalıcı oturma üzerinde ne gibi etkileri olduğuna dair mekanik analizler yapılmış, diğer tüm koşullar sabit tutularak aks yükü, teker arası mesafe, lastik basıncı, sıcak asfalt tabakası özellikleri, granüler temel kalınlığı ve taban zemini dayanımının tekil olarak değişmesinin üstyapı hasarına olan etkisi incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Aşırı Yüklü/Aşırı Büyük Araç, Dingil Eşdeğerlik Faktörü (DEF), Kendinden Tahrikli Modüler Taşıyıcı (SPMT), Sonlu Elemanlar Metodu, Proje Lojistiği.

ABSTRACT

MS THESIS

THE EFFECTS OF OVERSIZED/ OVERLOADED VEHICLES WHICH IS OPERATING PROJECT LOGISTICS FIELD ON HIGHWAY FLEXIBLE PAVEMENTS AND SELF-PROPELLED MODULAR TRANSPORTER (SPMT) EXAMPLE

Durmuş Ali YILMAZOK

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
KONYA TECHNICAL UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE / IN CIVIL ENGINEERING**

Advisor: Prof.Dr. Osman Nuri ÇELİK

2019, 121 Pages

Jury

**Advisor Prof. Dr. Osman Nuri ÇELİK
Asst. Prof. Dr. Yusuf Kağan DEMİR
Asst. Prof. Dr. Deniz ARSLAN**

Highway flexible pavement design; is based on the determination of the thickness of the layers according to characteristics of material to be used in the current traffic loads and environmental conditions in a way to resist the stresses that will occur during the design life. In recent years, increasing the importance of Special Project Transport, which is one of the special tools used in this sector SPMT (Self-Propelled Modular Transporter) is given information about. These vehicles, which are used to carry loads above the usual loads of size and weight, have been increasing in recent years. These vehicles can be combined in different ways to carry loads of any size and weight. For example, a port crane, a gigantic ship or plane, or even a building with tons of weight can be transported from one point to another on the highway. In order to avoid damage to the highway superstructure during transportation, the design of the highway superstructure should be designed to withstand the stresses that may occur. An exemplary study on the transfer of an important building from one point to another is carried out, then the weight per axle of SMPT which is capable of carrying the size and weight of the important building is calculated. Then the SPMT's Equivalent Axle Load Factor (EALF); It has been calculated by using the damage formulas of AASHTO 1993 design method which is still the most widely used pavement design method in our country and in the world. Since the Mechanistic-Empirical Design Method has become an increasingly powerful method in pavement design compared to the empirical methods in recent years, on the road where SPMT passes, changes in factors related to the vehicle such as the axle load, wheel distance and tire pressure of the vehicle; changes in factors related to the road such as layer thickness, elastic modulus and poisson ratio of hot asphalt layer, granular base layer thickness and the modulus of elasticity of the subgrade impact on the fatigue damage, rutting and permanent deformation was made by comparing the mechanistic analysis. In case of all other conditions were kept constant; changing of axle load, wheel spacing, tire pressure, hot asphalt layer properties, granular base layer thickness and the modulus of elasticity of the subgrade is investigated for how impact of pavement damage.

Keywords: Equivalent Axle Load Factor, Finite Element Method, Overweight/Oversized Vehicle, Project Logistics, Self-Propelled Modular Transporter.

ÖNSÖZ

Yapılan bu çalışmada yardım ve desteklerinden dolayı sayın hocalarım Dr. Öğr. Gör. Mehmet Ali LORASOKKAY ve Prof. Dr. Osman Nuri ÇELİK'e şükranlarımı sunarım.

Durmuş Ali YILMAZOK
KONYA-2019



İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR TARAMASI.....	5
2.1. Esnek Üstyapı Tasarım Yöntemleri.....	5
2.2. Proje Lojistiği ve Aşırı Büyük/Aşırı Yüklü Araçların Karayolu Üstyapısına Etkisi:.....	8
3. ESNEK ÜSTYAPI TASARIM YÖNTEMLERİ.....	12
3.1. AASHTO 1972 Esnek Üstyapı Tasarım Yöntemi	14
3.1.1. Tasarım Yönteminin Esasları.....	15
3.1.2. Son Hizmet Yeteneği İndeksi, Pt.....	19
3.1.3. Bölge Faktörü, R.....	19
3.1.4. Üstyapı Sayısı, SN	19
3.1.5. Zemin Taşıma Değeri, S	20
3.1.6. Minimum Tabaka Kalınlıkları	23
3.2. AASHTO 1986 Esnek Üstyapı Tasarım Yöntemi.....	23
3.3. AASHTO 1993 Esnek Üstyapı Tasarım Yöntemi.....	23
3.3.1. Trafik	26
3.3.2. Güvenilirlik.....	32
3.3.3. Malzeme Özellikleri	33
3.3.4. Çevresel Etkiler.....	36
3.3.5. Drenaj.....	39
3.4. AASHTO 2002 Esnek Üstyapı Tasarım Yöntemi.....	41
3.4.1. Trafik Yükleri.....	43
3.4.2. Malzeme Özellikleri.....	43
3.4.3. Zemin Özellikleri	43
3.4.4. Drenaj.....	43
3.4.5. Tasarım Ömrü	44
4. ÖZEL PROJE TAŞIMACILIĞI VE AŞIRI YÜKLÜ/AŞIRI BÜYÜK ARAÇLARIN KARAYOLU ÜSTYAPISINA ETKİSİ.....	45
4.1. Proje Lojistiği ve Proje Taşımacılığı	45
4.2. Özel Proje Taşımacılığı ve Kendinden Tahrikli Modüler Taşıyıcı (SPMT)	46
4.2.1. SPMT Nedir?	47

4.2.2. SPMT'lerin Teknik Özellikleri.....	48
4.3. Ağır Taşıtların Karayolu Üstyapısına Etkisi.....	49
4.3.1. Kaplama Hasarına Etki Eden Araçla İlgili Faktörler.....	53
4.3.1.1. Aks Yükleri.....	54
4.3.1.2. Brüt Ağırlık.....	55
4.3.1.3. Aks Aralığı:.....	57
4.3.1.4. Statik Yük Dağılımı.....	59
4.3.1.5. Hız.....	60
4.3.1.6. Tek Aks ve Tandem Aks Süspansiyon Tipi.....	62
4.3.1.7. Araçların Manevraları.....	63
4.3.1.8. Lastik Tipi.....	64
4.3.1.9. Lastik Basıncı.....	66
4.3.2. Kaplama Hasarına Etki Eden Yol ve Çevreyle İlgili Faktörler.....	66
4.3.2.1. Aşınma Kalınlığı.....	67
4.3.2.2. Temel ve Alttemel Kalınlığı:.....	68
4.3.2.3. Taban Zemini Dayanımı:.....	68
4.3.2.4. Yüzey Sıcaklığı.....	68
4.3.2.5. Pürüzlülük.....	69
5. SPMT ÖRNEĞİ.....	71
5.1. AASHTO 1993 Tasarım Yöntemiyle Üstyapı Tasarımı Yapılması.....	73
5.1.1. Son Servis Kabiliyeti ve SN Üstyapı Sayısının Hesaplanması.....	74
5.1.2. Eşdeğer Standart Dingil Yüğü Tekerrür Sayısının Bulunması.....	80
5.2. Mekanik-Ampirik Tasarım Yöntemi Kullanılarak Üstyapı Hasarının Hesaplanması.....	81
5.2.1. SPMT'nin Aks Yükünün Karayolu Üstyapı Hasarına Olan Etkisi.....	92
5.2.2. SPMT'nin Çiftteker Arası Mesafesinin Üstyapı Hasarına Olan Etkisi.....	94
5.2.3. SPMT'nin Lastik Basıncının Üstyapı Hasarına Olan Etkisi.....	95
5.2.4. Sıcak Asfalt Tabakasının Özelliklerinin Üstyapı Hasarına Olan Etkisi.....	97
5.2.5. Granüler Temel Tabakası Kalınlığının Üstyapı Hasarına Olan Etkisi.....	100
5.2.6. Taban Zemini Esneklik Modülündeki (M_R) Değişimin Üstyapı Hasarına Olan Etkisi.....	102
6. SONUÇLAR.....	104
KAYNAKLAR.....	113
EKLER.....	116
ÖZGEÇMİŞ.....	121

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

a₁, a₂, a₃	: Tabaka Katsayıları
D₁, D₂, D₃	: Tabaka Kalınlıkları
K	: Zemin Yatak Katsayısı
M_R	: Taban Elastisite Modülü
P_t	: Son Servis Kabiliyeti İndeksi
ΔPSI	: Servis Kabiliyeti İndeksi Farkı
R	: Bölge Faktörü
S_i	: Zemin Taşıma Değeri
T_{8,2}	: 8,2 tonluk Eşdeğer Standart Tekil Dingil Yüğü Tekerrür Sayısı

Kısaltmalar

AASHTO	: American Association of State Highway and Transportation Officials
AASHO	: American Association of State Highway Officials
CBR	: Kaliforniya Taşıma Oranı
ESDY	: Eşdeğer Standart Dingil Yüğü
FHWA	: Federal Highway Administration
JPCP	: Jointed Plain Concrete Pavement
KGM	: Karayolları Genel Müdürlüğü
MEPDG	: Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide
MR	: Resilient Modulus
NCHRP	: National Cooperative Highway Research Program
PSI	: Present Serviceability Index
SEM	: Sonlu Elemanlar Metodu
SN	: Üstyapı Sayısı
SPMT	: Self-Propelled Modular Transporter
YOGT	: Yıllık Ortalama Günlük Trafığı
MAAT	: Ağırlıklı Yıllık Ortalama Hava Sıcaklığı

1. GİRİŞ

Karayolu esnek üstyapısı denilince akla bitümlü kaplama, temel, alt temel tabakaları gelmektedir. Bu tabakaların kalınlıklarının belirlenmesi yıllar içinde farklı parametrelerin önem kazanmasıyla değişkenlik göstermiştir.

Teknolojik gelişmeler ve trafik yükünün artmasıyla beraber karayolu üstyapısının da bu gelişmeler paralelinde dönüşüme uğraması kaçınılmaz olmuştur. Özellikle karayolunda seyreden aşırı yüklü araçlar karayolu üstyapısına en çok hasar veren araç grubu olarak gözükmektedir. Ülkemizde geçerli olan Karayolu Trafik Yönetmeliği'ne göre izin verilen tek dingil yükü ağırlığı 10 tondur (Anonim, 1997). İzin verilen dingil yükü ağırlığı olan 10 ton yerine karayolunda seyreden taşıtların dingil yükü ağırlığının 20 ton olması durumunda, karayolu üstyapısına verilen hasar yaklaşık 16 kat artmaktadır. Yani araçların dingil yükü ile karayolu üstyapısına verilen hasar arasında eksponansiyel bir artış söz konusudur. Aşırı yüklemeler sadece üstyapıya zarar vermekle kalmamakta, bunun yanı sıra yol güvenliğiyle ilgili ciddi sorunlara yol açmaktadır (Everett, 2015).

Aşırı yüklü veya aşırı büyük araçların karayolu esnek üstyapısında oluşturduğu hasar; araçla ilgili faktörler, kaplama ile ilgili faktörler ve çevresel faktörlerdir. Araçla ilgili en önemli faktör aracın aks yüküdür. Bunun dışında akslar arası mesafe, aracın brüt ağırlığı, aracın üzerindeki yükün akslara dağılım oranı, aracın hızı, aracın süspansiyon tipi, aracın yaptığı manevralar ve araçta kullanılan lastik tipi, araçla ilgili diğer faktörler olarak sayılmaktadır. Esnek üstyapıda hasara sebep olan diğer faktör ise kaplama ile ilgili faktörlerdir. Bunlar, bitümlü kaplama kalınlığı, temel ve alttemel tabakası kalınlığı, taban zeminin dayanımı ve yolun pürüzlülüğüdür. Bunun dışında şişme, don kabarması ve asfaltın yüzey sıcaklığı çevresel faktörler olarak sayılabilir.

Karayolu esnek üstyapıları, farklı özelliklerdeki tabakalardan oluştuğu için her tabaka farklı davranış göstermektedir. Alttemel ve temel tabakaları granüler malzemelerden oluştuğu için doğrusal olmayan elastik davranış gösterirken, bitümlü kaplama tabakasında visko-elastik davranış gösteren bitümlü karışımlar kullanılmaktadır. Karayolu üstyapısı tasarım ömrü boyunca farklı büyüklükte dingil yüklerine maruz kalır, dolayısıyla her aracın karayolu üstyapısına verdiği hasar miktarı eşit değildir.

Aşırı büyük ve aşırı yüklü taşıtlarda aks yükü ağırlığı normal nakliye araçlarının aks yüklerinin çok üstündedir. Bu durumda aşırı aks yüküne sahip özel bir taşıtın

karayolundan geçişi sırasında üstyapıya vereceği hasar yüzlerce kat fazla olabilmektedir. Bu çalışma kapsamında özel proje taşımacılığında en çok kullanılan özel amaçlı bir taşıt olan SPMT'ler (Self-Propelled Modular Transporter/Kendinden Tahrikli Modüler Taşıyıcı) incelenmiştir.

SPMT'ler sıralı büyük tekerlere sahip bir platform aracıdır. Bu araçlar, kamyonlar ve diğer nakliye araçlarıyla taşınamayan çok büyük nesnelerin taşınmasında kullanılır. Bu sebeple dingil yükleri normal nakliye araçlarına göre oldukça fazladır. Yükün durumuna göre dingil yükü 60 tona kadar çıkabilmektedir. Dolayısıyla diğer ağır taşıtlara göre karayolu üstyapısına verdiği hasar yüzlerce kat fazla olabilmektedir. SPMT'ler dünyada inşaat ve petrol endüstrisi gibi birçok endüstri sektöründe, özellikle tersane ve denizcilik sektöründe büyük petrol platformlarının taşınması, tersane şantiyelerinin kurulması, bir geminin, bir uçağın hatta bir yapının bir noktadan bir başka noktaya nakledilmesi gibi işin karayolu taşımacılığı gerektiren kısımlarında kullanılan özel araçlardır.

SPMT'ler genellikle 4-8 adet boyuna aksa sahip, her aksı birbirinden bağımsız olarak bireysel şekilde kontrol edilebilen ünitelerden oluşmaktadır. Bu üniteler yükün ebat ve ağırlığına göre kombine edilerek; arka arkaya, yan yana, T şeklinde, V şeklinde, Y şeklinde, daire şeklinde birbirine eklenerek aks sayısı artırılabilir. Aksların her biri birbirinden bağımsız olarak kontrol edilebilmekte ve 360 derece dönebilme kabiliyetine sahiptir. Kombine edilmiş bu ünitelere bir güç ünitesi bağlanarak SPMT'nin ihtiyaç duyduğu enerji bu güç ünitesinden sağlanmaktadır. SPMT'nin kontrolü ise uzaktan kumanda yardımıyla bir operatör tarafından gerçekleştirilmektedir (Scheuerle, 2019).

SPMT'ler çok gelişmiş hidrolik sisteme sahip özel araçlardır ve birçok fonksiyon bu hidrolik sistemler sayesinde sağlanabilmektedir. Örneğin, bütün akslar birbirinden bağımsız olarak kontrol edilebilmekte, tüm tekerlerin süspansiyonları da hidrolik sisteme sahip olmakla birlikte, birbirinden bağımsız olduğu için üzerinde taşıdığı yükü tamamen yatay pozisyonda tutabilmekte ve yükün tekerler arasında eşit dağılmasına yardım etmektedir. Tekerlere gelen yük değişkenlik gösterdikçe her tekere gelen hidrolik akışı düzenleyen bir sistem vardır. Aynı zamanda kaldırma sistemi ve frenleme sistemi diğer hidrolik sistemlerdir. Güç ünitesi SPMT'nin motor kısmının bulunduğu ve tüm sistemlerin çalışmasını ve yönetilmesini sağlayan bölümdür. Gövde ise, taşıyıcının yükü taşıyan temel parçası olup, yüksek dayanımına sahip yüksek performanslı kaynak

plakalarından oluşmakta ve modüler üniteyi oluşturan ana çerçeve, eğilmeye sebep olabilecek kuvvetlere karşı son derece güçlüdür (Anstertrailer, 2017).

Bu çalışmada; bir yapının bir noktadan farklı bir noktaya nakledilmesi çalışması ele alınmış olup, önemli yapının ağırlığına uygun bir SPMT sistemi seçilmiş, sonrasında seçilen bu SPMT'nin dingil yükü hesaplanmıştır. Ülkemizde ve dünyada halen en çok kullanılan üstyapı tasarım metodu olan AASHTO 1993 tasarım yönteminin hasar formülleri kullanılarak SPMT'nin Dingil Eşdeğerlik Faktörü (DEF) hesaplanmış, aracın standart yüklü araçlara göre üstyapıya verdiği hasarın boyutu daha iyi anlaşılmıştır. Son yıllarda Mekanik-ampirik metotlar kaplama tabakasıyla ilgili farklı analizler yapılabilmesine imkan tanıdığı için kullanımı giderek artmıştır. SPMT'nin geçtiği karayolunda aracın aks yükünün, teker arası mesafesinin ve lastik basıncının değişmesi gibi araçla ilgili faktörler ve sıcak asfaltın tabaka kalınlığı, elastisite modülü ve poisson oranının, granüler temel tabaka kalınlığının ve taban zemini esneklik modülünün değişmesi gibi yolla ilgili faktörlerde değişiklik olmasının; her faktörle ilgili değişikliklerin kaplama ömrü üzerindeki etkisi incelenmiştir ve kıyaslama yapılmıştır. Bunun için SPMT'nin karayolundan geçerken esnek tabaka altında oluşacak maksimum yatay çekme gerilmesi, taban zemini üstünde oluşan maksimum basınç zorlaması ve kalıcı oturmalar hesaplanmıştır. Bu metot kaplama yapısında yorulmaya sebep olan yük tekrarı sayısı, kaplama yapısında oluşan gerilmeler ve birim şekil değiştirmeler arasında ilişki kurmaktadır.

Mekanik -ampirik analizlerde Kenpave programından yararlanılmıştır. Bu program Burmister tarafından geliştirilen abaklar ve katsayılar yardımıyla iki ve üç tabakalı sistemlere ait gerilmeler ve deformasyonları hesaplayabilen bir programdır. Aynı zamanda üç tabakalı sistemlerin analizinde birçok yaklaşım mevcut olup, bu program Jones tarafından geliştirilen yaklaşımı esas almaktadır. Programın yaptığı gerilme ve birim şekil değiştirme hesabındaki sonuçlar bu yaklaşımla aynı sonuçlar vermektedir.

Mekanik -Ampirik Tasarım Metodunda; kaplama hasarını tanımlarken yorulma hasarı ve lastik izi hasarı olmak üzere iki tip yorulma çeşidi kullanılmaktadır. Aks yükleri nedeniyle yüzey tabakasının altında oluşan maksimum yatay birim şekil değiştirme, yorulma çatlağına neden olan yük tekrar sayısını belirlemek için kullanılmış olup, benzer şekilde aks yükleri nedeniyle üstyapı tabakasının altında oluşan düşey birim şekil değiştirme, lastik izi hasarına sebep olan yük tekrar sayısını belirlemek için

kullanılmıştır. Bu yük tekrar sayıları kaplamanın yorulma ömrü olarak tanımlanmaktadır (Dawid ve Piotr, 2018).

Mekanik-ampirik tasarımlarda yorulma hasarına sebep olan yük tekrar sayısı, lastik izi hasarına sebep olan yük tekrar sayısından genellikle yüksek olmaktadır. Yani lastik izi hasarına sebep olan yük tekrar sayısı genellikle daha düşük olmakla birlikte, kaplamada yorulma çatlakları oluşmadan çok daha önce lastik izi hasarı oluşmaktadır. Lastik izi hasarının oluşmasındaki en önemli faktör ise kalıcı oturmadır. Lastik izi hasarının hesaplanmasında kullanılan taban zemini üzerinde oluşan maksimum düşey basınç gerilmesi, taban zemininin dayanımı düştükçe artmaktadır. (Khanal ve ark., 2016).

Bu çalışmada üstyapı tasarımının tarihsel gelişimi üzerinde durulmuş, dünyada en çok kullanılan tasarım metodu olan AASHTO esnek üstyapı tasarım metodlarının gelişimi ve dönüşümü incelenmiştir. Aşırı yüklü/büyük araçların karayolu üstyapısına olan etkileri üzerinde durularak, bu araçlardan özel amaçlı yükleri taşımak için kullanılan SPMT'ler incelenmiştir. Önemli bir yapının bir lokasyondan farklı bir lokasyona SPMT kullanılarak nakledilmesiyle ilgili AASHTO 1993 tasarım metodu kullanılarak aracın DEF'i hesaplanmış, mekanik-ampirik tasarım metoduyla araç ve yolla ilgili faktörlerde değişiklikler yapılarak, bu değişikliklerin kaplamanın ömrü üzerindeki etkileri üzerinde mekanik analizler yapılmıştır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

2.1. Esnek Üstyapı Tasarım Yöntemleri

Baladi ve Mc Kelvey (1994), AASHTO esnek üstyapı tasarım denkleminin mekanik evrimini incelemek için farklı tabaka özellikleri, taban zemini esneklik modülü ve trafik hacmi kullanarak 243 farklı kaplama kesiti oluşturmuştur. Analizin sonucunda; AASHTO tasarım metodundaki kaplama kesitleri neredeyse eşit seviyede koruma sağlamasına rağmen, farklı tabakalara iletilen hasar miktarının her kaplama kesitinde farklı olduğunu görmüştür. Bu analiz sonucu aynı zamanda göstermiştir ki AASHTO metodu; tabaka kalınlığı ve kaplama tepkileri üzerine drenaj kalitesinin ne gibi etki ettiği hususunda açıklama getirmemiştir. Bu çalışmada AASHTO drenaj katsayısının tabaka kalınlığı ve kaplama tepkileri üzerine mekanik tabanlı bir modifikasyon prosedürü sunulmuştur.

Avcı (2006), genel olarak üstyapı tasarım yöntemlerinden bahsetmiş ve kısaca tasarım yöntemlerinin gelişimi ile ilgili bilgiler vermiştir. AASHTO 1993 tasarım yöntemi ile AASHTO 2002 tasarım yöntemini detaylı olarak inceleyerek karşılaştırmasını yapmış, her iki yöntemin olumlu ve olumsuz yönleri üzerinde incelemelerde bulunmuş, üstyapı tasarım parametrelerini etkileyen faktörler ile daha sonrasında üstyapı tasarımında kullanılan parametreler ve bozulma tiplerini açıklamıştır. Bu bozulma tiplerinin, üstyapı seçiminde ve analizinde oynadığı etkin rolü vurgulamıştır. Çalışmanın sonucunda AASHTO 2002 yönteminin, AASHTO 1993 yönteminden daha detaylı bir çalışma sonucunda elde edildiği, tasarımda esas alınan ilişkilerin gözlemlendiği deney yolunun tek bir bölgede değil, değişik bölgelerde ve uzun süreli gözlemlerin analizi sonucunda elde edildiği, AASHTO 2002 yönteminin, AASHTO 1993 yönteminden farklı olarak, tasarımcılara, değişik girdi seviyeleri, yani değişik veri setleri için, yeni yaklaşım sunarak, tasarımlarını yapmalarını sağladığı, detaylı verilerin yanında ampirik formüllerinde tasarımda kullanılmasını sağladığı sonucuna varmıştır. Diğer parametreleri sabit tutarak ağır taşıt trafiği hacmini değiştirmiş ve üstyapı kalınlığını her iki yöntem için hesaplayarak kıyaslamıştır.

Carvalho (2006), üstyapı kaplama tasarımının tarihsel gelişimi üzerinde durarak, MEPDG'nin ortaya çıkışını irdelemiştir. Çalışmasının ana amacı, farklı iklim ve trafik koşullarında MEPDG ile AASHTO 1993 tasarım yöntemini karşılaştırmak, ayrıca

MEPDG'nin veri girdileriyle duyarlılık analizi yapmaktır. Bu çalışmada en önemli veri girdileri iklim koşulları, trafik hacmi ve malzeme özellikleri olarak belirlenmiştir. Çalışmanın sonucunda, MEPDG'nin AASHTO 1993'e göre gerçek değerlere daha yakın sonuçlar verdiğini tespit etmiştir. Aynı zamanda sıcaklık koşullarını ve trafik hacmini artırıp azaltarak, malzeme özelliklerini değiştirerek iki metot arasında kıyaslamalarda bulunmuştur.

Shahji (2006), tasarım yöntemlerinin AASHTO Yol Testinden elde edilen ampirik denklemlere dayandığını, yıllar içinde trafik hacminde ve kamyon boyutlarında ciddi artışlar yaşanmasına rağmen AASHTO tasarım denkleminin, halen AASHTO Yol Testinin yapıldığı bölgenin iklim koşullarına dayanması ve tasarımda malzemelerin yaşanması konusuna değinmemesini bir eksiklik olarak görmüştür. Bu eksikliğı gidermek için AASHTO'nun 2002 yılında mekanik-ampirik yaklaşıma dayalı yeni bir tasarım rehberi çıkardığını, AASHTO Yol Testinden geliştirilen ampirik tasarım denkleminde görülen eksiklikler ve kısıtlamaların giderilmeye çalışıldığını belirtmiştir. Bu çalışmada farklı tasarım parametrelerine göre kaplama performansını anlamak için AASHTO 2002 yöntemiyle duyarlılık analizleri yapılmış, farklı miktarlardaki trafik hacmi ve malzeme kalınlıklarına göre çalışmalar yapılmıştır.

Kök ve Kuloğlu (2007), AASHTO-72 tasarım yönteminin yapısal tasarım (tabaka kalınlıkları ve cinsi) ve yükleme şartlarının (dingil yükü ve tekerrür sayısı) kaplamaya olan etkileri ve kaplama performansının yük tekerrürleri altındaki değişimi esas aldığını belirtmiştir. AASHTO-86 tasarım yönteminin ise drenaj şartlarının kaplamaya olan etkileri, kaplama performansının yük tekerrürleri ve zemindeki şişme-donma özellikleri altındaki değişimi, trafik tahminine bağlı hata risklerini azaltmak amacıyla bir güvenilirlik katsayısını da esas aldığını, her iki yöntemde de üstyapı sayısının; tabaka kalınlıkları ile çarpılan izafi mukavemet katsayılarının toplamına eşit ve büyük olması gerektiğı için bir çok kombinasyon ortaya çıktığını belirtmiştir. Üstyapıyı oluşturan tabakaların değişik eşdeğer dingil yükü sayılarına göre en ekonomik kalınlıkları, zemin taşıma gücünün üstyapı maliyetine etkisi, en uygun ve ekonomik temel, alttemel cinslerini belirleyerek, optimum çözümler içerisinde yöntemlerin, farklı üst yapı kompozisyonları verdiğini tespit edilmiştir. Ayrıca zemin taşıma gücünün zayıf olduğu durumlarda maliyet ve üstyapı kalınlığı olarak, yöntemlerin birbirine yakın sonuçlar

verdiği, zemin taşıma gücünün yüksek olduğu durumlarda ise AASHTO-86 yönteminin daha ekonomik olduğunu belirlemiştir.

Kök (2008), karayolu ve havaalanı üstyapı tasarımında kullanılan yöntemlerin üzerinde çalışma yapmış, karayolu üstyapı tasarımını sırasıyla esnek ve rijit üstyapı için, ampirik, ampirik-analitik ve analitik yöntemler başlıkları altında irdelemiş, AASHTO, Asfalt Enstitüsü ve Shell tarafından geliştirilen üstyapı tasarım yöntemlerinin esaslarını açıklamıştır. Tüm üstyapı tasarım yöntemlerinin, taban zemini ve üstyapı tabakalarının dayanımı, malzeme özelliklerini, yük ve trafik kompozisyonunu, çevresel koşulları ve tasarım ve yapım ekonomisi gibi faktörleri esas almakta olduğu, karayolu ve havaalanı üstyapı tasarımında dikkate alınan belli başlı parametrelerin aynı olduğu, ancak her bir parametrenin niceliğinin farklılık gösterdiği sonucuna varmıştır.

Fick (2010), AASHTO Yol Testi Deneyini kullanarak AASHTO'nun ampirik ve mekanik-ampirik kaplama tasarım prosedürlerinin gelişimini incelemiş, tasarlanmış trafik yükü altında kaplama tabakasının istenen performansı karşılayabileceği üstyapı kalınlığına göre AASHTO 1993 ve MEPDG yöntemlerini karşılaştırmıştır.

Aguib (2013), esnek üstyapılar için AASHTO 1993 tasarım rehberi ile mekanik-ampirik kaplama tasarımını (MEPDG) karşılaştırarak, MEPDG'nin çevresel koşullar ve kaplama performansına göre malzeme özelliklerinin seçimi ve kaplama davranışının hesaplanması hususlarında daha kapsamlı bir tasarım yöntemi olduğu sonucuna varmış, AASHTO 1993'ün ampirik tasarım eksiklikleri üzerinde durmuştur. Ayrıca, AASHTO 1993'ün tasarım ömrünün sonuna kadar aynı şekilde sonuç vermediği, aşırı fazla kaplama tabakası kalınlığı tahmininde bulunduğu, MEPDG'nin daha ekonomik ve maliyet etkin bir tasarım yöntemi olduğu sonucuna varılmıştır.

Boone (2013), AASHTO yol testinde gözlemlenen koşulların sınırlı aralıkta olduğundan hareket ederek, Amerika'da ve Kanada'da yaygın olarak kullanılmakta olan AASHTO 1993 tasarım yönteminin önemli eksikliklerine dikkat çekmiş, bu eksiklikleri tamamlayan tasarım yönteminin MEPDG olduğuna dikkat çekmiştir. Aynı iklim koşullarında ve trafik yükü altındaki bir yolda AASHTO 1993 ve MEPDG yöntemleriyle karşılaştırmalı analizler yaparak bir yol tasarımı oluşturarak iki yöntemin kıyaslamasını yapmıştır. Ayrıca her iki yöntem üstyapı tabaka kalınlığına göre kendi tasarım kriterlerini karşılayıp karşılamadığı ile ilgili karşılaştırılmıştır.

2.2. Proje Lojistiği ve Aşırı Büyük/Aşırı Yüklü Araçların Karayolu Üstyapısına Etkisi:

NHCRP (1993), ağır taşıtların karayolu üstyapısı üzerinde gerilmelere neden olduğunu, oluşan bu gerilmelerin karayolu üstyapısı üzerinde yorulma (çatlaklar) ve kalıcı deformasyona (lastik izi hasarı) yol açtığı hususları üzerinde durmuştur. Ağır taşıtların aks yükleri, akslar arasındaki mesafeleri, hızları, lastik basınçları ve süspansiyonlarının karayolu üstyapısında oluşan hasara olan katkıları hem tekil olarak hem de birbiriyle olan ilişkileri incelenmek suretiyle ele alınmış, bu faktörlerin yanında üstyapıda kullanılan tabakaların kalınlıkları, taban zemininin dayanımı, yol yüzeyinin düzgünlüğü ve sıcaklığı gibi çevresel etmenlerin de hasara olan etkileri incelenmiştir.

Prozzie (1997), aracın teker yükünün, lastiğın yarattığı temas gerilmesinin, tek veya çiftteker olmasının, tek tandem ya da tridem dingil olması gibi sebeplerin, farklı aks kombinasyonlarında lastik basıncı ve aks yüklerinin esnek üstyapı üzerinde oluşacak hasar miktarına olan katkılarını incelemiş, kaplamanın tipi, malzeme özellikleri ve çevresel koşulları da hesaba katmıştır. Yaptığı inceleme neticesinde aynı dingil yüküne sahip tandem akstaki tek dingil yükünün, tekil bir aksa göre üstyapıya daha az hasar verdiği sonucuna ulaşmıştır.

Tjan and Fung (2005), on akslı ve seksen lastiğe sahip bir treylerin 175 tonluk beton bir kirişi fabrikadan inşaat alanına nakledilmesi çalışmasını ele almış, bu treylerin esnek üstyapı üzerindeki hareketi esnasında üstyapıda oluşan maksimum gerilmeleri Everstress Programı yardımıyla hesaplamıştır. Ayrıca karayolu üstyapısı üzerinde bu treylerin hasar verici etkisini standart aks yüküne göre kıyaslamıştır. Çalışmasında farklı üstyapı kalınlıkları ve farklı taban zemini esneklik modülleri kullanarak her durum için esnek üstyapı tabanında oluşan maksimum yatay çekme gerilmesi ve taban zemini üzerinde oluşan maksimum dikey basınç zorlamalarını hesaplayarak, bununla ilgili yük tekrar sayılarını bulmuş, buradan da her durum için ayrı ayrı Eşdeğer Dingil Yüğü Faktörünü hesaplamıştır. Çalışmasının sonunda 175 tonluk treyler için Eşdeğer Dingil Yüğü Faktörünün üstyapı kalınlığı ve taban zemini esneklik modülündeki değişime göre 3.28 ile 78.44 arasında değiştiğini göstermiştir.

Erdal ve arkadaşları (2008), proje taşımacılığında sevkiyatlarda kullanılacak güzergahın seçiminin çok önemli olduğunu, karayolunda çok akslı özel araçlarla sevkiyat

yapılacağından liman, terminal kapasiteleri, geçiş yapılacak tünel, otoyol, köprü, kavşak, üst geçit yükseklikleri ve yolun taşıma kapasitesi, yol şerit sayısı ve trafik yoğunluğunun dikkat edilmesi gereken hususlar olduğuna dikkat çekmiştir. Uluslararası taşımacılık kapsamında gabari dışı kabul edilen ağır ve hacimli yükler ile tesislerin (santral, fabrika taşınması gibi) taşınması özel proje taşımacılığı olarak değerlendirilmekte, genel bir kabulle ağır yüklerin lojistiği 150 tonun üzerindeki taşımalar için kullanılmaktadır. Mevzuatta belirlenen araç azami yüklü ağırlığı ve dingil yüklerini aşacak ağırlıkta yüklerin taşınmasında uygun nitelik ve dingil sayısında araç ve araç katarının seçilmesi kaydıyla taşımacı tarafından dingil yükleri analiz hesabının yapılması gerekmektedir.

Hanlı (2009), Karayolları inşası yüksek maliyetlerde yapıldığı, artan araç sayısı, artan dingil yükleri, aşırı yüklemeler, çevresel faktörler, yapım hataları, gerekli kontrol ve bakımın yapılmamasından dolayı üstyapının; planlanan hizmet ömründen önce bozulduğuna dikkat çekmiştir. Esnek üstyapılarda oluşan bozulma türleri inceleyerek, nedenleri ve oluşumları üzerine çalışmıştır.

Örnek (2009), proje taşımacılığında sevkiyatlarda kullanılacak güzergâhın seçimi ve araçların teknik özellikleri ile ilgili bilgiler verilmiş, geçiş yapılacak tünel, otoyol, köprü, kavşak, üst geçit yükseklikleri ve ağırlık kaldırma kapasitesi, yol şerit sayısı ve trafik yoğunluğu dikkat edilmesi gereken unsurlar olduğuna dikkat çekmiş, proje taşımacılığında sevkiyat sırasında yollarda herhangi bir sıkışıklığa veya tıkanıklığa sebebiyet verilmeyecek şekilde planlama yapılmasıyla ilgili çalışma yapmıştır.

Chen ve Ark., (2012), 1,8 milyon kg'lık aşırı yüklü bir aracın karayolu esnek üstyapısını kullanmasıyla ilgili bir çalışma yapmış, bu çalışmada aracın geçişi esnasında esnek üstyapıda oluşan maksimum çekme gerilmesi ve maksimum basınç zorlamalarını hesaplayarak kaplamanın yapısal analizini yapmış ve aracın hareketi ile ilgili maliyet analizi yapmıştır. Kaplamanın yapısal analizini yaparken maksimum gerilmeleri katmanların elastik olduğu kabulüne dayanarak sonlu elemanlar metodu temelli BISAR programı vasıtasıyla hesaplamıştır. Hesaplamaları tek aks, üç aks ve beş aks şeklinde üç farklı şekilde yaparak kıyaslama yapmıştır. Aracın dingil yükünü hesaplayarak yorulma hasarı (fatigue cracking) ve lastik izi hasarı (rutting) oluşana kadar gerçekleşecek yük tekrar sayısını belirlemiştir. Aracın geçişi sonucunda kaplamada oluşan bozulma sonucu oluşan maliyeti hesaplayarak aracın geçişiyle ilgili maliyet analizi yapmıştır.

Kumar (2013), mekanik-ampirik üstyapı tasarımında yaygın olarak kullanılan Kenlayer yazılımını kullanarak kaplamanın tasarım ömrünü analiz etmiş, sıcaklık, aks yükü, yük tekrar sayısı, yüksek lastik basıncı gibi etkilerin kaplama tasarım ömrü üzerinde etkilerini incelemiştir. Yapmış olduğu analizler sonucunda; yük tekrar sayısının artmasının ve yüksek sıcaklığın kaplama yapısında sadece gerilme ve zorlamaları artırmakla kalmadığı, aynı zamanda kaplamanın tasarım ömrünü de kısalttığı sonucuna varmıştır. Aynı zamanda aşırı dingil yükü koşullarında ve kaplama kalınlığının değiştiği koşulların kaplamanın tasarım ömrüne olan etkisi üzerinde çalışmıştır.

Gupta (2014), sonlu elemanlar metodu yazılımı olan Kenlayer programı ile tasarım konfigürasyonlarını değiştirerek (tabakaların esnek modülleri, taban zemini dayanımı vs) esnek üstyapının altında oluşan kritik gerilme noktaları, taban zemini üstünde oluşan kritik basınç gerilmeleri ve düşey yüzey deformasyonlarını azaltma üzerinde çalışmıştır. Çalışmada kaplama tasarımında yüzeysel kalıcı deformasyonun çok önemli olduğu vurgulanarak, nasıl en aza indirilebileceği üzerinde durulmuştur. Taban zemini esneklik modülünün esnek üstyapılarda yüzeysel kalıcı deformasyona sebep olan ana etmen olduğu, asfalt ve temel alttemel tabakalarının esneklik modüllerinin ise daha küçük etkiye sahip olduğu sonucuna varmıştır.

Saltan ve Fındık (2014), esnek üstyapılarda üstyapıyı kullanan araçların dingil yükleri kadar araç tekerlek basınçları ve boyutlarının da etkili olduğu üzerine çalışma yapmış, yapılan bu çalışmada geniş tabanlı tek tekerli ağır taşıt dingil yüklerinin karayolu esnek üstyapılarında oluşturduğu deformasyonları sonlu elemanlar yöntemiyle belirleyerek, elde edilen değerleri çift tekerleğe sahip dingillerin oluşturduğu deformasyon değerleriyle kıyaslamıştır. Geniş tabanlı tekerlerin çiftli tekerlere göre karayolu esnek üstyapısına daha fazla zarar verdiği, bu durumda üstyapının proje ömrünün azaldığı sonucuna varmıştır.

Everett (2015), özel amaçlı taşıtların kullanımının giderek artmasının, karayolu altyapısı üzerindeki etkilerini incelemeyi amaçlamıştır. Sadece trafik yükü parametresine göre özel amaçlı bir taşıtın üstyapı üzerindeki etkisini incelediğinde; Geleneksel ampirik yaklaşımla yapılan yol üstyapı tasarımında trafik girdi parametresi olarak eşdeğer dingil yükü kullanılmaktadır. Üstyapıya gelen yük arttıkça, üstyapıda oluşan deformasyon eksponansiyel olarak artmaktadır; mesela, üstyapıya gelen yük iki katına çıkarsa, üstyapıda oluşan hasar yaklaşık on altı katına çıkmaktadır. Bu sebeple MEPDG'nin

geleneksel ampirik AASHTO tasarımına göre üstün yönleri olmasına rağmen, ampirik yöntemin standart eşdeğer dingil yükünü kullanması sebebiyle, özel amaçlı bir taşıtın üstyapıya vereceği zararı tahmin etme hususunda daha hızlı sonuç verdiğini söylemiştir.

Khanal ve ark., (2016), aşırı yüklü bir aracın hareketi ile ilgili ilkbahar ve kış mevsimi olmak üzere iki farklı iklim koşullarında sonlu elemanlar metodu kullanarak analiz yapmış, bu modelde kaplama üzerinde oluşan gerilme ve zorlamaları belirleyerek kaplama hasarını asfalt betonunda yorulma çatlakları ve taban zeminin üzerinde oluşan lastik izi hasarına sebep olacak yük tekrar sayılarını hesaplamıştır. Çalışmanın sonunda karayolu üstyapısında oluşan hasarın ilkbahar mevsiminde kış mevsimine göre üç kat fazla olduğunu belirlemiştir.

Dawid ve Piotr (2018), mekanik-ampirik tasarım metodunu kullanarak aşırı yüklü bir aracın eşdeğer dingil yükünü hesaplamıştır. Bu hesabı yaparken kaplama kalınlığı, gerilme türü, kaplamanın yeni ya da eski olduğu gibi kriterleri kullanmıştır. Araştırma sonucunda 800 tonluk aşırı yüklü bir aracın bir kez karayolundan geçişinin standart dingil yüküne sahip bir aracın geçişine göre üstyapıya 377 kat fazla hasar verdiğini tespit etmiştir. Ayrıca aşırı yüklü aracın karayolu üstyapısından geçişi sonucunda üstyapıda oluşan maksimum kalıcı oturmayı BISAR programı kullanarak hesaplamıştır.

3. ESNEK ÜSTYAPI TASARIM YÖNTEMLERİ

Kaplama kalınlığının belirlenmesi 1920'lerden önce yalnızca geçmiş tecrübelerin geliştirilmesi esasına dayanmıştır. Üstyapı tasarımı temel olarak yol tabanındaki zemini kesme çatlaklarına karşı koruma esasına göre yapılmakta olup, geçmiş projelerden elde edilen deneyimler kesme kuvvetine dayalı pek çok tasarım prosedürünün gelişiminde önemli bir rol oynamıştır (Huang, 2004).

Bunlardan biri 1929 yılında Hogentogler ve Terzaghi tarafından geliştirilen Devlet Yolları Zemin Sınıflandırma Sistemi'dir. 1929 yılında California Otoyol Departmanı CBR (Kaliforniya Taşıma Gücü) deneyini kullanarak bir metot geliştirmiştir. CBR Metodu adı verilen bu metot, malzemelerin CBR değeri ile yol tabanının kesme çatlaklarına karşı korunmasını sağlamak için gereken tabaka kalınlığı arasında ilişki kurmaktadır. Hesaplanan tabaka kalınlığı, CBR testinde kullanılan standart ufalanmış zeminin kullanılmasıyla belirlenmektedir. CBR Metodu, İkinci Dünya Savaşı esnasında orduya bağlı istihkâm sınıfı tarafından geliştirilmiş ve sonrasında en popüler tasarım metodu haline gelmiştir. 1945 yılında Otoyol Araştırma Heyeti (HRB) Devlet Yolları Zemin Sınıflandırma Sistemi'ni revize etmiştir (Schwartz & Carvalho, 2007).

CBR Metodundan sonra yol tabanı kesme çatlakları kriterlerine dayalı birçok metot geliştirilmiştir. Ancak trafik hacminin ve araç hızlarının artması, performansı ve pürüzsüzlüğü geliştirmek için yeni malzemelerin esnek üstyapılarda kullanılması sonucunda kesme çatlakları geri planda kalmaya başlamıştır (Schwartz & Carvalho, 2007).

1950'lere gelindiğinde trafik yükünün artması kaplama tasarımında daha rasyonel bir yaklaşıma ihtiyaç duyulmasına sebep olmuştur. Yol taban zeminindeki kesme kuvvetinden daha önemli faktörlerin kaplama tasarımında önem arz ettiğinin ortaya çıkması optimum kaplama dizaynı için temel oluşturmuştur. Kaplamanın bozulma oranını artıran başka yüzeysel kuvvetlerin hesaplanması sayesinde kaplama performansı kavramı ortaya çıkmış, kaplamanın servis kabiliyeti test yollarında yapılan bazı ölçümlerle tespit edilerek kaplama tasarım prosedürlerinin temelini oluşturmuştur. Kaplama dizaynının yapılmasında malzeme seçimi ve yük etkisinin hesaplanması amacıyla birçok test yolu inşa edilmiştir. Servis kabiliyetine bağlı metotlar AASHTO tarafından 1960 yılında yürütülen yol testi deneylerine bağlı olarak geliştirilerek

AASHTO tasarım rehberinin gelişiminin temelini oluşturmuş olup günümüzde en yaygın kullanılan metottur (Huang, 2004).

AASHO yol testi deneyine dayanılarak ilkinin 1961 yılında, daha sonra ise bunun devamı niteliğinde olan 1972 yılında “AASHTO Projelendirme Geçici Rehberi” yayınlanmıştır. Artan dingil yükleri, trafik hacmi ve yüksek hızlara karşı üstyapının hizmet yeteneğini sürdürebilmesi için AASHTO’nun üstyapı projelendirme yönteminde modifikasyona gitmesi kaçınılmaz olmuştur. 1972’de, ampirik yöntemi esas alan “AASHTO Üstyapı Projelendirme Rehberi”, analitik yaklaşımla geliştirilerek, 1986’da ampirik-analitik yaklaşıma dayanan “AASHTO Üstyapı Projelendirme Rehberi’nin 3. baskısı yayınlanmıştır. Bu rehberde esnek üstyapı tasarımı ile ilgili önemli değişiklikler yapılmıştır. Ampirik - Analitik yaklaşıma dayanan 1993 yılında AASHTO Tasarım Rehberi’nin gözden geçirilmiş yeni hali yayınlanmış, bununla birlikte esnek üstyapı tasarım yöntemleri konusunda herhangi bir değişikliğe gidilmemiştir. (Kök, 2008).

Kaplama performansı üzerinde iklim etkisi kadar değişen trafik yükü, malzeme özellikleri, taban zemini ve tasarım özelliklerinin de hesaba katılmasıyla tasarım prosedürlerinde büyük bir değişiklik yapılması ihtiyacı olduğu görülmüştür. NCHRP (The National Cooperative Highway Research Program) ve FHWA (The Federal Highway Administration) işbirliğiyle AASHTO Birleşik Görev Gücü (Joint Task Force on Pavements) tarafından, daha iyi bir tasarım rehberi oluşturmak için Irvine, California’da 24–26 Mart 1996’da kaplama tasarımı üzerine bir atölye çalışması yapılmıştır. Bu çalışmadaki katılımcılar Amerika Birleşik Devletleri’ndeki en iyi kaplama tasarım mühendislerinden oluşturularak, mümkün olduğunca analitik prensiplere dayalı, esaslı ve uzun vadeli bir tasarım rehberi olmasını temel alarak 2004 yılı mayıs ayında AASHTO 2002 Mekanik-Ampirik Yol Üstyapısı Tasarım Yöntemi (MEPDG) olarak açıklanmıştır (Schwartz, 2007).

Ayrıca AASHTO’nun dışında, 1964 yılında ABD’de değişik yol deneylerine dayanan ampirik bir yöntem olarak, Asfalt Enstitüsü yöntemi geliştirilmiştir. Asfalt Enstitüsü’nün, çok tabakalı elastik teoriye dayanan 1991 yılındaki yöntemi ise ampirik-analitik yaklaşım göstermektedir. 1963 yılında Shell, esnek üstyapı tasarımı ile ilgili laboratuvar deneyleri ve AASHTO Yol deneyi sonuçlarını kullanarak, analitik yaklaşıma dayanan tasarım grafikleri hazırlamıştır. Bunlar, daha sonra, 1978 yılında tasarım paketi,

malzeme özellikleri, trafik yüklemesi ve sıcaklıkla ilgili parametrelerle güncellenmiş ve 1985'te genişletilerek son halini almıştır (Kök, 2008).

Esnek yol üstyapılarının tasarımında dünyada çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemler “Analitik, Ampirik ve Analitik-Ampirik Tasarım Yöntemleri” olarak üçe ayrılabilir.

Bu çalışmada, sadece AASHTO tarafından yayınlanan tasarım yöntemlerinin gelişimi ele alınacaktır. AASHTO yol deneyi sonuçlarından yola çıkılarak hazırlanan ilk tasarım yöntemi; ampirik tasarım yöntemi olma özelliği taşıyan 1972 yılında yayınlanan AASHTO 1972 Esnek Üstyapı Tasarım Yöntemidir. Sonrasında bu tasarım yöntemi analitik yaklaşımla geliştirilerek ampirik-analitik tasarım yöntemi olan AASHTO 1986 ve AASHTO 1993 tasarım rehberleri yayınlanmıştır. Son olarak esnek üstyapıların tasarımında büyük değişikliklere gidilen AASHTO'nun 2002 yılında yayınladığı Mekanik-Ampirik tasarım yöntemleri açıklanmıştır.

3.1. AASHTO 1972 Esnek Üstyapı Tasarım Yöntemi

Ampirik tasarım yöntemleri; sadece yapılan deney sonuçlarını esas alan, doğru sonuçlar vermesi sadece deneyin yapıldığı yerdeki malzeme seçimi ve iklim koşullarını için geçerli olan geleneksel bir yöntemdir. Bu sebeple değişik bölgelerde yapılan deneyler neticesinde çıkan sonuçlar gerçekçi olmayabilir. Malzeme özelliklerinin yeterince tespit edilememesi sebebiyle, uzun yıllar bu yöntem kullanılmıştır. AASHTO 1972 Tasarım Rehberi ampirik yöntemlere örnek olarak verilebilir (Avcı, 2006).

Bu tasarım yönteminde yapısal tasarım (tabaka kalınlıkları ve cinsi) ve yükleme şartlarının (dingil yükü ve tekerrür sayısı) kaplamaya olan etkileri ve kaplama performansının yük tekerrürleri altındaki değişimi esas alınmaktadır. Kaplama kalınlığını veren formül AASHTO yol testlerindeki gözlem ve ölçümlere dayandırılarak elde edilmiştir (Kök ve Kuloğlu, 2007).

Bir kaplamanın performansı, taşıtların emniyetli ve konforlu olarak seyahat edebilmelerinin bir göstergesidir. Bu tasarım yönteminde kaplamanın performansı “servis yeteneği” kavramı ile tanımlanmaktadır. AASHTO yol testinde kaplamanın başlangıçta sahip olduğu ve belirli bir kullanım sonunda azalan servis yeteneğine göre kaplamanın performansının nasıl değiştiği saptanmaya çalışılmış ve buna göre tasarım

formülleri geliştirilmiştir. Mevcut hizmet yeteneği indeksi, PSI (Present Serviceability Index) ya da p_t , AASHTO yol deneyleri sonucunda Eşitlik 3.1'de görüldüğü gibi belirlenmiştir (Kök ve Kuloğlu, 2007).

$$PSI = 5.03 - 1.91 \log(1 + \overline{SV}) - 1.38 \overline{RD}^2 - 0.01(C + P)^{1/2} \quad (3.1)$$

Burada;

PSI veya p = Mevcut hizmet yeteneği indeksi,

\overline{SV} = Ortalama eğim değişimi (boyuna ondülasyon ölçümü) x 10^6 ,

\overline{RD} = Her iki teker izindeki ortalama derinliği, inç (cm)

C = Çatlaklar (her 1000 ft² (92,9 m²) de yorulma ve diğer tip çatlak alanı)

P = Yamalar (Her 1000 ft² (92,9 m²) de yapılan yama alanı) olarak tanımlanmıştır.

Esnek üstyapı tasarımı için hazırlanan AASHTO tasarım denklemleri; yapısal tasarım parametreleri (malzeme tipi ve tabaka kalınlıkları) ve esnek kaplamanın performansını belirleyen yüklerin (dingil yüklerinin büyüklüğü ve tekerrür sayısı) analizine dayanmaktadır (Yoder ve Witczak, 1975).

3.1.1. Tasarım Yönteminin Esasları

AASHTO yol testlerinin sonuçları trafik yükleri, malzemenin özellikleri, tabaka kalınlıkları, iklim koşulları ve zemin şartlarının etkileri regresyon analizleri ile irdelenmiştir. Esnek kaplamaların tasarımı için 1972 Tasarım rehberinde AASHTO yol deneyleri testinden geliştirilen temel eşitlikler şunlardır (Huang, 2004).

$$G_t = \beta(\log W_t - \log p) \quad (3.2)$$

Burada;

G_t = t analiz süresi sonundaki hizmet yeteneği indeksindeki kaybın, $p_t = 1,5$ (ya da $G_t = 4,2$ esnek üstyapılar için ilk servis kabiliyetini göstermektedir) alınmasına karşılık gelen toplam potansiyel kayba oranının logaritmik fonksiyonu,

W_t = t analiz süresi sonunda tekrar eden dingil yükü sayısı,

p = tasarım ve yük bileşenlerinin bir fonksiyonu olup, hizmet yeteneği indeksinin 1,5 olmasına karşılık geleceği tahmin edilen dingil yükü uygulama sayısı,

$$\beta = 0.40 + \frac{0.081(L_1 + L_2)^{3.23}}{(\overline{SN} + 1)^{5.19} L_2^{3.23}} \quad (3.3)$$

Burada;

$\beta = (p)$ 'yi (W_t)'ye bağlayan hizmet yeteneği eğrisini etkileyen tasarım ve yük değişkenlerinin bir fonksiyonu,

L_1 = tek dingil ya da bir tandem üzerindeki yük,

L_2 = dingil sayısı (tek dingil için $L_2 = 1$ ve tandem dingil için $L_2 = 2$)

$$\log p = 5,93 + 9,36 \log (\overline{SN} + 1) - 4,79 \log (L_1 + L_2) + 4,33 \log L_2 \quad (3.4)$$

Burada;

p = tasarım ve yük bileşenlerinin bir fonksiyonu olup, hizmet yeteneği indeksinin 1,5 olmasına karşılık geleceği tahmin edilen dingil yükü uygulama sayısı,

p_t = t analiz süresi sonunda hizmet yeteneği indeksi,

L_1 = tek dingil ya da bir tandem üzerindeki yük,

L_2 = dingil sayısı (tek dingil için $L_2 = 1$ ve tandem dingil için $L_2 = 2$)

\overline{SN} = kaplamanın üstyapı sayısıdır:

Yük faktörlerinin tümü standart taşıt yüklerine göre ifade edildiğinde işlem oldukça kolaylaşmaktadır. AASHTO tasarım metodu $L_1 = 18$ kips ve $L_2 = 1$ olarak eşdeğerlilik yük faktörlerini birlikte kullanmıştır. Yeni esnek üstyapı tasarımı için yol deneylerinde yapılan analizler sonucu PSI başlangıç değeri 4,2 olarak alınmıştır. Bu değer standart L_1 ve L_2 değerleri ile kullanıldığında, eşitlik aşağıdaki şekilde olmaktadır (Yoder ve Witczak, 1975).

$$\log W_{t8.2} = 9,36 \log (\overline{SN} + 1) - 0,20 + \frac{\log [(4,2 - p_t) / (4,2 - 1,5)]}{0,40 + [1094 / (\overline{SN} + 1)^{5.19}]} \quad (3.5)$$

Burada;

$W_{t8.2}$ = Proje ömrü süresince eşdeğer standart 8,2 ton (18 kips) tek dingil yükü tekrar sayısı (proje trafiği) dir.

Eşitlik 3.5, AASHTO yol deneylerinin yapıldığı taban zemini ve çevresel koşullar için temel esnek üstyapı tasarımını ifade etmektedir. Çeşitli koşullarda eşitliğin uygulanabilirliği için, eşitliğe zemin taşıma değeri (S) ve bölgesel faktör (R) dahil

edilmiştir. Taban zemini için taşıma değeri $S=3$, AASHTO yol deneylerinde zemin tiplerinin başlangıç değeri olarak kullanılmıştır. İkinci olarak, ince mıcır-taş temeller kullanılarak taşıma değeri $S=10$ oranında belirlenmiştir. Bu ilişki aşağıdaki ifadede verilmiştir:

$$\log W_{t8,2} = \log N'_{t8,2} + K(S_i - S_0) \quad (3.6)$$

Burada;

S_i = Her i durumu için zemin taşıma değeri,

S_0 = Yol deneyi koşullarındaki yükleme için zemin taşıma değeri,

$W_{t8,2}$ = i koşullarında toplam dingil yükü tekrar sayısı,

$N'_{t8,2}$ = Yol deneyi koşullarında toplam yük tatbiki,

K = Regresyon sabitidir. ($K=0,372$)

Yol deneyinin yapıldığı koşullardan farklı iklim koşullarının etkisini hesaba katmak için eşitliğe, R , bölge faktörü dahil edilmiştir. Uygulanan toplam yük, bölge faktörü ile ters orantılı olarak yazılır;

$$W_{t8,2} = N_{t8,2} \left(\frac{1}{R} \right) \quad (3.7)$$

Eşitlik 3.5'te bazı değerler yerine koyularak değişiklikler yapıldığında esnek üstyapı tasarım ifadesinin son hali;

$$\log W_{t8,2} = 9,36 \log(SN + 1) - 0,20 + \frac{\log[(4,2 - p_t)/(4,2 - 1,5)]}{0,40 + [1094/(SN + 1)^{5,19}]} + \log \frac{1}{R} + 0,372(S_i - 3,0) \quad (3.8)$$

şeklini almaktadır. Burada;

p_t = Son hizmet yeteneği indeksi,

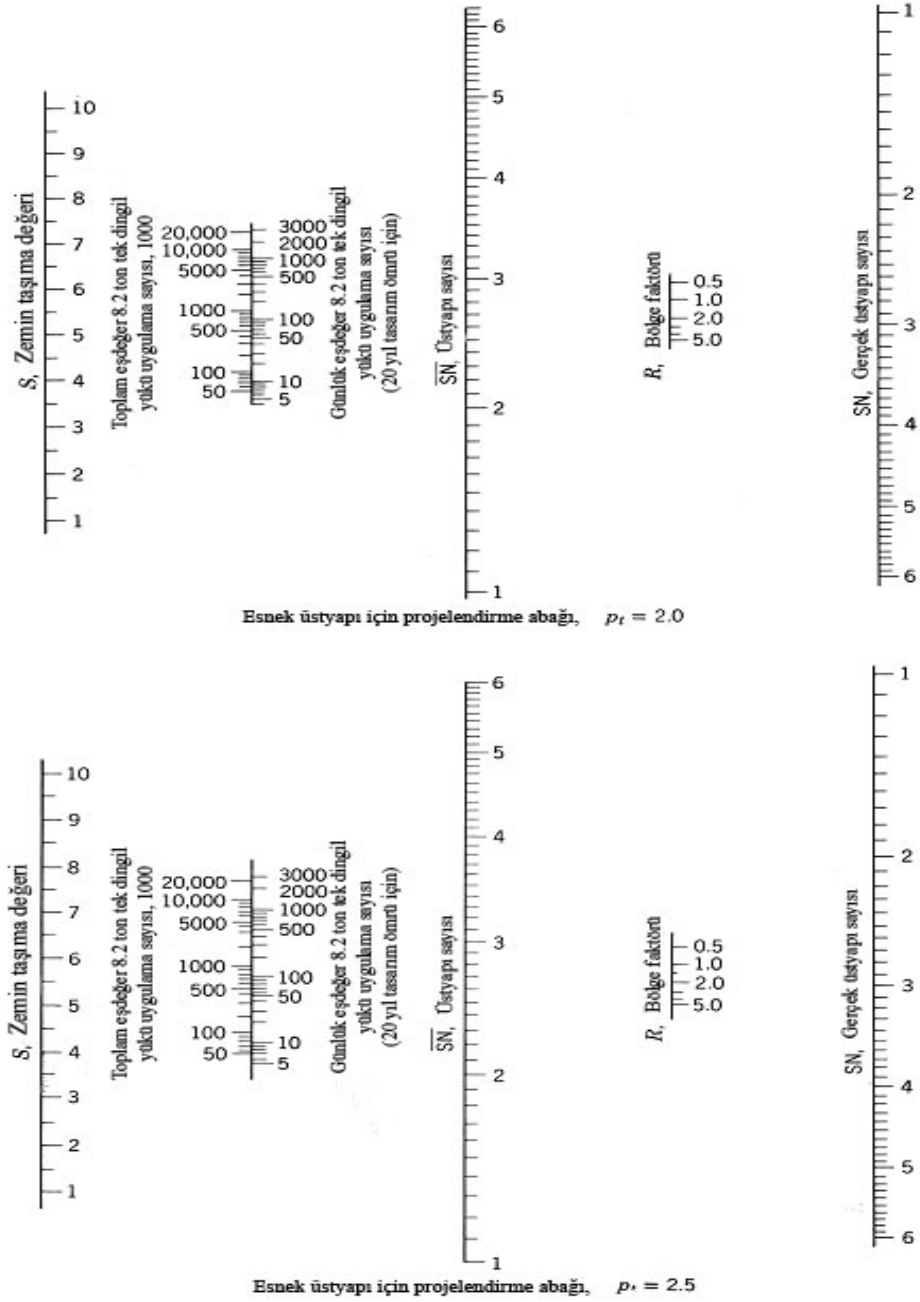
SN = Üstyapı sayısı,

R = Bölge faktörüdür.

Bu son tasarım denklemi, herhangi bir üstyapı sayısı (SN), bölge faktörü (R) ve zemin taşıma değerine (S_i) karşılık gelen, önceden tanımlı bir son hizmet yeteneği endeksine

(p_t) ulaşmak için gereken eşdeğer standart 8,2 ton (18kip) tek dingil yükü tekrar sayısını ($W_{t8,2}$) vurgulamaktadır (Yoder ve Witczak, 1975).

Şekil 3.1, eşitlik 3.8'deki son hizmet yeteneği endeksinin (p_t) 2,0 ve 2,5 değerleri için nomograf çözümünü göstermektedir. Bu çözümde öncelikle verilen bir S ve $W_{t8,2}$ değeri için \overline{SN} değeri bulunur, bu değer R bölge faktörü ile düzeltilerek gerçek üstyapı sayısı SN değeri hesaplanmaktadır.



Şekil 3.1. Esnek Üstyapı Projelendirme Abağı (AASHTO 1972)

3.1.2. Son Hizmet Yeteneği İndeksi, P_t

Son hizmet yeteneği indeksi genellikle 2,0 ve 2,5 olarak alınmaktadır. p_t trafik analiz periyodu sonunda, bir yolun yeniden takviye veya yeniden yapımı gerekmeksizin izin verilebilecek en düşük hizmet yeteneği değeridir. Ana yolların (otoyollar, ekspres yollar, devlet yolları) projelendirilmesinde p_t değeri 2,5, daha az kapasiteli yollar (il yolları) için ise, p_t değeri 2,0 olarak alınmaktadır. Genel olarak, p_t değerinin hiçbir zaman 2,0'nin altında alınmaması gerekmektedir. Tali yollar için p_t değeri 2,0 alınırken, trafik analiz süresinin azaltılması önerilmektedir (Yoder ve Witczak, 1975).

3.1.3. Bölge Faktörü, R

İklim ve çevre koşulları, AASHTO yol deneyinin yapıldığı bölgeden farklı olan yerlerde tasarım eşitliğinin uygulanabilirliği için, AASHTO projelendirme eşitliğine Bölge Faktörü (R) dahil edilmiştir. Mevcut durumda bölge faktörünün tam olarak tespit edilebilmesini sağlayan bir yöntem yoktur. Çeşitli iklim koşullarında yapılan yol deneyi sonuçlarından faydalanarak, AASHTO yönetmeliğinde tipik R değerleri verilmiştir. Bu değerler Tablo 3.1'de gösterilmiştir (Kök, 2008).

Tablo 3.1. Bölge Faktörü Değerleri

ZEMİN	R
Donmuş taban zemini (12,5 cm veya daha fazla derinlikte)	0,2-1,0
Kuru Taban zemini (yazın ve sonbaharda)	0,3-1,5
Doygun taban zemini (İlkbaharda don çözülmesinde)	4,0-5,0

3.1.4. Üstyapı Sayısı, SN

SN üstyapı sayısı, proje trafiği, zemin taşıma değeri, son hizmet yeteneği indeksi ve bölge faktöründen türetilen ve çeşitli esnek üstyapı tabakalarının kalınlıklarının belirlenmesinde kullanılacak olan izafi bir değerdir. Burada her bir üstyapı tabakası için kullanılacak malzeme tipine bağlı tabaka katsayılarına ait sabitlerin kullanımı ile SN değerinden yararlanılarak tabakaların kalınlıkları belirlenmektedir. Üstyapı tabakalarının katsayıları (a_1 , a_2 , a_3 , sırasıyla kaplama, temel ve alt temel için), SN değeri ile tabaka kalınlıkları arasındaki ampirik ifadede, uygun malzeme kompozisyonunu temsil etmektedir (Baladi ve Kelvev, 1994).

$$SN = a_1 D_1 + a_2 D_2 + a_3 D_3 \quad (3.9)$$

Burada D_i değeri farklı tabaka kalınlıklarını ifade eder.

AASHTO yol deneyinde, kırmataş, çakıl, çimento stabilize çakıl ve bitümlü stabilize olmak üzere dört tip malzeme kullanılmıştır. Farklı malzeme tipleri için, tabaka katsayıları AASHTO tasarım rehberinde Tablo 3.2'deki gibi verilmiştir. Tabaka kalınlıklarının herhangi bir kombinasyonu ve seçilen malzeme tiplerinin Eşitlik 3.9'daki SN değerini sağlaması gerekmektedir (Yoder ve Witczak, 1975).

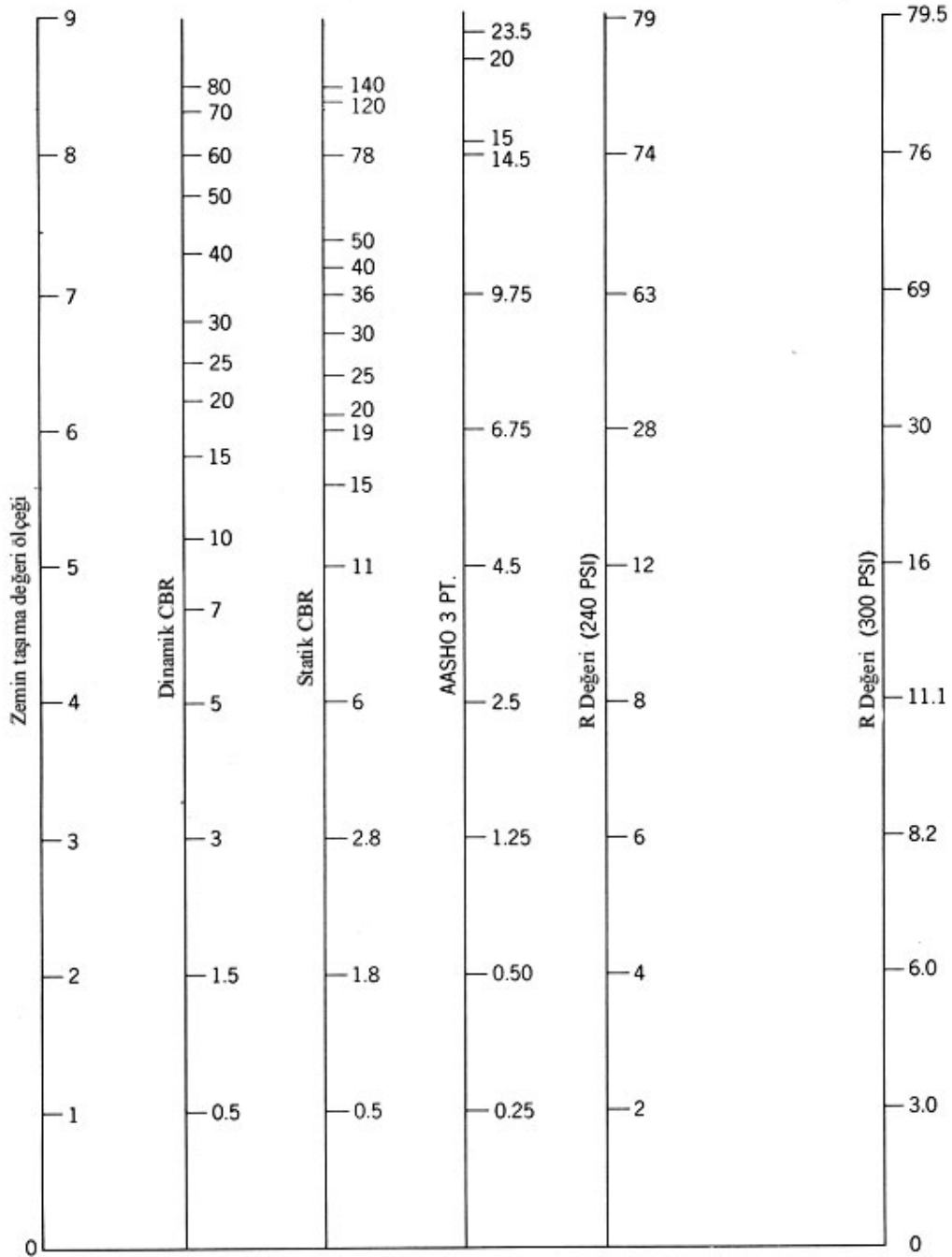
Tablo 3.2. AASHTO'ya ait Tabaka Katsayıları

ÜSTYAPI BİLEŞENİ	TABAKA KATSAYISI (A_j)
Kaplama Tabakası	
Roadmix	0,20
Plentmix	0,44
Kum asfalt	0,40
Temel Tabakası	
Kumlu çakıl	0,07
Kırmataş	0,14
Çimento Stabilize	
Basınç dayanımı	
650 psi veya fazla	0,23
400 psi, 650 psi arası	0,20
400 psi veya az	0,15
Bitümlü stabilize	
Kalın cins	0,34
Kum asfalt	0,30
Çimento stabilize	0,15-0,30
Alt temel Tabakası	
Kumlu çakıl	0,11
Kum veya kumlu kil	0,05-0,10

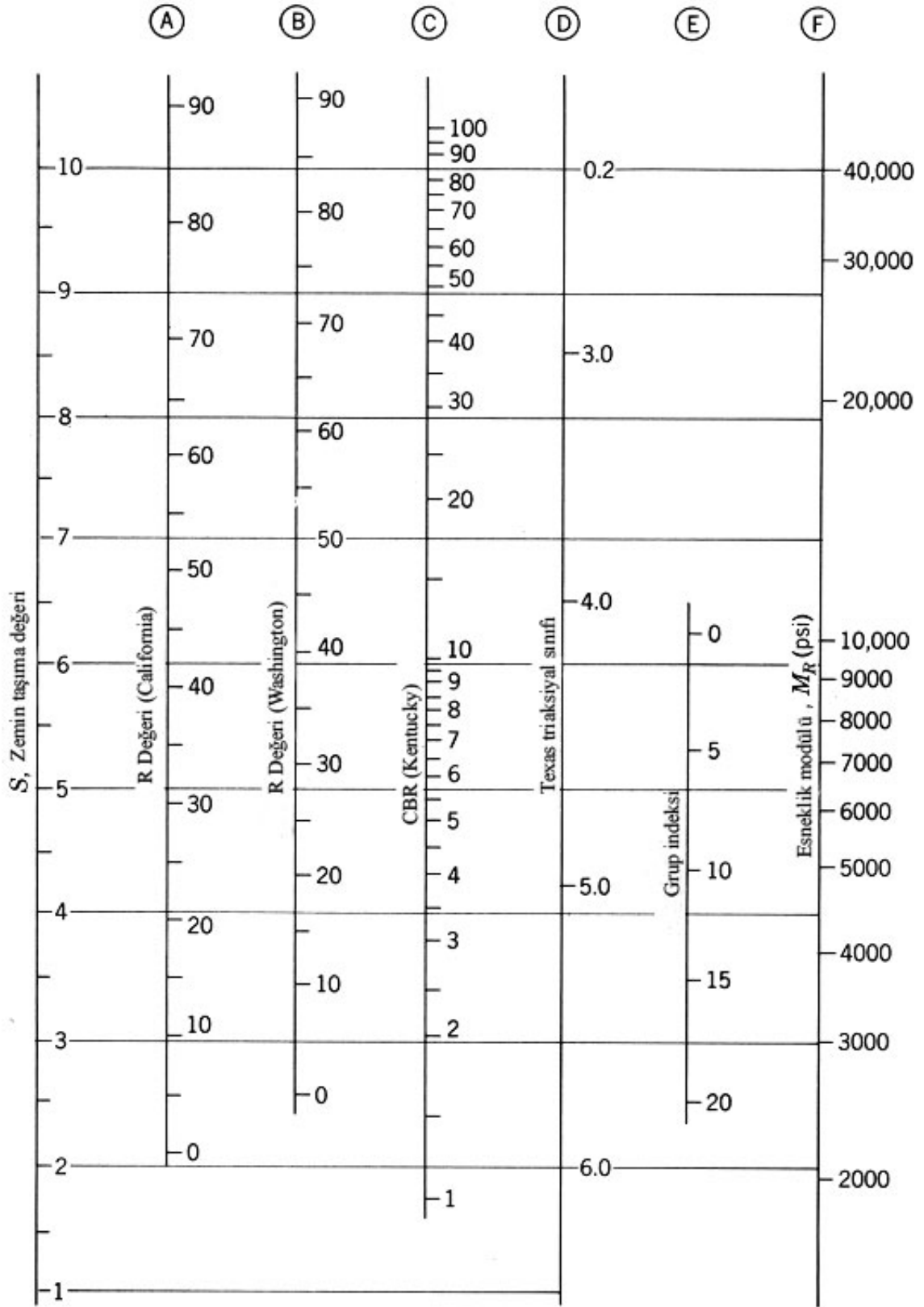
3.1.5. Zemin Taşıma Değeri, S

AASHTO Esnek Üstyapıları Projelendirme Yönteminin kaynak yayınlarında, zeminin taşıma özelliğini gösteren birçok ayrı ölçek geliştirilmiştir. Bu değer, deneyler ile doğrudan belirlenmemektedir. Her proje kuruluşu standart zemin deneyleri (CBR, R, üç-eksenli basınç deneyleri vs.) ve zemin taşıma değerinin korelasyonunu oluşturan bir yönetmelik kullanır. Şekil 3.2, Utah State Highway Department (1920) tarafından oluşturulan korelasyonu göstermektedir. Şekil 3.3 ise, NCHRP (National Cooperative Highway Research Program) 128 inç teorik tabaka analizini esas alarak geliştirdiği korelasyonu göstermektedir (Kök, 2008).

Bu iki çalışmada S değerleri için farklı sonuçların bulunması, S değerinin belirlenmesinde bir mühendislik çalışmasının yapılması gerekliliğini ortaya koymaktadır.



Şekil 3.2. Zemin Taşıma Değeri Korelasyonu (Utah State Highway Department)



Şekil 3.3. Zemin Taşıma Değeri Korelasyonu (NCHRP 128)

3.1.6. Minimum Tabaka Kalınlıkları

Önerilen minimum tabaka kalınlıkları, kaplama, temel ve alt temel için sırasıyla 2 inç (5,08 cm), 4 inç (10,16 cm) ve 4 inç (10,16 cm)'tir. Bu minimum kalınlıklar yapım ve bakımda öngörülen tasarım kriterlerinin karşılanmasına dayanmaktadır (Yoder ve Witczak, 1975).

3.2. AASHTO 1986 Esnek Üstyapı Tasarım Yöntemi

Ampirik-analitik yöntemler; trafik hacmi, dingil yükleri ve araçların hızlarında meydana gelen artışlar neticesinde analitik yöntemin ampirik bağıntılar ve performans gözlemleriyle geliştirilmesi ihtiyacı ortaya çıkmıştır. AASHTO, 1972'de yayınladığı rehberi analitik yaklaşımla geliştirerek, taban zemini taşıma gücü, trafik dingil yükleri, dingil yükü tekerrür sayısı, iklim koşulları ve üstyapıda kullanılan malzemelerin birbirlerine göre direnç özelliklerini de göz önünde bulundurularak AASHTO 1986 Üstyapı Tasarım Rehberi'ni yayınlamıştır (Avcı, 2006).

Bu tasarım yöntemi 1972 tasarım yöntemine göre daha gerçekçi yaklaşımlar getirmiştir. 1986 tasarım yönteminde zemin taşıma gücü S yerine, malzeme özelliklerinin belirlenmesini kolaylaştırmak ve rasyonel bir deney modeli oluşturmak için zemin esneklik modülü (M_R), bölgesel faktör R yerine rasyonel değerlere dayalı nem ve ısı gibi çevresel faktörler rehberde eklenerek çevre koşullarının rehberde daha rasyonel şekilde yer alması sağlanmıştır (Kök ve Kuloğlu, 2007).

Ayrıca, güvenilirlik kavramı ilavesiyle, üstyapı mühendislerinin tasarımlarına risk analizi kavramını dahil etmelerine olanak sağlanmıştır. Güvenilirlik kavramı, üstyapının hizmet yeteneğini yeterli süre koruması olasılığı veya üstyapının maruz kaldığı yükün; üstyapının minimum hizmet yeteneği değerini aşmayacak şekilde, karşı koyabileceği sınırlar dahilinde olması hali olarak açıklanabilmektedir (Kök, 2008).

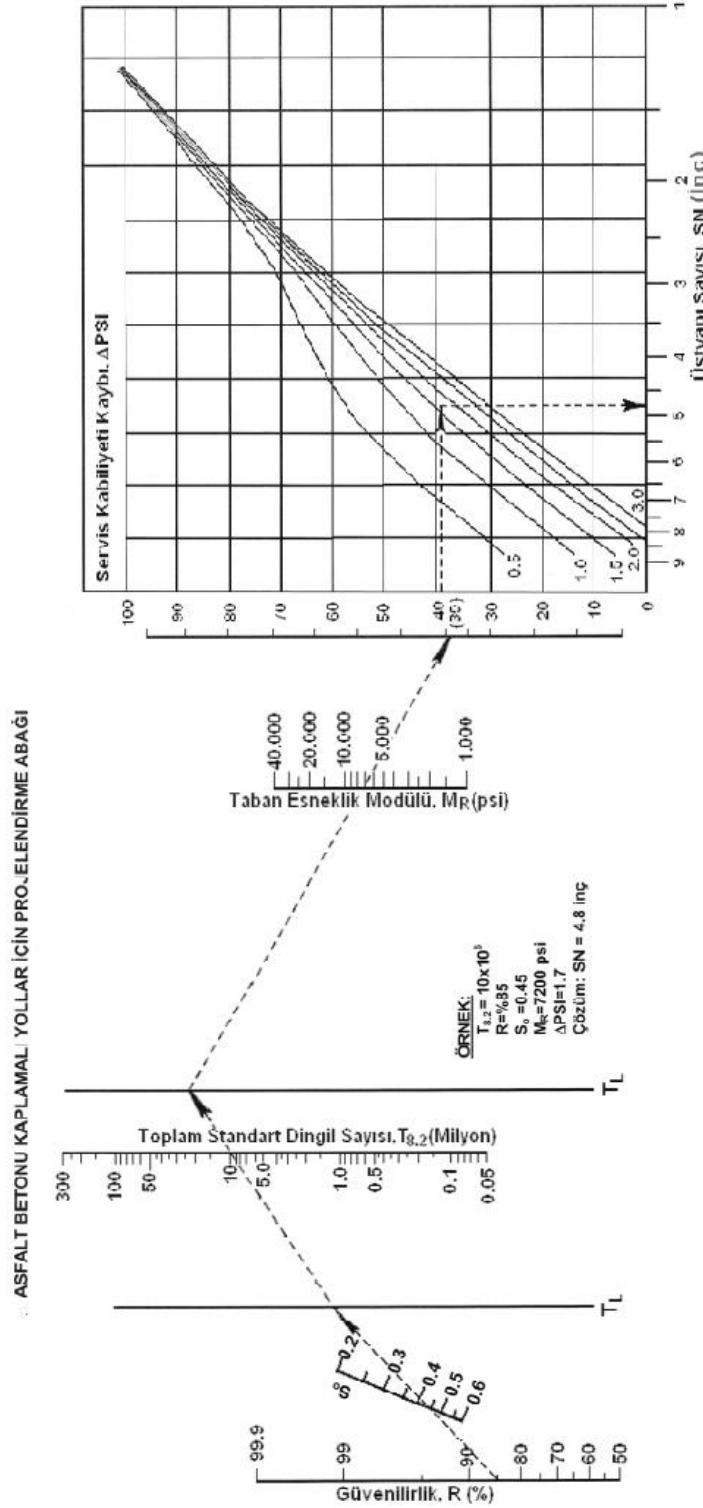
3.3. AASHTO 1993 Esnek Üstyapı Tasarım Yöntemi

AASHTO 1993 tasarım rehberinde esnek üstyapılar için tasarım denklemi;

$$\log_{10}(W_{t8.2}) = Z_R S_0 + 9,36 \log_{10}(SN + 1) - 0,20 + \frac{\log_{10} \left[\frac{\Delta PSI}{4,2 - 1,5} \right]}{0,40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5,19}}} + 2,32 \log_{10} M$$

-8,07

(3.10)



Şekil 3.4: Asfalt Betonu Kaplamalı Yollar için Projelendirme Abağı (AASHTO 1993)

Burada;

$W_{t8,2} = 8,2$ ton eşdeğer standart tek dingil yükü tekrar sayısı (proje trafiği),

$\Delta PSI = P S I$ Proje hizmet yeteneği kaybı,

$Z_R =$ Standart normal sapma,

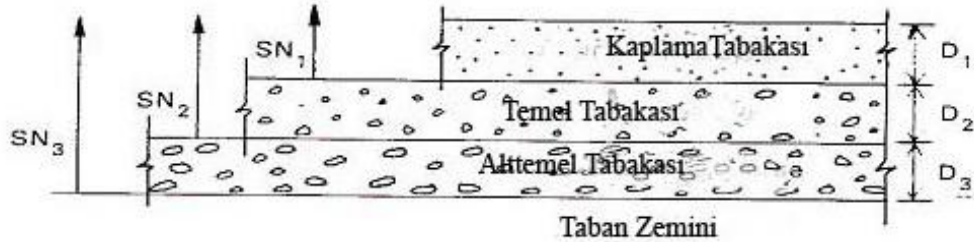
$S_0 =$ Toplam standart sapma,

$SN =$ Üstyapı sayısı (inç),

$M_R =$ Tabakaların efektif esneklik modülü (psi),

$R =$ Güvenilirlik anlamına gelmektedir.

İlk olarak $W_{t8,2}$, P_0 , P_t , Z_R , S_0 değerleri bilindiği için bu değerler yardımıyla eşitlik 3.10 denklemi çözülerek veya Şekil 3.4'te gösterilen abak yardımıyla SN üstyapı sayısı belirlenmekte olup, sonrasında da tabaka kalınlıkları hesaplanabilmektedir. Bunun yanı sıra maliyet ve inşa edilebilirlik gibi faktörlerin de göz önünde bulundurulmasıyla optimum tasarım yapılır. 1993 rehberi, daha üstte yer alan her tabakanın kendi altında yer alan tabakayı yeterli koruma sağlayacak şekilde dizayn edildiğini belirtmektedir. Şekil 3.5'te üç katmanlı üstyapı tabakası görülmektedir.



Şekil 3.5. Tabaka Analizi İle Tabaka kalınlıklarının Belirlenmesi

Tabaka kalınlıkları SN değerinden yararlanılarak bulunmaktadır. Tabaka kalınlıklarının tayini için kullanılacak temel formül aşağıdaki gibidir:

$$SN = a_1 D_1 + a_2 D_2 m_1 + a_3 D_3 m_2 \quad (3.11)$$

veya

$$SN = \sum_{i=1}^{i=k} a_i d_i + \sum_{j=1}^{j=n} a_j d_j m_j \quad (3.12)$$

Bu formülde;

$k =$ Bitümlü sıcak karışım tabakaları sayısı,

n = Granüler tabaka sayısı,

m_j = Granüler tabakalar için drenaj katsayısı,

a_1, a_2, a_3 = Sırasıyla kaplama, temel ve alt temel tabakalarının izafi mukavemet katsayıları,

D_1, D_2, D_3 = cm cinsinden sırasıyla kaplama, temel ve alt temel tabaka kalınlıklarıdır.

Hesaplanan SN'e göre bu formülde belirtilen eşitlik sağlanacak şekilde her bir tabaka kalınlığı seçilir. Tabaka kalınlıklarının seçiminde minimum kalınlıklar ve ekonomiklik de göz önünde bulundurulur (KGM, 2006).

$$D_1 \geq \frac{SN_1}{a_1} \quad (3.13)$$

$$D_2 \geq \frac{SN_2 - a_1 D_1}{a_2 m_2} \quad (3.14)$$

Üstyapı tasarımı için AASHTO 1993 rehberine göre girdi değişkenlerinin tanımlanması gerekmektedir. "Tasarım Periyodu" ve "Servis Yeteneğindeki Azalma" ilk olarak tanımlanması gereken değişkenlerdir. Servis yeteneğindeki azalma; ilk ve son servis yeteneği arasındaki fark olarak tanımlanabilir. İlk servis yeteneği kaplamanın inşa edilmesinin hemen ardından hesaplanan servis yeteneğidir. Bu değer AASHTO yol deneyinde hesaplanan ortalama bir değer olarak 4,2 kabul edilmektedir. Son servis yeteneği ise kaplamanın artık yeterli hizmeti veremeyeceği ve artık rehabilitasyon yapma gerekliliğinin ortaya çıktığı anda hesaplanan değerdir. AASHTO 1993 rehberi bu değeri, otoyollar için 2,5, daha düşük trafik hacmindeki yollar içinse 2,0 olarak alınmasını tavsiye etmektedir. Kaplama hizmet veremez duruma düşüp rehabilitasyon yapıldıktan sonra yeniden hizmete açılarak servis yeteneğindeki azalma ikinci kez hesaplanmaktadır. İşte tasarım periyodu kavramı; kaplamaya takviye yapıldıktan sonra takviye işlemleri arasındaki geçen toplam süre, diğer deyişle kaplamanın ömrü anlamına gelmektedir. Diğer girdi değişkenleri üç gruba ayrılabilir: trafik, malzeme seçimi ve çevresel etkiler.

3.3.1. Trafik

Araç ve yük dağılımlarını dingil tipine göre gruplamak, tasarım denkleminde kullanılan trafik parametresini tek bir biçime dönüştürerek kolaylık sağlamaktadır. Karmaşık trafik tek bir parametreye dönüştürülmektedir: Eşdeğer Standart Dingil Yüğü (ESDY).

AASHTO Tasarım Yöntemleri analiz periyodu süresince taşınacak toplam 8,2 ton (18 kips) ESDY'ye dayanır. Dingil yükleri AASHO Yol Testinden elde edilen Yük Eşdeğerlik Faktörleri (YEF) kullanılarak ESDY'ye dönüştürülür (Avcı, 2006).

AASHTO rehberinde trafik tahminleri trafik analiz süresi için yapılır. Yolun hizmete açıldığındaki trafik "ilk trafik", trafik analiz süresi sonundaki trafik ise "son trafik" olarak adlandırılır. İlk ve son trafik değerleri yardımıyla trafik analiz süresi için saptanan trafik değeri üstyapı hesabında tasarım trafiği olarak kullanılır. Trafik sayımlarıyla her bir araç grubu için günlük trafik (t_0) ve trafik artış katsayısı (r) belirlendikten sonra " t " yıl sonraki günlük trafik (t_t) aşağıdaki eşitlik kullanılır (Avcı, 2006).

$$t_t = t_0 (1 + r)^t \quad (3.15)$$

İlk yıl için günlük trafik (t_0) ve son yıl için günlük trafik (t_t) belirlendikten sonra " t " süresi için günlük analiz trafiğinin (t_p) hesaplanması için;

$$t_p = 0,4343 \frac{(t_t - t_0)}{\log \frac{t_t}{t_0}} \quad (3.16)$$

formülü kullanılır. Yoldan analiz süresince geçecek toplam trafik (T_p) ise :

$$T_p = t_p * 365 * t \quad (3.17)$$

formülü ile bulunur.

Bundan sonra ise proje süresi boyunca yoldan geçecek hesap şeridine düşen toplam standart dingil yükü tekerrür sayısı ($T_{8,2}$) aşağıdaki formül yardımıyla bulunur:

$$T_{8,2} = T_p \times TEF \times \frac{\eta}{i} \quad (3.18)$$

Burada;

$T_{8,2}$ = Proje süresi boyunca yoldan geçecek hesap şeridine düşen toplam standart dingil yükü tekerrür sayısı

T_p = Yoldan proje süresi boyunca geçecek toplam trafik

TEF = Taşıt eşdeğerlik faktörü

η = Hesap şeridi faktörü

i = Trafik yönü sayısıdır.

TEF aşağıdaki formül yardımıyla hesaplanmaktadır (Carvalho, 2006):

$$TEF = \sum_i (p_i \times DEF_i) \times A \quad (3.19)$$

Burada;

p_i = i yük grubunun tekerrür sayısı

DEF = Dingil Eşdeğerlik Faktörü

A = Araç başına ortalama aks sayısını ifade etmektedir.

Aşağıdaki Tablo 3.3'de görüldüğü üzere her bir trafik grubu için belirlenen trafik sayıları taşıt eşdeğerlik faktörleri hesaplanmıştır.

Tablo 3.3. Taşıt Eşdeğerlik Faktörleri

Taşıt Grubu	Taşıt Eşdeğerlik Faktörleri
Treyler	4,10
Kamyon	2,90
Otobüs	3,20
Orta Yüklü Ticari Taşıt	0,60
Otomobil	0,0006

Günlük ortalama trafik hacmi trafik gruplarına göre değil de değişik dingil yükü gruplarına göre verilmişse analiz süresi için toplam eşdeğer dingil sayısı; DEF kullanılarak hesaplanır (Avcı, 2006).

Dingil yüklerini, standart dingil yükü (8,2 ton) sayısına dönüştürmek ve esnek üstyapılarda DEF hesaplamak için aşağıdaki formüller kullanılır (Huang, 2004):

$$\log \left(\frac{T_x}{T_{8,2}} \right) = 4,79 \log (18+1) - 4,79 \log (L_x - L_2) + 4,33 \log L_2 + \frac{G_t}{\beta_x} - \frac{G_t}{\beta_{18}} \quad (3.20)$$

Burada;

$$G_t = \log \left(\frac{4,2 - p_t}{4,2 - 1,5} \right) \quad (3.21)$$

$$\beta_x = 0,4 + \frac{0,081(L_x + L_2)^{3,23}}{(SN + 1)^{5,19} * L_2^{3,23}} \quad (3.22)$$

T_x : t yıl sonunda x dingil yükünün tekerrür sayısı,

$T_{8,2}$: t yıl sonunda 8,2 ton standart dingil yükü tekerrür sayısı,

L_x : Tek, tandem, tridem dingil üzerindeki yük, kip (1 kip=0,454 ton),

L_2 : Dingil kodu (tek dingil için 1, tandem dingil için 2, tridem dingil için 3,

P_t : Son servis kabiliyeti,

SN : Üstyapı sayısı, inç

DEF, eşitlik 3.23'teki formülden;

$$DEF = \frac{T_{8,2}}{T_x} \quad (3.23)$$

oranı belirlenerek bulunur.

Bazı dingil eşdeğerlik faktörleri Tablo 3.4 ve Tablo 3.5'de son servis yeteneği indisi (P_t), dingil tipleri ve üstyapı sayısına bağlı olarak verilmiştir. Bu faktörler yardımıyla tasarım trafiği ESDY cinsinden hesaplanabilir (Avcı, 2006).

Tablo 3.4. Tek Dingil ve Pt = 2,0 İçin Dingil Yüğü Eşdeğerlik Faktörleri

Dingil Yüğü (kip)	Üstyapı Sayısı (SN)					
	1	2	3	4	5	6
2	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002
4	0,002	0,003	0,002	0,002	0,002	0,002
6	0,009	0,012	0,011	0,010	0,009	0,009
8	0,030	0,035	0,036	0,033	0,031	0,029
10	0,750	0,085	0,090	0,085	0,079	0,076
12	0,165	0,177	0,189	0,183	0,174	0,168
14	0,325	0,338	0,354	0,350	0,338	0,331
16	0,589	0,598	0,613	0,612	0,603	0,596
18	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
20	1,61	1,59	1,56	1,55	1,57	1,59
22	2,49	2,44	2,35	2,31	2,35	2,41
24	3,71	3,62	3,43	3,33	3,40	3,51
26	5,36	5,21	4,88	4,68	4,77	4,96
28	7,54	7,31	6,78	6,42	6,52	6,83
30	10,40	10,00	9,20	8,60	8,70	9,20
32	14,00	13,50	12,40	11,50	11,50	12,10
34	18,50	17,90	16,30	15,00	14,90	15,60
36	24,20	23,30	21,20	19,30	19,00	19,90
38	31,10	29,90	27,10	24,60	24,00	25,10
40	39,60	38,00	34,30	30,90	30,00	31,20
42	49,70	47,70	43,00	38,60	37,20	38,50
44	61,80	59,30	53,40	47,60	45,70	47,10
46	76,10	73,00	65,60	58,30	55,70	57,00
48	92,90	89,10	80,00	70,90	67,30	68,60
50	113,00	108,00	97,00	86,00	81,00	82,00

Tablo 3.5. Tek Dingil ve Pt = 2,5 İçin Dingil Yüğü Eşdeğerlik Faktörleri

Dingil Yüğü (kip)	Üstyapı Sayısı (SN)					
	1	2	3	4	5	6
2	0,0004	0,0004	0,0003	0,0002	0,0002	0,0002
4	0,003	0,004	0,004	0,003	0,002	0,002
6	0,011	0,017	0,017	0,013	0,010	0,009
8	0,032	0,047	0,051	0,041	0,034	0,031
10	0,078	0,102	0,118	0,102	0,088	0,080
12	0,168	0,198	0,229	0,213	0,189	0,176
14	0,328	0,358	0,399	0,388	0,360	0,342
16	0,591	0,613	0,646	0,645	0,623	0,606
18	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
20	1,61	1,57	1,49	1,47	1,51	1,55
22	2,48	2,38	2,17	2,09	2,18	2,30
24	3,69	3,49	3,09	2,89	3,03	3,27
26	5,33	4,99	4,31	3,91	4,09	4,48
28	7,49	6,98	5,90	5,21	5,39	5,98
30	10,30	9,50	7,90	6,80	7,00	7,80
32	13,90	12,80	10,50	8,80	8,90	10,00
34	18,40	16,90	13,70	11,30	11,20	12,50
36	24,00	22,00	17,70	14,40	13,90	15,50
38	30,90	28,30	22,60	18,10	17,20	19,00
40	39,30	35,90	28,50	22,50	21,10	23,00
42	49,30	45,00	35,60	27,80	25,60	27,70
44	61,30	55,90	44,00	34,00	31,00	33,10
46	75,50	68,80	54,00	41,40	37,20	39,30
48	92,20	83,90	65,70	50,10	44,50	46,50
50	112,00	102,00	79,00	60,00	53,00	55,00

Hesap şeridi faktörü (η) ise; üstyapı projelendirmesinde ağır taşıtların kullandığı şerit trafiği esas alınmalıdır. Hesap şeridindeki trafik hesaplanırken Tablo 3.6'da şerit

dağıtma faktörleri göz önünde tutulmalıdır. Bir yöndeki ağır trafiğin diğer yöne göre daha ağır yüklü olduğu durumlarda, daha ağır trafiğin oluştuğu şerit hesap şeridi olarak alınmalıdır (KGM, 2006).

Tablo 3.6. Şerit Dağıtma Faktörleri

İki Yöndeki Şerit Sayısı	Hesap şeridi faktörü (η)
2	1,0
4	0,9
6 ve daha fazla	0,8

3.3.2. Güvenilirlik

Kaplama tasarımındaki problemlerin kaynağında yapım ve bakım aşamasındaki değişkenler kadar trafiğin öngörülmesi, malzemenin karakteristiği ve davranışının modellenmesi ve çevresel koşullar gibi birçok belirsizlik vardır. Bu belirsizlik sadece veri toplanmasından kaynaklanmamakta, aynı zamanda trafiği, malzeme özelliklerini ve çevresel koşulları daha iyi karakterize edecek girdi parametrelerinin eksikliğinden kaynaklanmaktadır. Güvenilirlik faktörü tasarım denklemindeki bu belirsizlikleri hesaba katmak için geliştirilmiştir.

Güvenilirlik, kaplama tasarımının dizayn ömrü servis yeteneğinin belirlenen son hizmet yeteneği endeksine eşit ya da daha büyük olması olasılığı olarak tanımlanabilir. Güvenilirlik faktörü tasarım denklemine direk olarak trafiğe uygulanmasına rağmen, trafik belirsizliğe neden olan tek faktör değildir. (Carvalho, 2006).

Güvenilirlik seviyesi ve güvenilirliğin standart normal sapması (Z_R) yolun sınıfına bağlı olarak Tablo 3.7'den seçilecektir.

Tablo 3.7. Tavsiye Edilen Güvenilirlik Değerleri (AASHTO 1993)

YOLUN SINIFI	GÜVENİLİRLİK DEĞERİ, % R	STANDART NORMAL SAPMA Z_R
Otoyollar	95	-1,645
Devlet Yolu	85	-1,037
İl Yol	70	0,524

Ancak özel tasarım gerektirebilecek yollarda Tablo 3.8 kullanılarak bu güvenilirliğe karşılık gelen standart normal sapma (Z_R) değeri seçilebilecektir.

Tablo 3.8. Güvenilirlik Oranlarına Bağlı Olarak Verilen Standart Sapma Değerleri

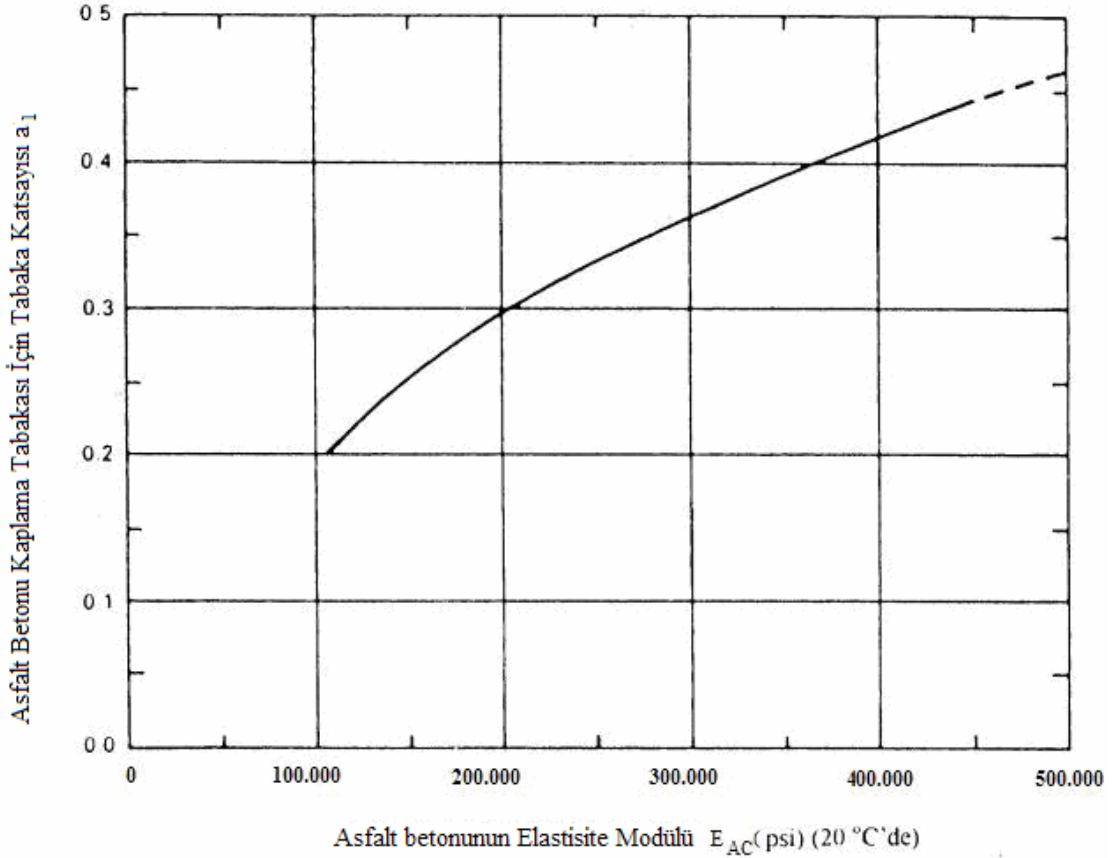
Güvenilirlik Seviyesi Oranı (R) %	Standart normal sapma (ZR)
50	- 0,000
60	- 0,253
70	- 0,524
75	- 0,674
80	- 0,841
85	- 1,037
90	- 1,282
91	- 1,340
92	- 1,405
93	- 1,476
94	- 1,555
95	- 1,645
96	- 1,751
97	- 1,881
98	- 2,054
99	- 2,327
99,9	- 3,090
99,99	- 3,750

Bunun ardından trafik ve performans tahmininin toplam standart sapma değeri (S_0) öngörülen trafik projeksiyonun güvenilirliğine bağlı olarak esnek üstyapılar için 0,40-0,50 arasında değişmekte olup, ortalama olarak $S_0=0,45$ alınır. Son olarak aşağıdaki formülle tasarım güvenilirlik faktörü (F_R) hesaplanır (KGM, 2006):

$$F_R = 10^{-Z_R * S_0} \quad (3.24)$$

3.3.3. Malzeme Özellikleri

AASHTO 1993 rehberine göre malzeme özelliğini temsil eden temel faktör taban zemininin esneklik modülüdür (resilient modulus). Yapısal tabaka katsayılarına bağlı çerçevenin inşa edilmesinden sonra, yapısal tabaka katsayısıyla elastisite modülü arasında ampirik bir ilişki geliştirildi. Şekil 3.6'da asfalt betonu kaplama tabakası için tabaka katsayısı a_1 ile asfalt betonunun elastisite modülü arasındaki ilişkiyi özetlemektedir.



Şekil 3.6. Asfalt Betonunun Tabaka Katsayısının (a_1) Resilient Modüle Bağlı Olarak Bulunması (AASHTO, 1993)

Granüler temel tabakası için tabaka katsayısı a_2 aşağıdaki formül yardımıyla hesaplanabilmektedir:

$$a_2 = 0,249 \log E_2 - 0,977 \quad (3.25)$$

Ayrıca granüler alttemel tabakası için tabaka katsayısı a_3 aşağıdaki formül yardımıyla hesaplanabilmektedir:

$$a_3 = 0,227 \log E_3 - 0,839 \quad (3.26)$$

Burada;

E_2 : Granüler temel malzemesinin esneklik modülü

E_3 : Granüler alttemel malzemesinin esneklik modülü

Üç eksenli ve tekerrürlü yük şartlarında test edilen malzemenin esneklik modülü (E ya da M_R):

$$M_R = \frac{\sigma_D}{\varepsilon_r} \quad (3.27)$$

Burada;

M_R : Esneklik modülü

σ_D : Deviator gerilme ($\sigma_1 - \sigma_3$)

ε_r : Elastik deformasyondur.

Yol tabanı Eşitlik 3.10'da sadece esneklik modülüyle ifade edilmiştir. Bunun yanı sıra M_R ile diğer zemin özellikleri, en çok kullanılan CBR, arasında da korelasyon kurulmuştur.

Esneklik modülü granüler malzemelerde, zemin yapısı, su içeriği ve gerilme koşullarına bağlı olduğundan, her üstyapı tabakasında farklılık göstermektedir. Ülkemizde Karayolları Genel Müdürlüğü Türkiye'nin farklı bölgelerinden her cins malzemeyi temsil edecek şekilde alınan alttemel, temel ve taban zemini numunelerine esneklik modülü deneyi yapmış olup, elde edilen deney sonucunu istatistiki yöntemlerle analiz ederek granüler malzemenin esneklik modülü için aşağıda verilen genel formülü elde etmiştir (KGM, 2006):

$$M_R = 1750(D_{BSK} + k)^{0.436} * CBR^{0.4} * \left(\frac{1}{1 + \log(No/200)} \right)^{0.35(LL.PI+1)^{0.06}} * \left(\frac{\gamma_{max}^2}{No4} \right)^{0.09 \log(\omega_{opt})} \quad (3.28)$$

Burada;

M_R : Esneklik modülü, psi

D_{BSK} : Bitümlü sıcak karışım tabakalarının toplam kalınlığı, cm

CBR: Kaliforniya taşıma oranı, %

ω_{opt} : Optimum rutubet, %

γ_{max} : Maksimum kuru birim ağırlık, g/cm³

LL: likit Limit, %

PI: Plastisite indeksi, %

No200: 200 Nolu elekten geçen malzeme yüzdesi

No4: 4 Nolu elekten geçen malzeme yüzdesi

k: Derinlik düzeltme faktörü, cm

$(D_{BSK} + k)$ ifadesi üstyapı tabakasının bulunduğu derinliğe bağlı olarak gerilme seviyesinin değişimini temsil etmektedir. D_{BSK} toplam sıcak asfalt kalınlığı olup, tek kat sathi kaplamalı yollarda 2 cm, çift kat sathi kaplamalı yollarda ise 4 cm alınacaktır. Derinlik düzeltme faktörü k ise, tabaka cinsi ve üstyapı kesit tipine göre seçilecektir (KGM, 2006).

3.3.4. Çevresel Etkiler

Yollar, sürekli çevresel etkilere maruz kalarak trafiğe hizmet etmektedir. Çevresel koşullar üstyapının performansını farklı şekilde etkilemektedir. Sıcaklıktaki ve su içeriğindeki değişimler, üstyapının ve yol tabanının dayanımı, durabilitesi ve yük taşıma kapasitesi üzerinde önemli derecede etkili olabilmektedir.

Ayrıca, şişebilen ve dona hassas zeminler üstyapıya doğrudan etki ederek üstyapının performansını azaltmaktadırlar. Şişmeye karşı hassas zeminler, su içeriği değişikçe herhangi bir dış yük olmaksızın büzülme ve kabarma şeklinde hacim değişikliği gösterebilirler.

Benzer şekilde, donma etkisi de üstyapının performansı üzerinde önemli etkisi olan çevresel faktörlerden biridir. Düşük ısılarda zemin taneleri içinde merccek şeklinde donan su taban zemini içerisinde donma kabarması meydana getirir. Bahar mevsiminde ise, buzların eridiği alanlardan suyun uzaklaşması ile taban zemini daha boşluklu ve yumuşak bir yapıya ulaşarak taşıma kapasitesi ve elastisite modülü önemli ölçüde azalır. Bu nedenle üstyapı malzemelerinin donmaya karşı hassasiyeti ile drenaj koşullarının, üstyapının ömrüne ve performansına olan etkilerinin üstyapı projelendirmesinde göz önünde bulundurulması gerekmektedir (KGM, 2006).

Hem taban zemini şişmesi, hem de don kabarması hizmet yeteneği kaybını arttırıcı bir etki yapar. Bunun sonucunda, erken takviye tabakası yapmak gerekir. Bu nedenle yapım yönteminde bu etki dikkate alınmış ve işleme katılmıştır. Trafik, don kabarması ve taban zemini şişmesinin hizmet yeteneği indeksi üzerindeki etkisi aşağıdaki eşitlikte verilmiştir (Kök, 2008).

$$\Delta PSI = \Delta PSI_{\text{trafik}} + \Delta PSI_{\text{şişme}} + \Delta PSI_{\text{don kabarması}} \quad (3.29)$$

Burada,

ΔPSI = Hizmet yeteneği indeksinde ki toplam azalma

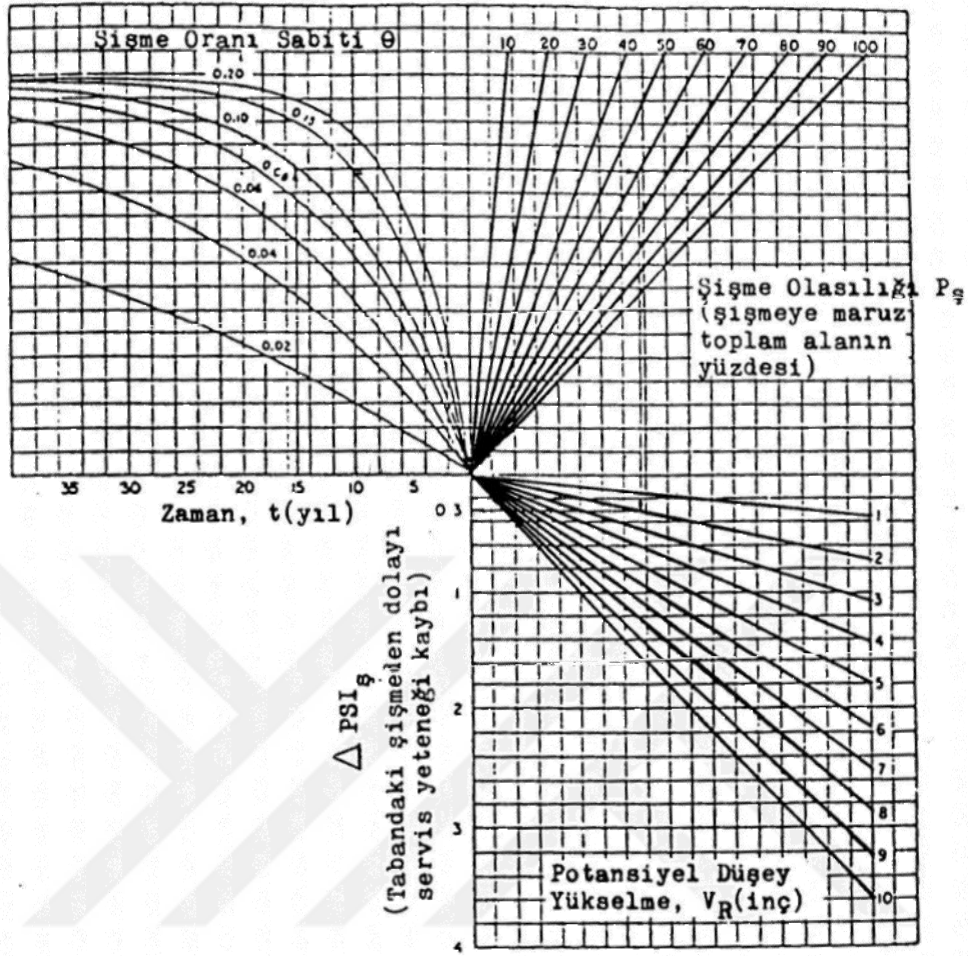
$\Delta PSI_{\text{trafik}}$ = Trafik nedeniyle hizmet yeteneği indeksinde azalma,

$\Delta PSI_{\text{şişme}}$ = Taban zemini şişmesi nedeniyle hizmet yeteneği indeksinde azalma,

$\Delta PSI_{\text{don kabarması}}$ = Don kabarması nedeniyle hizmet yeteneği indeksindeki azalmadır.

Hizmet yeteneğinde taban zemini şişmesinden dolayı meydana gelecek azalmayı hesaplayabilmek için, şişme oranı sabiti (θ), potansiyel düşey yükselme (V_R) ve şişme olasılığı ($P_{\text{ş}}$) bilinmelidir. Hizmet yeteneğinde taban zemini şişmesinden dolayı meydana gelecek azalma ($\Delta PSI_{\text{ş}}$), bu parametrelere bağlı olarak ve performans periyodu için, Şekil 3.7 veya şeklin nomograf çözümü ile tayin edilmektedir.

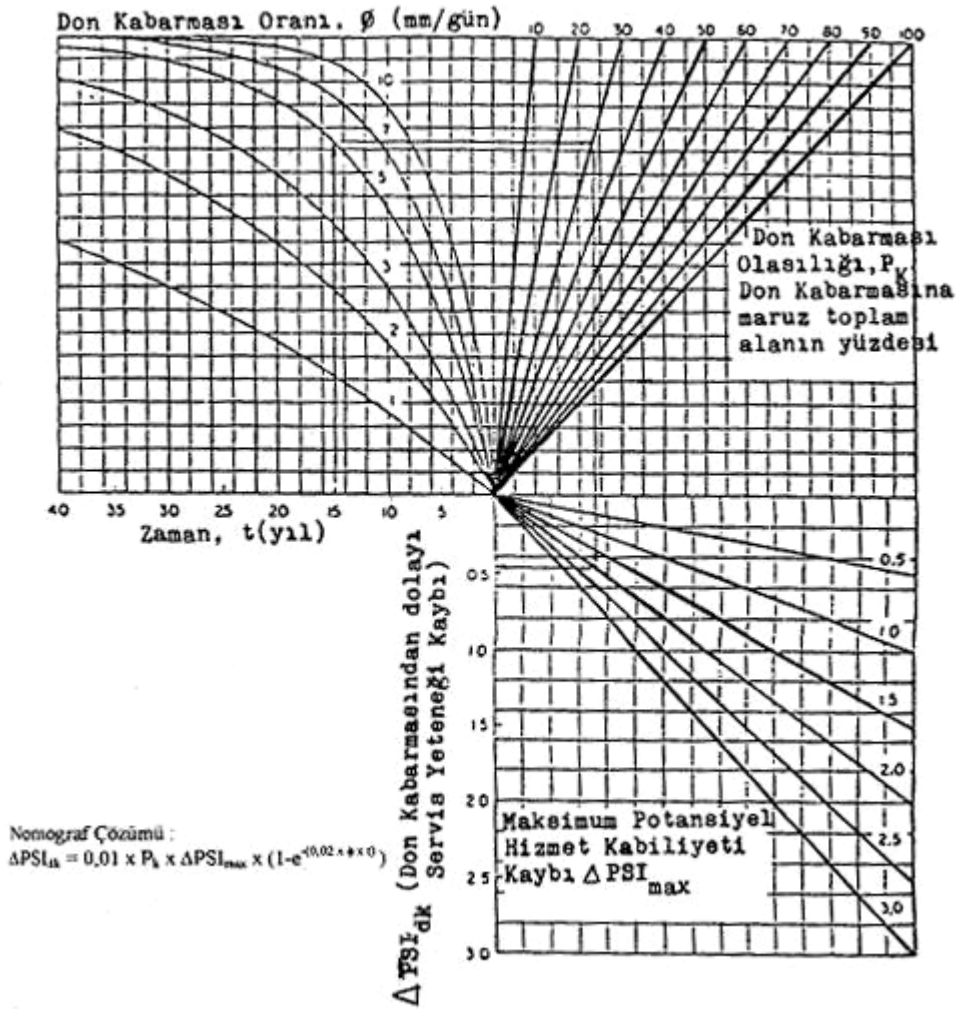
Benzer şekilde, don kabarmasından dolayı hizmet yeteneğinde meydana gelecek azalmayı hesaplayabilmek için, Don kabarması oranı (ϕ), maksimum potansiyel hizmet yeteneği kaybı (ΔPSI_{max}) ve Don Kabarması Olasılığı (P_k) bilinmelidir. Hizmet yeteneğinde don kabarmasından dolayı meydana gelecek azalma, bu parametrelere bağlı olarak ve performans periyodu için, Şekil 3.8 veya şeklin nomograf çözümü ile (ΔPSI_{DK}) tayin edilmektedir (Kök, 2008).



Nomograf Çözümü :

$$\Delta PSI_s = 0,00335 \times V_R \times P_s (1 - e^{-\theta t})$$

Şekil 3.7. Taban Zemininin Şişmesinden Dolayı Hizmet Yeteneği İndeksindeki Azalma (ΔPSI_s) İçin Grafik



Şekil 3.8. Don Kabarmasından Dolayı Hizmet Yeteneği İndeksindeki Azalma (ΔPSI_{DK}) İçin Grafik

3.3.5. Drenaj

Yol üstyapısının drenaj kabiliyeti de yolun performansını etkileyen faktörlerden birisidir. Bu nedenle taban zeminlerinde yeraltı su seviyesi tesviye yüzeyinin en az 150 cm altında tutulmalıdır. Ayrıca uygun bir drenaj sistemi ile yol yüzeyindeki suların yol gövdesini etkilemesi engellenmelidir. Yol gövdesinin yapım sırasında ve yolun ömrü boyunca stabil kalabilmesi için, etkili ve kalıcı bir drenaj sistemi ile sudan korunması gerekmektedir.

Esnek üstyapıların projelendirilmesinde drenaj etkisi eşitlik 3.11'deki formülde görüldüğü gibi alttemel ve temel tabakalarına ait parametrelerin drenaj katsayısı (m_i) denilen bir sabitle çarpılmasıyla dikkate alınır (KGM, 2006).

Drenaj Katsayısının malzemenin cinsine göre Tablo 3.9'dan seçilmesi gerekmektedir.

Tablo 3.9 Drenaj Katsayıları

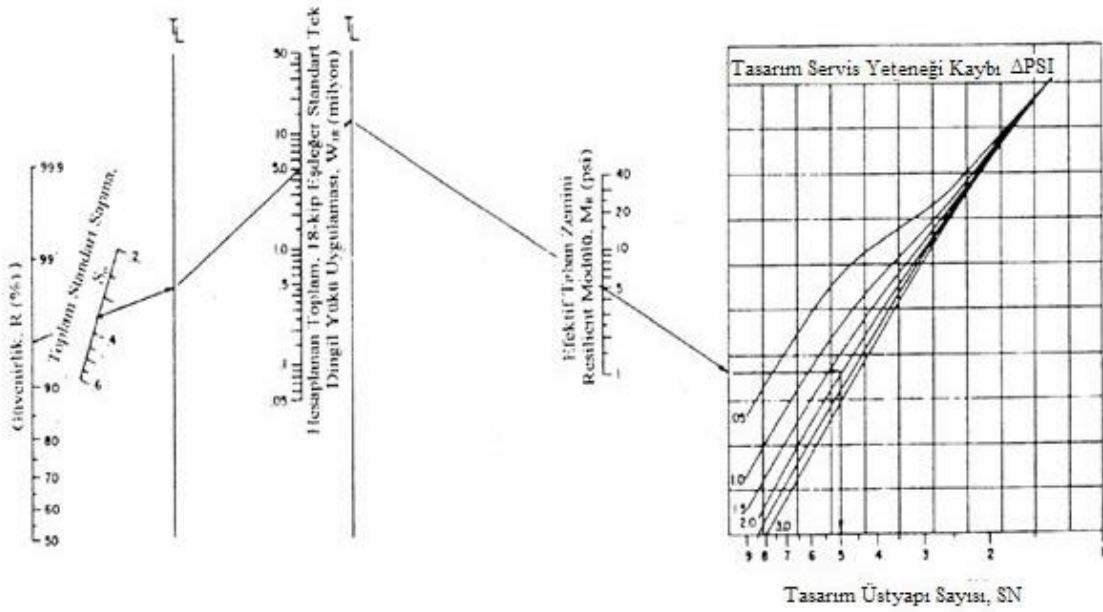
Ana Zemin Tipi	Zeminin Grup Sembolü	0.075 mm'den küçük malzeme %'si	Drenaj Katsayısı (m _i)
Çakıllar	GW, GP, GW-GM, GW-GC, GP-GM, GP-GC	<12	1,0
	GM, GC	12-20	0,95
		>20	0,90
Kumlar	SW, SP, SW-SM, SW-SC, SP-SM, SP-SC	<12	0,95
	SM,SC	12-20	0,90
		>20	0,85
Siltler	ML, MH	>50	0,75
Killer	CL, CH	>50	0,50

Şekil 3.4'teki üstyapı projelendirme abağı yardımıyla her tabaka için SN sayısı hesaplanır (Avcı, 2006).

Daha sonra a (izafi mukavemet katsayısı); temel alttemel ve taban zemini tabakaları için söz konusu tabakaların esneklik modülüne (M_R) bağlı olarak aşağıdaki formül yardımıyla hesaplanır (KGM, 2006):

$$a_i = 0,0045 \sqrt[3]{M_{Ri}} \quad (3.30)$$

Bundan sonra Eşitlik 3.11, 3.12, 3.13 ve 3.14'deki formüller yardımıyla her tabakanın kalınlığı ayrı ayrı hesaplanabilir.



Şekil 3.9. Esnek Üstyapılar İçin Tasarım Çizelgesi (KGM, 2006).

3.4. AASHTO 2002 Esnek Üstyapı Tasarım Yöntemi

AASHTO 1993 tasarım rehberi halen dünyada en yaygın kullanılan tasarım rehberi olmasına rağmen bazı belirgin eksiklikleri vardır. AASHTO 1993 rehberi, temel olarak AASHTO yol testi deneyindeki saha performansı verilerinden geliştirilen ampirik bir modeldir. Yol testi, kaplamanın servis yeteneğindeki azalmaya ve kaplamanın bozulmasına trafik yüklerinin nasıl etki ettiğini belirlemek için tasarlanan bir dizi deneydir. Son yapılan deney 1958-1960 yıllarında yapılmış olup, ampirik yapısı nedeniyle AASHTO 1993 tasarım rehberinin temel eksikliğini oluşturmaktadır. Çünkü AASHTO yol testi; düşük trafik yükleri altında, tek bir iklimde, tek bir tip yol tabanı malzemesi kullanılması gibi sebeplerden ötürü yetersiz kalmaya başlamıştır. AASHTO yol testinde geliştirilen trafik yüklemesi ve kaplama performansı arasındaki ilişki sadece AASHTO yol testindeki özel koşullar sağlandığında geçerlidir. AASHTO 1993 tasarım yöntemi ise farklı koşullar için AASHTO yol testinde gözlemlenmeyen trafik yüklemesi kaplama performansı ilişkisiyle ilgili tahminlerde bulunur. Ek olarak AASHTO 1993 tasarım rehberi sadece tek bir kaplama performansı indikatörü kullanır: PSI (Servis Kabiliyeti İndeksi). Sonuç olarak AASHTO 1993, bir kaplama tasarımının kaplama bakımı ve rehabilitasyon takvimini etkileyen kaplamanın bozulması hususunda, kaplamanın yapısal tasarımının nasıl performans göstereceğini belirleme kapasitesine sahip değildir (Boone, 2013).

Yüksek hızda ve kapasitede bilgisayarların kullanımının mümkün olmasıyla daha karmaşık hesaplamaların kısa sürede yapılabilmesi mümkün olmuş, bu durum daha mekanik yöntemlerle esnek üstyapı tasarımı yapılabilmesini sağlayan bilgisayar programları ve uygulamaların geliştirilmesini sağlamıştır. Ancak sadece teorik bilgiler kaplama tasarımının gerçekçi şekilde yapılabilmesi için yeterli değildi, hala kaplamanın performansının gözlemlenmesine gereksinim duyuluyordu. Bu sebeplerle kaplamanın tepkilerini daha gerçekçi öngörecekt mekanik-ampirik yaklaşıma dayalı bir metot üzerinde çaba sarf edilmiştir ve mekanik-ampirik yaklaşıma dayalı günümüz modern üstyapı tasarım yöntemi olan AASHTO 2002 tasarım rehberi ortaya çıkmıştır. Mekanik-ampirik tasarım yöntemi; tekerlek yükü gibi bir girdiyle, gerilme ya da kaplamanın verdiği tepki gibi bir çıktı arasında ilişki kurmaktadır. Bu tepki, laboratuvar testi ve arazi performans verilerine dayalı yorumlayıcı öngörmek için kullanılmaktadır. Bu yöntem kaplamanın tüm tasarım ömrü boyunca iklim ile malzeme özelliklerinin yaşlanmasını birlikte ele alan tekerrüre dayalı ve kapsamlı ilk metottur (Shahji, 2002).

Bu bölümde, AASHTO 2002 Üstyapı Tasarım Yöntemi, kapsamı nedeniyle ayrıntılı olarak anlatılmamış olup, yalnızca bu yöntemde, AASHTO 1993 yöntemine yapılan ilave hususlar ve gelişmelere değinilmiştir.

Dünyada en yaygın kullanılmakta olan tasarım yöntemi halen AASHTO 1993 tasarım yöntemidir. Ancak karayollarında üstyapı harcamalarının oldukça yüksek olmasından dolayı, sürekli olarak üstyapı tasarımının geliştirilmesi ve maliyetlerin düşürülerek en iyi tasarım yönteminin uygulanması kaçınılmaz olmaktadır. AASHTO yol testinden günümüze kadar üstyapı tasarımının geliştirilmesi konusunda JTPF (Joint Task Force on Pavements) adlı kuruluş görev yapmakta olup, bu kuruluş 1996 Irvine California'da yeni bir tasarım rehberi oluşturmak için toplanmıştır. Yeni tasarım rehberinde trafik yükleri, taban zemini, çevresel koşullar gibi alanlar hedef alınarak Mekanik-Ampirik Kaplama Tasarım Rehberinin (MEPDG) temelini oluşturmuştur.

AASHTO 1993 tasarım yönteminin trafik yükleri, malzeme karakteristiği, iklim koşulları ve taban zemini konularında AASHTO 2002 yöntemine göre bazı eksiklikleri vardır. Bu eksiklikler aşağıdaki başlıklar altında sıralanabilir (Aguib, 2013):

3.4.1. Trafik Yükleri

Eşdeğer Standart Tekil Dingil Yüğü (ESTDY); AASHO yol deneyinde geliştirilen trafik yükleri ve eşdeğerlik faktörlerini karakterize etmek için kullanılmaktadır. Ancak bugünün trafik şartlarına (dingil yüğü, trafik miktarı ve aks tiplerinin birleşimi) göre uygulanabilirliği oldukça şüphelidir. AASHO yol testi 1 milyon dingil yüğü için yapılmıştır, oysaki testin yapıldığı zamanlar ABD'deki eyaletlerası yollar 5-10 milyon dingil yüğü ağırlığa maruz kalmaktaydı. Bugün ise üstyapı tasarımı 50-200 milyon dingil yüküne göre yapılmaktadır. Bu durum yollarda aşırı trafik nedeniyle özellikle tekerlek izinde oturmaları sebep olmaktadır. Tasarımcı bu hususla baş etmek için kendi öngörüsünü kullanmakta, bu durum gerçekte olması gereken üstyapı tasarımının altında ya da üstünde kalarak gereksiz maliyetlere katlanması sonucuna yol açmaktadır.

AASHTO 1993 tasarım rehberi 1980'lerdeki ağır taşıtlara ait aks tipleri, taşıt tipleri ve araç süspansiyonlarını temsil etmektedir. Oysaki günümüzde teknolojinin gelişmesiyle birlikte ağır taşıtların birçok özelliği de değişmektedir. Özellikle taşıtların lastik basınçları artmıştır.

3.4.2. Malzeme Özellikleri

SuperPave, taş mastik asfalt, polimer modifiyeli asfalt gibi yeni teknoloji ürünler ampirik tasarım modellerine direk olarak dahil edilememektedir. Dayanıklılık hususunda ise; 2 yıllık AASHO yol testi süresince asfalt soyulması gibi bazı dayanıklılık problemleri görülmüştür. Bu durum performans üzerinde malzeme dayanıklılığının uzun süreli etkilerinin yeterince düşünülmediği anlamına gelmektedir.

3.4.3. Zemin Özellikleri

AASHO yol deneyi siltli kil bir taban zemini üzerine inşa edilmişti. Bu tek tip zemin nedeniyle, ayrıca belli bir coğrafyada uygulandığı için farklı iklim ve zemin koşullarında yetersiz kalmaktadır.

3.4.4. Drenaj

Yol testi esnasında hiçbir drenaj sistemi kullanılmamıştır.

3.4.5. Tasarım Ömrü

AASHTO 1993 tasarım rehberi sadece yol testinin yapıldığı süreçteki 2 yıllık verilere dayandığı için, tasarımı etkileyen parametrelerin (özellikle iklim ve çevresel etkenler) uzun vadeli etkilerini dikkate almaz. Bu yüzden yeni bir tasarım rehberine ihtiyaç duyulmaktadır (Aguib, 2013).

Kıyası AASHTO 1993 yöntemine göre en göze çarpan değişiklikler şöyle sıralanabilir:

- Çevresel parametreler arasında bağlantı kurma,
- Tabaka kalınlığını belirlemek için önemli olan tabaka katsayıları (a)'ya karşılık yeni teknoloji yapım malzemelerini de içeren esneklik modülü tanımlanması,
- Eşdeğer standart dingil yükü (ESDY) karşısında, trafik hacim dağılımı ve yükleme sınıfı kavramının kullanılması,
- Verilen bir yük büyüklüğü ve konfigürasyonu altında kaplamada meydana gelebilecek kritik gerilme, zorlanma ve çökmeleri belirlemek için mekanik analizlerin kullanılması,
- Kompozit bir hizmet yeteneği kavramı yerine tekil olarak kaplamanın her kesimindeki yorulmaların öngörülmesi.

MEPDG direk bir tasarım metodu olmaktan çok, kaplama performansının önceden öngörülmesini sağlayan bir yöntemdir. Kullanıcılar yeterli performansı sağlayan ekonomik yapıyı bulmak için sürekli iterasyon yapmalıdırlar (Fick, 2010).

4. ÖZEL PROJE TAŞIMACILIĞI VE AŞIRI YÜKLÜ/AŞIRI BÜYÜK ARAÇLARIN KARAYOLU ÜSTYAPISINA ETKİSİ

4.1. Proje Lojistiği ve Proje Taşımacılığı

Proje taşımacılığı, özellikle ağır, havaleli, hacimli (fazla uzun, fazla geniş veya fazla yüksek) yani gabari dışı eşyaların taşınmasında kullanılır. Bu tip eşyalar genellikle kamu/özel sektör fabrika, rafineri, madencilik, enerji, inşaat vb. altyapı yatırımlarında gerekli olan malzemeler, cihazlar veya donanımlardır. Proje lojistiği ise taşımacılık operasyonlarının yanında müşteriden gelen özellikli dağıtım, depolama veya elleçleme gibi karmaşık lojistik operasyon ve görevleri de kapsamaktadır (Erdal ve ark, 2008).

Proje taşımalarında risk yönetimi planları ve taşımacılıkta risk alanları belirlenir. Taşıma sırasında insan, yöntem ve araç kullanımından kaynaklanabilecek hasar ve kaza tahminleri yapılır. Sevkiyatı yapılan malzemenin kitle tipi üretim ürünü olmadığı için çoğunlukla yedeği yoktur. Bu nedenle transfer sırasında zarar görmemesi gerekir. Sözleşmelerde ağır tazminat koşulları olabilmektedir (Erdal ve ark, 2008).

Proje taşımacılığında sevkiyatlarda kullanılacak güzergah son derece önemlidir. Taşınacak malzemeler hacim, ağırlık veya malzeme özellikleri gereği genellikle denizyolu, demiryolu taşıma türlerinde özel düzenek, taşıma kap veya araçlarına ihtiyaç göstermekte, karayolunda ise çok akslı özel araçlarla sevk edilebilmektedir. Bu nedenle liman, terminal kapasiteleri, geçiş yapılacak tünel, otoyol, köprü, kavşak, üst geçit yükseklikleri ve ağırlık kaldırma kapasitesi, yol şerit sayısı ve trafik yoğunluğu dikkat edilmesi gereken unsurlardır. Proje taşımacılığında sevkiyat sırasında yollarda herhangi bir sıkışıklığa veya tıkanıklığa sebebiyet verilmemesi gerekmektedir. Örneğin karayolu taşımalarında kamu kurum ve kuruluşlarından izinlerle birlikte araç önü arkası ile ilgili her türlü koruma önlemleri alınmalıdır (Erdal ve ark, 2008).

Taşınan yükün boyutlarına göre havuzlu low-bed (düşük şasi) adı verilen yükseklikleri ayarlanabilen ağır taşıma araçları kullanılabilir. Özellikle tünel geçişlerinin söz konusu olduğu güzergahlarda havuzlu low-bedler sıklıkla kullanılmaktadır. Normal low-bed araçların yükleme yapılan taban kısımlarının yerden yüksekliği 0,83 metre iken, havuzlu low-bed lerin yerden yükseklikleri 0,40 metreye kadar indirilebilmektedir. Sekiz dingilli modüler treylerler proje taşımacılığı için tasarlanmış taşıma araçlarıdır.

16,75 m boydan boya uzunluğa sahip olup, 2,65 m'ye kadar yerden yüksekliği ayarlanabilmektedir. 3,05 cm yükseklikteki ürünlerin taşınmasına olanak vermektedir (Örnek, 2009).

Proje lojistiğinin ilk aşaması, taşınması yapılacak olan malzemelerin belirlenmesidir. Taşınacak eşyanın yönetimi için risk unsurunun planlanması gerekir. Taşınan eşya ileri seviye güvenlik önlemleri ile korunmak ve taşınmak durumundadır. Taşıma işini üstlenen firma planlama aşamasından sonra taşıma maliyetlerini tespit ederek navlun fiyatlarını belirler.

Proje Lojistiğinde/Taşımacılığında taşınan tesislere örnek olarak;

- Doğalgaz santral projeleri,
- Termik Santral projeleri,
- Baraj ve hidroelektrik santralleri projeleri,
- Mobil santral projeler,
- Rafineri ve petrokimya tesisleri,
- Boru hattı lojistiği projeleri,
- Raylı sistem projeleri verilebilir (Örnek, 2009).

4.2. Özel Proje Taşımacılığı ve Kendinden Tahrikli Modüler Taşıyıcı (SPMT)

Standart ölçüler dışındaki tüm yüklerin, bu yüklere uygun özel römorklar ve çeker araçlar ile öncü araç eşliğinde, mümkün olan standartlarda karayolu izin belgelerini alarak en ehemmiyetli ve en kısa sürede karayolu ve kombine taşıma sistemi ile varış noktasına taşınması, montaj ve diğer müşteri talepleri doğrultusunda destek hizmetlerdir. Uluslararası taşımacılık kapsamında gabari dışı kabul edilen ağır ve hacimli yükler ile tesislerin (santral, fabrika taşınmaları gibi) taşınması özel proje taşımacılığı olarak değerlendirilmektedir. Ağır yüklerin lojistiği genel bir kabulle 150 tonun üzerindeki taşımalar için kullanılan lojistiğin özel bir alanıdır (Erdal ve ark, 2008).

Karayolu Taşıma Yönetmeliğine göre standartların dışında olan yüklerin yani, normal kamyon veya treyler/konteynerlerin ölçülerine göre (en/boy/yükseklik) farklı yüksekliklerde/uzunluklarda ve tonajlarda olan yüklerin taşınması özel proje taşımacılığının konusudur (Erdal ve ark, 2008).

Özel proje taşımacılığında karayolunda çok sık karşılaşmayacağımız büyüklükte yükler nakliye sektöründe kullanılan klasik araçlardan farklı olarak tasarlanmış özel araçlarla taşınmaktadır. Bu özel araçlardan dünyada en çok kullanılan Kendinden Tahrikli Modüler Taşıyıcı (SPMT-Self Propelled Modular Transporter)'lardır. Mesela bir gemi, 1.500 ton ağırlığında bir liman vinci SPMT'ler yardımıyla bir noktadan farklı bir noktaya nakledilmektedir. Bu özel araçlar dünyada inşaat ve petrol endüstrisi gibi birçok endüstri sektöründe, özellikle Şekil 4.1'de görüldüğü gibi tersane ve denizcilik sektöründe büyük petrol platformlarının taşınması, tersane şantiyelerinin kurulması gibi işin karayolu taşımacılığı gerektiren kısımlarında kullanılmaktadır.



Şekil 4.1. Bir Geminin SPMT kullanılarak Karayolunda Nakledilmesi (Scheuerle, 2019)

4.2.1. SPMT Nedir?

SPMT hidrolik sürüş, hidrolik direksiyon ve hidrolik kaldırma olmak üzere üç temel fonksiyona sahip özel bir araçtır. Taşımacılıkta olağandışı büyüklük ve ağırlıktaki yükler normal taşıma araçlarıyla taşınmamakta, SPMT gibi özel araçlar kullanılmaktadır. Bu araçların tekerleklerinin her biri birbirinden bağımsızdır ve 360 derece dönebilmektedir. SPMT'ler ile her boyut ve ağırlıktaki yük nakledilebilmekte, bu sebeple her sektörde kullanılabilir. En çok kullanıldığı sektörler; gemi yapımı endüstrisi, ağır taşıma lojistiği, elektrik santrali endüstrisi, kimya endüstrisi, inşaat sektöründe çok büyük fabrikasyon parçaların taşınması gibi işler sayılabilir.

Tipik bir SPMT genellikle 2 aks karşılıklı ve 4-8 aks boyuna olacak şekilde bilgisayar kontrollü bir sisteme sahiptir. İki ya da daha fazla aks yan yana yerleştirilmesine aks çizgisi denilmektedir. Tüm akslar bireysel olarak kontrol edilebilmektedir.

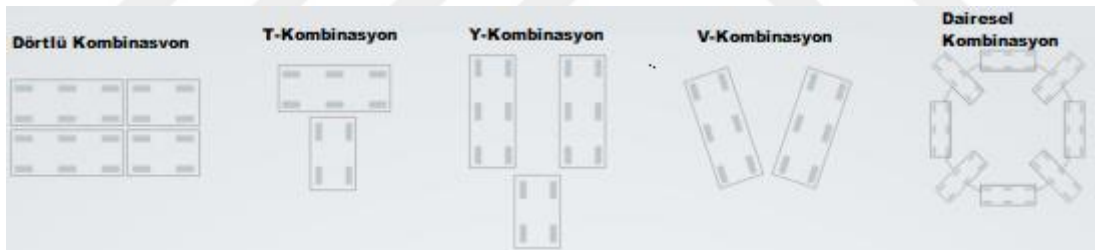
4.2.2. SPMT'lerin Teknik Özellikleri

SPMT'ler güç ünitesi, gövde, hidrolik sistem ve hidrolik süspansiyondan oluşmaktadır. Güç ünitesi SPMT'nin motor kısmının bulunduğu ve tüm sistemlerin çalışmasını ve yönetilmesini sağlayan bölümdür. Gövde ise, taşıyıcının yükü taşıyan temel parçası olup, tekerlek dingil takımı ve sağlam bir kutu kiriş yapısına sahip çerçeveden oluşmaktadır. Taşıyıcı parçaları oluşturan malzemeler 690 MPA akma dayanımına sahip yüksek performanslı kaynak plakalarından oluşmaktadır. Modüler üniteyi oluşturan ana çerçeve yüksek dayanıma sahiptir ve eğilmeye sebep olabilecek kuvvetlere karşı son derece güçlüdür. Her üniteye çerçevenin ortasında ikizkenar yamuk kutu şeklinde boylamasına bir kiriş vardır. Bu kiriş ayrıca çerçeveye tek ünite olarak kaynaklanmış salınlı silindir kutularından oluşur. Hidrolik sistem ise; SPMT'lerin birçok fonksiyonu hidrolik sistemler sayesinde sağlanabilmektedir. Özellikle SPMT'leri farklı kılan en önemli özelliklerden biri tüm tekerlerin birbirinden bağımsız olması ve 360 derece dönebilmesidir, bunu sağlayan hidrolik sistemdir. Tekerlere gelen yük değişkenlik gösterdikçe her tekere gelen hidrolik akışı düzenleyen bir sistem vardır. Süspansiyonlar da yine hidroliktir. Bu hidrolik süspansiyon Şekil 4.2'de görüldüğü üzere SPMT ağır yükleri taşıırken taşıdığı yükün yatay vaziyette kalmasını sağlamakta ve yükün tekerler arasında eşit dağılmasına yardım etmektedir. Diğer hidrolik sistemler ise kaldırma sistemi, frenleme sistemidir. Araç bir uzaktan kumanda vasıtasıyla bir operatör tarafından kontrol edilmektedir.



Şekil 4.2. SPMT Hidrolik Sistemi (Anstertrailer, 2017)

SPMT üniteleri yükün ağırlığına ve boyutuna göre arka arkaya ya da yan yana olacak şekilde farklı kombinasyonlarda büyütülebilir. Her ünite farklı kumandalarla yönetilmektedir. Şekil 4.3'te görüldüğü üzere her türlü ağırlık ve boyuttaki yük için SPMT kombinasyonu yapılabilmektedir. Her aks 60 tona kadar yük taşıyabilme kapasitesine sahiptir (Anstertrailer, 2017).



Şekil 4.3. SPMT'lerin Birbirine Eklenecek Kombinasyonları (Anstertrailer, 2017)

4.3. Ağır Taşıtların Karayolu Üstyapısına Etkisi

Karayolu esnek üstyapıları, tabakalı sistemler olduğu için karmaşık bir yapıya sahiptir. Çünkü tabakalar farklı davranış gösteren malzemelerden meydana gelmektedir. Alt temel ve temel tabakalarını oluşturan granüler malzemeler nonlineer elastik davranış gösterirler. Aşınma tabakasında ise özellikleri sıcaklığa ve yükleme hızına bağlı olan visko-elastik davranış gösteren bitümlü karışımlar kullanılmaktadır. Üstyapı çeşitli büyüklükteki araç yüklerine maruz kalır. Tekerlek yükleri genelde dairesel üniform yük olarak temsil edilmektedir. En basit durum tek tekerlek yüküdür. Bazı durumlarda farklı yükleme şekilleri de olabilmektedir. Yükleme büyüklüğü ve süresi üstyapıda oluşacak defleksiyon (oturma) üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Üstyapıdaki yapısal

problemler, temelde projelendirme esnasında dikkate alınan dingil yükü değerinin aşılmasıyla başlar (Saltan ve Fındık, 2005).

Üstyapıdaki bozulmalara, üstyapı tabakalarındaki kritik gerilme ve şekil değiştirmeler sebep olmaktadır. Bitüm karışımli tabakalarının alt kısımlarında oluşan çekme gerilmeleri ve şekil değiştirmeleri önce küçük çatlamlara ardından da gözle görülür kırılmalara sebep olmaktadır. Bu çatlamlar yorulma çatlakları olarak adlandırılmaktadır.

Yorulma çatlaklarına sebep olan en büyük faktör araçların dingil yükü ve dingil yükünün tekerrür sayısıdır. Çatlakların oluşmasında asfaltın çekme dayanımı hayati bir öneme sahiptir. Asfaltın çekme dayanımı ve araçların dingil yükleri ve tekerrür sayısının yanında, yolun drenaj koşullarının yetersizliği, alttaki tabakaların yetersiz kalınlıkta olması, don sebebiyle alttemel ve temel malzemesinde meydana gelecek bozulmalar, araçların ani hızlanma ve yavaşlamaları, araçların dingil yük dağılımındaki dengesizlikler, araç süspansiyon tipi gibi faktörler yorulma çatlaklarının oluşmasına neden olabilmektedir (Hanlı, 2009).

Kalıcı deformasyon, bitümlü sıcak karışım tabakası yüzey enkesitinin, tasarımdaki düzgün durumunu koruyamaması ve bozulmasıdır. Esnek üstyapı her yüklendiğinde küçük miktarlarda oluşan geri-dönümsüz deformasyonların toplamını sembolize ettiğinden “kalıcı” deformasyon olarak tanımlanır. Tekerlek izi oluşumu kalıcı deformasyonun en yaygın şeklidir. Tekerlek izi oluşumunun, nem hasarı, aşınma ve trafik yüklerinin yoğunlaşmasıyla sıcak karışım asfaltın temelini teşkil eden tabakaların zayıflaması gibi birçok nedeni olmasına karşın, iki ana sebebi vardır (Ağar ve Umar, 1991).

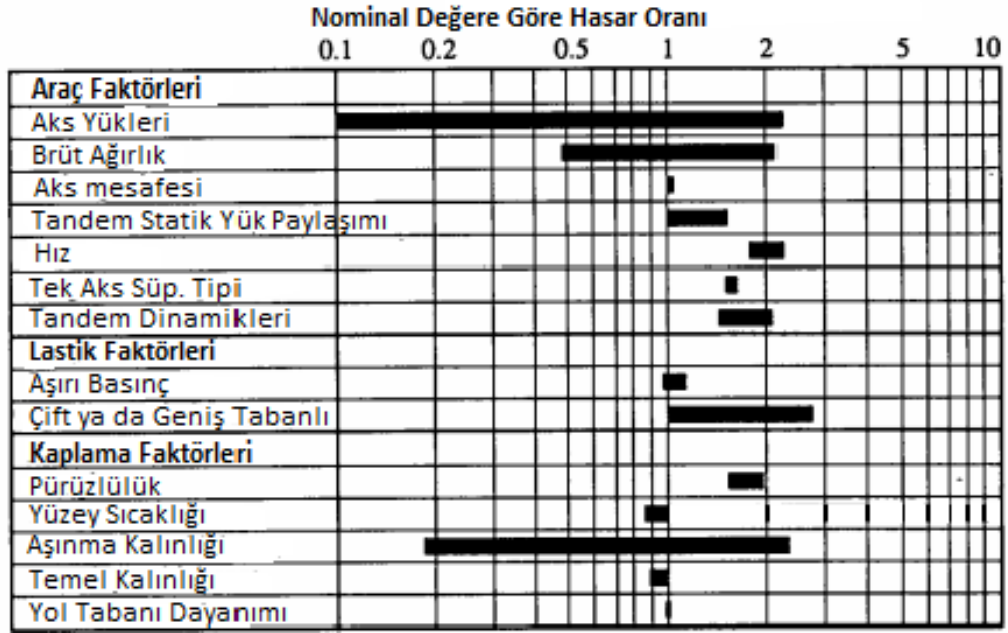
Birinci durumda, asfalt kaplama tabakası altındaki temele (veya alt temele veya tabii zemine) çok fazla tekrarlı yüklerin uygulanması tekerlek izine sebep olur. Mukavemeti daha yüksek olan kaplama malzemeleri bu tip tekerlek izini kısmen azaltmasına rağmen, normalde bu olay bir malzeme probleminden çok, yapısal bir problem olarak nitelendirilir. Çünkü uygulanan yüklerden kaynaklanan gerilmeleri asfalt tabakası altındaki temel için dayanılabilir seviyeye indirgeyecek bir kaplama mukavemeti veya kalınlığı mevcut değildir. Bu durum, kaplama tabakalarından birinin, suyun nüfuzuyla beklenmedik bir şekilde zayıflaması sonucu da olabilir. Deformasyon, asfalt

tabakalarından çok, asfalt tabakası altındaki tabakalardan oluşur. Asfalt karışım tasarımcılarını en çok ilgilendiren diğer ana tekerlek izi tipi, asfalt tabakaları içinde meydana gelen deformasyondur. Tekerlek izi, asfalt karışımların tekrarlı ağır yüklere karşı koyacak yeterli kayma mukavemetine sahip olmaması nedeniyle oluşur. Zayıf bir karışımda, her bir ağır kamyon geçişiyle küçük ama kalıcı deformasyonlar oluşur ve bu deformasyonlar da karışımın aşağı ve kenarlara doğru yer değiştirmesi sağlayarak tekerlek izi oluşumuna neden olur. Tekerlek izi asfaltın yüzey tabakasında oluşabilir, ama yüzey tabakasında oluşan tekerlek izi yüzeyin altındaki zayıf asfalt tabakasından kaynaklanabilir (Ağar ve Umar, 1991).

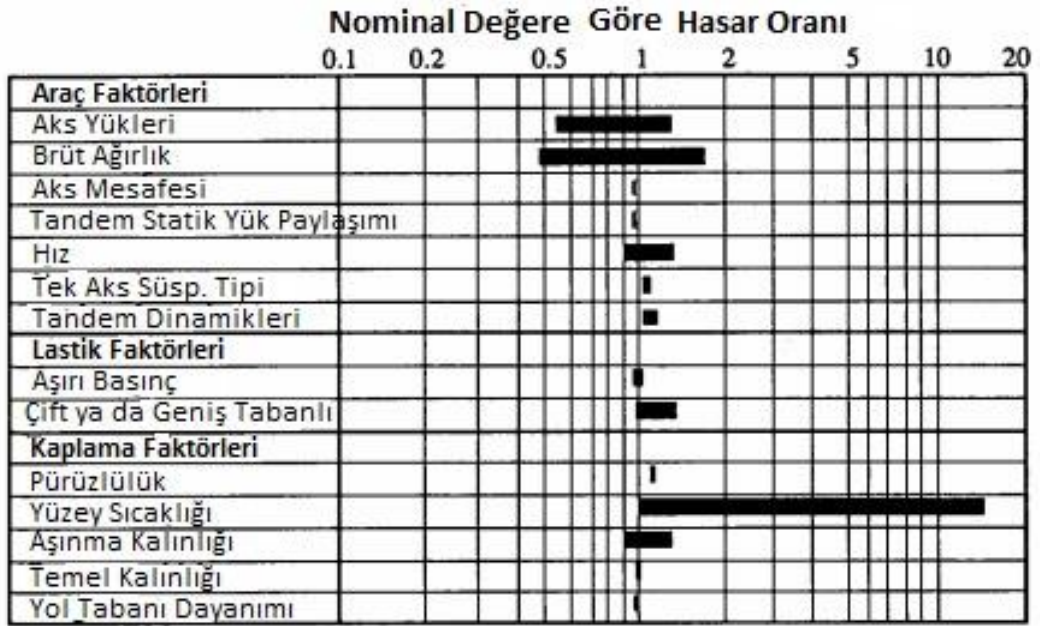
Tekerlek izi oluşumu çok küçük kalıcı deformasyonların toplamı olduğundan, karışımın kayma mukavemetini arttırmanın bir yolu, sadece daha sert bir asfalt kullanmak değil, aynı zamanda, yüksek kaplama sıcaklıklarında daha çok elastik bir katı gibi davranan bir asfalt kullanmaktır. Bu yolla, karışımdaki asfalt çimentosuna bir yük uygulandığında lastik bir bant gibi davranacak ve yük kaldırıldığında ilk pozisyonuna geri dönecektir (Ağar ve Umar, 1991).

Tüm ağır taşıtlar karayolu üstyapısına eşit miktarda hasar vermez. Aracın dingil yükü, aksların sayısı ve yerleşim şekli, süspansiyon ve tekerlek tipi ve diğer etkiler nedeniyle karayolu üstyapısına verilen hasar değişiklik göstermektedir. Bunun yanı sıra kaplamanın özellikleri, aracın çalışma koşulları ve çevresel faktörler de kaplama hasarına etki eden spesifik faktörlerdir. Ağır taşıtların neden olduğu kaplama tabakasındaki bağıl hasar; araç, lastik ve kaplama faktörlerine bağlıdır. Bir ağır taşıtın kaplama tabakasına vereceği bağıl hasarı anlayabilmek için, kaplamanın hasara karşı direncini etkileyen tasarım değişkenleriyle birlikte araç ve lastik karakteristiklerinin de iyi anlaşılması gerekmektedir.

Şekil 4.4 ve 4.5'te esnek kaplamalarda yorulma hasarı ve tekerlek izi hasarına sebep olan faktörler özet olarak gösterilmiştir. Her değişken kendi içinde bireysel olarak değerlendirilerek kaplamaya vermiş olduğu hasar oranı değerlendirilmiştir. Her değişkenin hesaplamalardaki referans değeri olarak nominal değer kullanılmaktadır. Yani nominal değer 1 olunca referans değere eşit demektir, nominal değer 2 olunca hasar 2 katına çıkmış demektir.



Şekil 4.4. Esnek Kaplamalarda Yorulma Hasarına Etki Eden Faktörler (NHCRP, 1993)



Şekil 4.5. Esnek Kaplamalarda Tekerlek İzi Hasarına Etki Eden Faktörler (NHCRP, 1993)

Tablo 4.1’de ise, Şekil 4.4 ve 4.5’teki araç, lastik ve kaplama değişkenlerinin hasar oranlarını gösteren değer aralıkları ve nominal değerler görülmektedir (NHCRP, 1993).

Tablo 4.1. Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'daki Araç, Lastik ve Kaplama Değişkenlerinin Hasar Oranlarını Gösteren Değer Aralıkları ve Nominal Değerler (NHCRP,1993)

	Değer Aralığı	Nominal Değer
Araç Faktörleri		
AksYükleri	10-22 kips	18 kips
Aracın Brüt Ağırlığı	32-140 kips	80 kips
Aks Mesafesi	1.22-2.44 m	1.30 m
Tandem Statik Yük Paylaşım	Vük Dağılım Kats. 1,00-1,25	Optimum yük paylaşım
Hız	72-104 km/h	88 km/h
Tek Aks Süp. Tipi	Havali, Konik Yaprak, Düz Yaprak	statik yüklü durum
Lastik Faktörleri		
Aşırı Basınç	75-120 psi	85 psi
Çift ya da Geniş Tabanlı	Çift ve Geniş Tabanlı	Çift
Kaplama Faktörleri		
Pürüzlülük	4.25-2.5 PSI	Statik Yüklü Durum
Yüzey Sıcaklığı	25-49 Santigrat	25 Santigrat
Aşınma Kalınlığı	5-16 cm	12.5 cm
Temel Kalınlığı	10-28 cm	20 cm
Yol Tabanı Dayanımı	CBR=0.7-13.5	CBR=1.7

Örneğin statik aks yükü kaplama tabakasına diğer faktörlerin dışında bireysel olarak uygulandığında, yorulma hasarına en büyük etkiyi yapan faktör olduğu görülmektedir. Tablo 4.1'den statik aks yükleri için değer aralığı 10-22 kips (1 kips=0.454 ton), nominal değer ise 18 kips olarak görülmektedir. Şekil 4.5'de esnek kaplamalarda bu değerlerin ne kadar yorulma hasarı verdiği konusuna değinecek olursak; 10 kips ağırlığında dingil yükü değerinde hasar oranı 0,1, 18 kips (nominal değer) ağırlığında dingil yükü değerinde hasar oranı 1, 22 kips ağırlığında dingil yükü değerinde ise hasar oranı 2,2 olarak görülmektedir. Buradan çıkan sonuç dingil yükü ağırlığı 18 kips'ten 22 kips'e çıktığında hasar oranı 2,2 kat artmaktadır denilebilmektedir. Dingil yükü ağırlığının 10 kips'ten ile 22 kips 'e çıkması durumunda ise hasar oranının 22 kat arttığı görülmektedir. İşte bu sebeple yorulma hasarı ile tekil bir aks üzerindeki statik yük arasındaki ilişkinin exponansiyel olarak arttığı görülmektedir. Aynı değerleri lastik izinde oturma açısından değerlendirecek olursak; 10 kips'te hasar oranı 0,6, 18 kips'te hasar oranı 1, 22 kips'te ise hasar oranının 1,3 olduğu görülmektedir. Yani statik yük 2,2 katına çıktığında lastik izi hasar oranının da aynı oranda arttığı görülmektedir. Çünkü lastik izi statik dingil yükü ile lineer olarak ilişki içindedir.

4.3.1. Kaplama Hasarına Etki Eden Araçla İlgili Faktörler

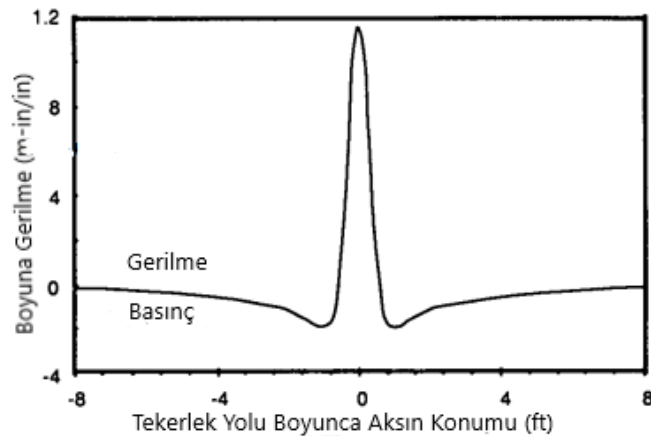
Kaplama hasarına etki eden araçla ilgili faktörler: Aracın aks yükü, brüt ağırlığı, akslar arası mesafesi, statik yükün akslara dağılımı, aracın süspansiyon tipi, aracın yaptığı manevralar, lastik tipi ve lastik basıncı olarak sayılabilir.

4.3.1.1. Aks Yükleri

Araçların kaplamaya verdiği hasarı belirlemek için kullanılan temel kavram Eşdeğer Standart Dingil Yüğü (ESDY)'dür. Bir araç ya da aks grubunun kaplama üzerinden geçtikten sonra kaplamaya verdiği hasar; ESDY'nin kaplamadan kaç kez geçtiğiyle yani tekrür sayısı ile belirlenmektedir. Aslında ESDY bir aracın ya da aks grubunun kaplamaya verdiği hasarı standartlaştıran tek kriter değildir. Mesela ağır bir aracın taşıdığı yük için; yükün ton başına kaplamaya verdiği hasar daha uygun bir hasar belirleme yöntemi olabilir. Ya da belirli bir araç konfigürasyonu için hasar bu araca göre standardize edilebilir. Ancak, ESDY araçların geçiş sayısına göre hasarı standartlaştırmak için kullanılan çok basit bir yöntemdir.

Yorulma çatlağını (fatigue cracking) etkileyen araç karakteristiklerini ele alırsak; esnek üstyapılardaki yorulma hasarını belirleme konusunda en çok etki eden faktörler maksimum dingil yükü ve kaplama kalınlığıdır. Diğer araç özellikleri daha küçük ama yine de önemli yorulma çatlaklarına sebep olabilmektedir.

Yorulma çatlağına araçla ilgili sebep olan temel değişken; en büyük yükü taşıyan dingilin ağırlığıdır. Diğer bir ifadeyle bir araç kombinasyonunda toplam yorulma hasarını tespit etmek için en önemli faktör ESDY'dir. Tipik bir aracın dingil yükü 4,5 ile 10 ton arasında değişebilmektedir. 10 ton dingil yüküne sahip bir aksın karayolu üstyapısından bir kere geçmesi ile 4,5 tonluk dingil yüküne sahip bir aksın 23 kez geçmesi karayolu üstyapısına eşdeğer miktarda hasar vermektedir. (NHCRP, 1993).

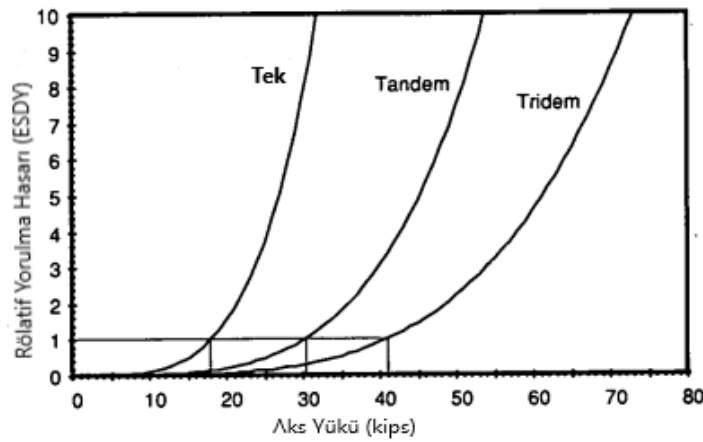


Şekil 4.6. Aks Yükünün Geçiş Esnasında Aşınma Tabakası Altında Oluşan Gerilme (NHCRP, 1993)

Yorulma hasarı ağırlıklı olarak aşınma tabakasının altında periyodik boylamasına gerilmeler sonucu oluşmaktadır. Şekil 4.6'da 5 inçlik aşınma tabakasının altında, tekil

aks geçtikçe oluşan tipik gerilme periyodunu gösterilmektedir. Yüklemenin yapıldığı noktadan 4 ft uzaklıkta, boyuna gerilmenin çok küçük miktarda olduğu görülmektedir.

Şekil 4.7’de ise tek, tandem ve tridem dingil yükleri için 5 inç kalınlığında kaplama tabakası için rölatif hasarın nasıl değişiklik gösterdiği görülmektedir. 20 kips ağırlığında tekil dingil yüküne sahip bir aks, 10 kips ağırlığında tekil dingil yüküne sahip bir aksa göre kaplamaya 16 kat fazla hasar vermekte olup, 18 kips tek dingil ağırlığındaki yükün 1 ESDY olarak belirlendiği, 36 kips tandem aksdaki yükün 2 ESDY’ye eşit olduğu görülmektedir.



Şekil 4.7. Esnek Üstyapılarda Aks Yüküne Karşılık Oluşan Rölatif Yorulma Hasarı (NHCRP, 1993)

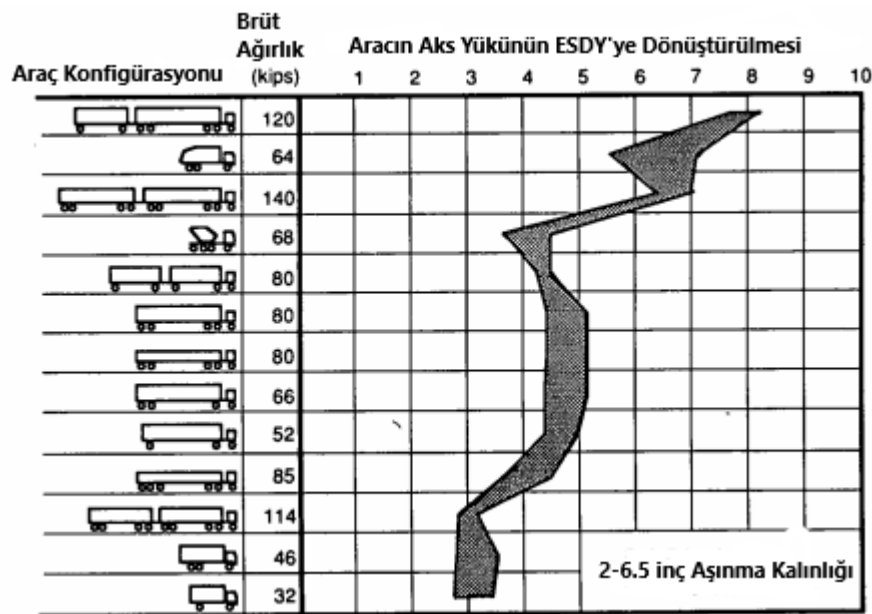
Tandem akslarda 30 kips, tridem akslarda ise 41 kips’in 1 ESDY değerine eşit olduğu görülmektedir. Bu bize, yükü birçok aksa yaymanın ve tekil aks yükünü düşük tutmanın belirgin şekilde esnek üstyapılarda yorulma hasarını düşürdüğünü göstermektedir.

4.3.1.2. Brüt Ağırlık

Brüt ağırlığın yorulma hasarıyla direkt olarak bir ilişkisi görülmemektedir. Yani yolu bozan temel etken aracın toplam ağırlığı değil, daha ziyade aks yüklerinin fazlalığıdır. Yüksek brüt ağırlığa sahip araçlar, yükün yeterli sayıda aksa üniform dağıtılması sağlandığında, karayolu üstyapısına verdikleri hasar tolere edilebilir seviyelere düşmektedir (NHCRP, 1993).

Şekil 4.8’de farklı tipteki araçların çeşitli aşınma tabakası kalınlıklarında esnek üstyapıya verdikleri yorulma hasarı gösterilmektedir. Her aracın aks yükünün statik değerlerinin bir kez geçişi sonucunda oluşan yorulma hasarı ESDY olarak görülmektedir. Göreceli hasar ince kaplama kalınlığında daha büyük olmakla birlikte,

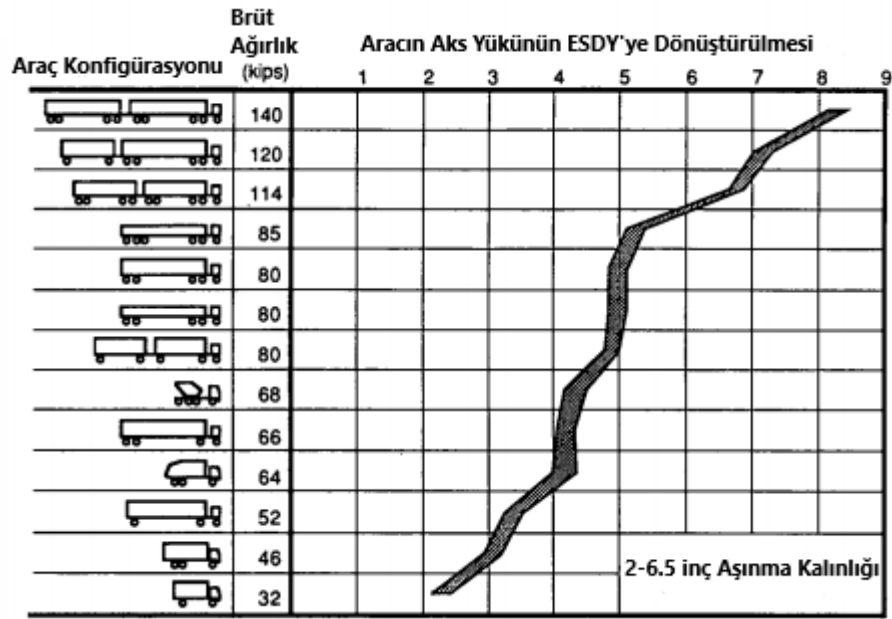
farklı kaplama tasarımlarında ise hasar büyüklüğü değişmektedir. Aracın brüt ağırlığının üstyapıya etkisinin daha iyi anlaşılması açısından şekilde üstten ikinci sıradaki 64 kips yüklü üç akslı araç, alttan üçüncü sıradaki dokuz akslı treylere göre karayolu üstyapısına iki kat daha fazla zarar vermektedir. Üç akslı aracın dingil yükleri, 20-22 kips olup, dokuz akslı aracın dingil yükleri ise aşağı yukarı 13 kips'tir. Görüldüğü üzere dokuz akslı treylere, üç akslı aracın nerdeyse iki katı brüt ağırlığa sahip olmasına rağmen, karayolu üstyapısına verdiği yorulma hasarı yaklaşık iki kat fazladır. Bu durum karayolu üstyapısına verilen hasarın aracın ve taşıdığı yükün fazlalığıyla değil, dingil yükünün fazlalığıyla orantılı olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.8. Farklı Tabaka Kalınlıklarında Araçların Brüt Ağırlığının Üstyapıya Verdiği Yorulma Hasarı (NHCRP, 1993)

Brüt ağırlık, lastik izi hasarına sebep olan ana etkidir. Şekil 4.9'da toplam araç ağırlığının lastik izi hasarına olan etkisini göstermektedir. Lastik izi derinliği ise en basit tabiriyle bir aracın tüm akslarının her birinin sebep olduğu lastik izi hasarlarının toplamıdır. Her ne kadar brüt ağırlık lastik izi hasarına birinci dereceden etki eden faktör olsa da, araçlarda kullanılan lastik tiplerinin değişkenlik göstermesi nedeniyle, lastik izi hasarına hangi tipte lastiğin hangi oranda sebep olduğu ile ilgili kesin bir oran verilememektedir. Şekilde araçların aks yüklerinin mükemmel düzgünlükteki bir yolda statik değerlerinin neden olduğu lastik izi derinliği gösterilmektedir. Lastik izi hasarının plastik deformasyona yol açan viskoelastik davranıştan kaynaklandığı farz edildiğinde, araçların brüt ağırlığı lastik izi hasarını etkileyen en önemli faktör kabul edilmektedir. Ancak, araçların brüt ağırlığını sınırlayarak lastik izi hasarı azaltılabilir sonucuna

varmak uygun değildir. Lastik izi hasarını azaltmak için, araç yüklerinin azaltılması durumunda, karayolunda taşınan yük miktarı azaltılamayacağından, daha fazla aracın karayolunda seyir etmesi sorunu ortaya çıkacaktır. Araç miktarının artması ise; araçların daralarının karayolundan daha fazla geçmesi sonucunu doğuracak ve lastik izi hasarına daha fazla sebep olacaktır. Bu sebeple taşınabilecek optimum miktardaki yükün karayolunda taşınması lastik izi hasarı açısından, yükün azaltılmasından çok daha etkili bir çözüm olacaktır.



Şekil 4.9. Farklı Tabaka Kalınlıklarında Araçların Brüt Ağırlığının Üstyapıya Verdiği Lastik İzi Hasarı (NHCPR, 1993)

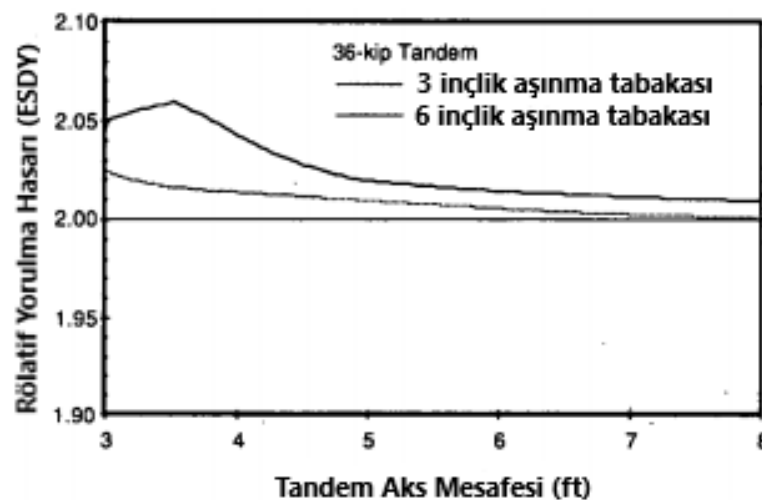
4.3.1.3. Aks Aralığı:

Aşırı yüklü araçların karayolunda seyretmesi; nakliyecilik sektöründe bir seferde daha çok yük nakledilebilmesine imkan tanıdığı için ekonomik olarak son derece avantajlı bir durum yaratmasına rağmen, karayolu ve köprüler için hasar oranlarını son derece fazla artırdığı için istenmemektedir. Aracın sahip olduğu eşdeğer dingil yükü iki katına çıktığında, karayoluna verdiği hasar on altı kata kadar çıkabilmektedir. Yani araç dingil yükü ile hasar oranı arasında eksponansiyel bir ilişki söz konusudur. Özellikle Amerika gibi ülkelerde araçların karayoluna verdiği hasar; her aks grubu için km başına aracın dingil yükünün karayoluna verdiği hasara göre ücret alınması nedeniyle, taşımacılıkta daha fazla aksa sahip araçlar tercih edilmekte ve aynı yükü daha fazla dingile sahip araçla taşıyarak aracın eşdeğer dingil yükünü azaltarak ödenecek ücretlerin azaltılması,

aynı zamanda da tek seferde daha çok yükün nakledilebilmesi amaçlanmaktadır (Everett, 2015).

Tandem aksların karayolu üstyapısı hasarına etkisiyle ilgili; tandem süspansiyonların bazı dezavantajları vardır. Statik yük dağılımındaki eşitsizlikler üstyapıya verilen hasar konusunda orantısızlığa sebep olmaktadır. Bunun yanı sıra farklı tipteki tandem akslar farklı dinamik yükler üretmektedir. Bazıları aşırı yüksek dinamik yükler üretmekte, bu dinamik yükler %50'ye varan oranda karayolu üstyapısında fazla hasara sebep olabilmektedir (Prozzie ve De Beer, 1997). Ancak SPMT gibi özel araçlarda bulunan hidrolik sistemler sayesinde yükün akslara eşit dağıtılması sağlanmaktadır.

Esnek üstyapılarda yorulma hasarı, farklı kaplama kalınlıklarında tandem aks aralığından neredeyse yok denecek kadar az etkilenmektedir. Çünkü kaplama yapısı, en üst tabakada, farklı akslar belirgin şekilde etkileşime girecek şekilde tepki vermedikleri için gerilmeleri yeterince dağıtmamaktadır. Şekil 4.10'da; 36 kip tandem aksın, aks aralığı değiştiğçe kaplamaya verdiği rölatif yorulma hasarının değişimi görülmektedir. Minimum teorik aks mesafesi olan 4 feet aralığında 3 inç'lik üstyapıda neredeyse hiç yorulma hasarı oluşmamaktadır. En olağandışı durum dahi incelendiğinde aks aralığının esnek üstyapılarda yorulma hasarını sadece %4 oranında değiştirebildiği görülmektedir. Bu sebeple aks aralığının esnek üstyapılarda yorulma hasarı üzerinde etkisinin yok sayılabileceği ve yorulma hasarının sadece bireysel akslar için incelenmesi gerektiği sonucunu doğurmaktadır. Aks mesafesi yüzeysel lastik izi hasarını ise hiç etkilememektedir (NHCRP, 1993).



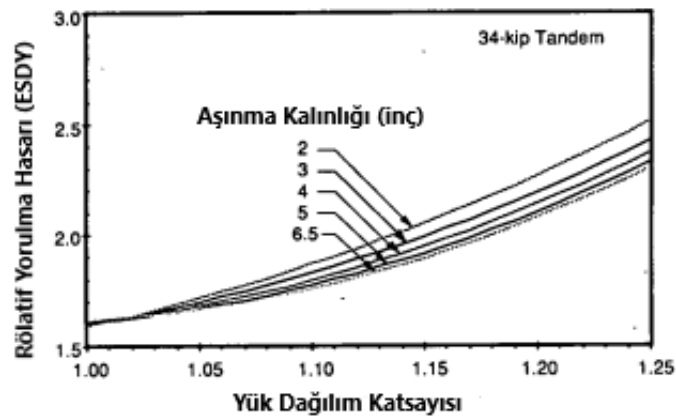
Şekil 4.10. Tandem Aks Mesafesinin Esnek Üstyapılarda Yorulma Hasarına Etkisi (NHCRP, 1993)

Yani akslar arasındaki mesafe üstyapı hasarını etkileyen önemli bir araç karakteristiği değildir.

4.3.1.4. Statik Yük Dağılımı

Yükün bir bölgede yoğunlaşması, aynı yükün daha geniş bir alana yayılmasına kıyasla, karayolu üstyapısına aracın dingil yükünün verdiği yorulma hasarını artırmaktadır (Everett, 2015).

Yük dağılım katsayısı (Load Sharing Coefficient-LSC) yükün mükemmel olarak dağıtıldığını gösteren bir birimdir. Ortalama ölçülen teker yükünün, bir akstaki toplam statik yükün o akstaki teker sayısına oranına bölünmesiyle bulunur. Bu oranın 1,0 olduğu durumda statik yük dağılımı mükemmeldir denilebilir. Ancak statik yük dağılımı normal yol şartlarında asla eşit olarak dağılmamaktadır. Çünkü statik yük dağılımı, akslar arası yük transferinin frenleme ve sürücü kaynaklı tork değişimleri (ani hızlanma ani yavaşlama) gibi sebeplerle değişkenlik göstermektedir (NHCRP, 1993).



Şekil 4.11. Yük Dağılım Katsayısı ve Aşınma Kalınlığının Esnek Üstyapılarda Rölatif Yorulma Hasarına Etkisi (NHCRP, 1993)

Statik yük paylaşımı, çoklu aks gruplarında yük paylaşımının eşit olmadığı, akslardan birinin yüksek miktarda yüke maruz kaldığı durumlarda yorulma hasarı ve lastik izi hasarına orta derecede sebep olmaktadır. Orantısız yük dağılımına sahip bir tandem aks setinde akslardan birindeki yük artışı fazlalaştıkça, yük ve hasar arasındaki eksponansiyel ilişkiden dolayı yorulma hasarının miktarı da bu ilişki paralelinde artacaktır. Eğer çoklu aks gruplarında tek akstaki fazla yük oranı ortalama aksa gelecek yükün %5'i dolaylarında ise yorulma hasarı çok küçük olacaktır. Ancak orantısızlık %25'ten fazla olursa, yorulma hasarı oranı %60 artacaktır. Statik yük paylaşımının

lastik izi hasarı konusunda neredeyse hiçbir etkisi yoktur. Çünkü lastik izi hasarı direk olarak aks yüküyle ilişkilidir (NHCRP, 1993).

Şekil 4.11’de çeşitli üstyapı kalınlıklarında 34 kip ağırlığındaki tandem bir aksın, yük dağılım katsayısı ile hasarın nasıl etkileşimde olduğunu göstermektedir. Hasar; daha ince üstyapı kalınlığında yük dağılım katsayısının artmasıyla daha hızlı artmaktadır. Statik yük dağılımındaki dengesizliğin lastik izi hasarı üzerinde etkisi yoktur.

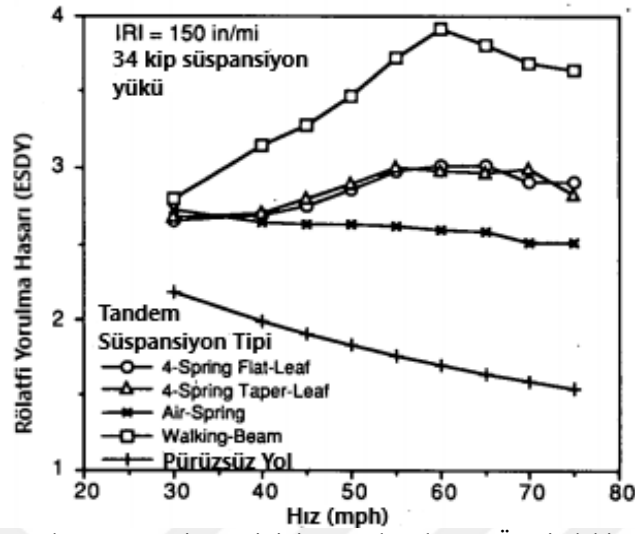
4.3.1.5. Hız

Hız, bir aracın dinamik faktörlerden kaynaklı esnek üstyapı hasarına neden olan en önemli faktörlerden biridir. Dinamik teker yükleri üzerinde hızın etkisi iyi anlaşılmalıdır. Bir aracın yoldaki düzensizliklerden kaynaklı dinamik reaksiyonunu düşünürken, hız ile yolun pürüzlülüğü birlikte değerlendirilmesi gereken iki faktördür. Aks mesafesi de bu iki değişkenle birlikte değerlendirilmelidir. Aracın dinamik faktörlerine bağlı girdiler (pürüzlülük, hız ve aks mesafesi) araçta titreşimlere ve teker yüklerinde dinamik çeşitliliğe neden olur. Eğer dinamik yükler lokal bir bölgede sürekli tekrarlanırsa (yani yolun pürüzlülüğünün artması, araçların hızlı seyrettiği bir lokasyon olması), bu bölge doğal olarak diğer lokasyonlara göre hızlı bir şekilde aşınmaya başlayacaktır. Hız esnek kaplamalarda tek başına ikincil etkiye sahip bir faktördür. Çok yüksek hızlarda kaplama tabakası tekerleğin yüküne daha kısa süreli maruz kaldığından, yorulma ve lastik hızı hasarı düşmektedir.

Esnek üstyapılarda yorulma hasarı, pürüzsüz yollarda hıza bağlı olarak azalmaktadır. Çünkü aks yükünün kaplamaya etki ettiği yükün süresi kısalmaktadır. Pürüzlü yollarda ise tam tersi etki yaparak hıza bağlı olarak yorulma hasarı artmaktadır. Yüksek hızlar yüke maruz kalma süresini kısaltmaktadır. Ancak aynı zamanda dinamik yükleri özellikle pürüzlü yollarda artırmaktadır.

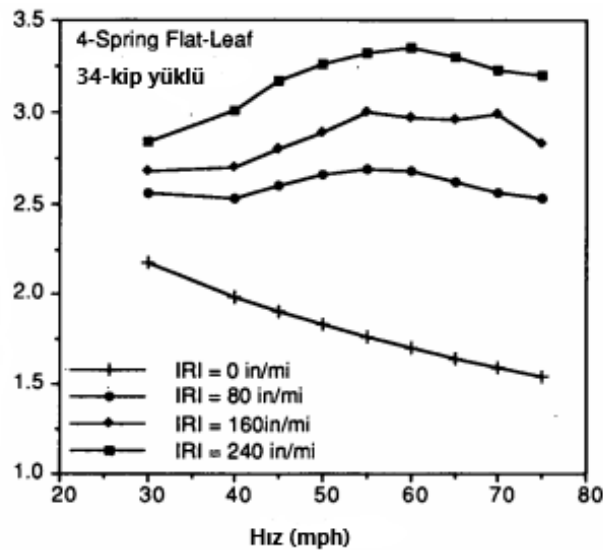
Şekil 4.12, 3 inç aşınma tabakası kalınlığında, biri tandem aks olmak üzere beş akslı bir yarı treylerin farklı süspansiyon tipleri için orta pürüzlülükteki (IRI=150 in/mi) bir yolda neden olduğu rölatif yorulma hasarını göstermektedir. Yorulma hasarı, eşdeğer dingil yükü koşullarına (18 kips ağırlığında aksın 55 mph hızla bir kez geçişi) göre gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere yolun pürüzsüz olduğu statik yüklem koşullarında rölatif hasar hıza bağlı olarak önemli ölçüde azalmaktadır. Ancak orta

derecede pürüzlü bir yolda dinamik yüklerin hıza bağlı artışıyla süspansiyon tipine de bağlı olarak bu azalma yerini artışa bırakmaktadır.



Şekil 4.12. Hız ve Tandem Süspansiyon Tipinin Yorulma hasarı Üzerindeki Etkisi (NHCRP, 1993)

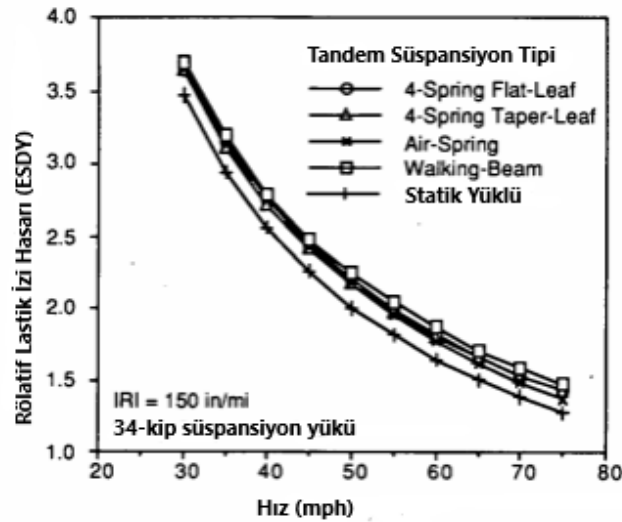
Şekil 4.13, beş akslı bir treylere ait bir süspansiyon tipinin dört farklı pürüzlülük durumlarında yola vereceği hasarı göstermektedir. Görüldüğü üzere yolda pürüzlülüğün olmadığı durumda aracın hızı arttıkça, yükleme zamanının daha kısa olması sebebiyle üstyapı viskoelastik davranış göstererek hasar oranı düşmektedir. Yolun az pürüzlü olduğu durumda ise hızın artmasıyla azalan hasar oranı, dinamik kuvvetlerin etkisiyle artarak birbirinin etkisini karşılamakta ve hasar oranı hıza bağlı olarak neredeyse sabit kalmaktadır. Pürüzlülüğün orta ve çok olduğu durumda ise yüksek hızlarda dinamik yüklerin artışıyla hasar oranının arttığı görülmektedir.



Şekil 4.13. Hız ve Yol Pürüzlülüğünün Rölattfi Yorulma Hasarı Üzerindeki Etkisi (NHCRP, 1993)

Lastik izi hasarının hıza göre değişimi; kaplamanın teker yüküne maruz kaldığı zamanla orantılıdır. Yüksek hızlarda teker bir noktadan daha hızlı geçtiğinde, plastik deformasyonun meydana gelmesi için geçecek süre kısalmakta ve deformasyon hızla ve teker yüküyle orantılı olmaktadır. Geçici deformasyon lastik iziyle karakterize edilmektedir. Çünkü dinamik yükler hesaba katılmamaktadır ve deformasyon kaplama boyunca üniform kabul edilmektedir. Dinamik yüklerin hesaba katılmasıyla iki farklı deformasyon biçimi meydana gelecektir. Birisi lastik izi hasarı nedeniyle kaplama boyunca oluşacak ortalama deformasyon, diğeri ise; belli noktalarda yüksek dinamik yükler sebebiyle oluşacak bölgesel deformasyon. Çoğu araç, yoldaki engebelerle ilişkili aynı noktalarda en yüksek dinamik kuvvetlerini uygulayacağından, oluşacak bu bölgesel deformasyon yol pürüzlülüğünün oluşumuna katkıda bulunacaktır.

Şekil 4.14'te farklı süspansiyon tiplerinde lastik izi hasarının (Rölatif lastik izi hasarlarının %95'i) hıza bağlı değişimi görülmektedir. Rölatif iz derinliği; 18 kip aks yüküne sahip 55mph hızındaki aracın neden olduğu iz derinliğidir. Grafikteki lastik izi hasarı statik yükün neden olduğu hasardır, yani dinamik etkiler yoktur. Hasar derinliği, kaplamaya lastiğin temas süresine bağlı olduğundan hıza bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Dinamik yüklerin lastik izi hasarına etkisi genellikle %5'ler mertebesindedir.

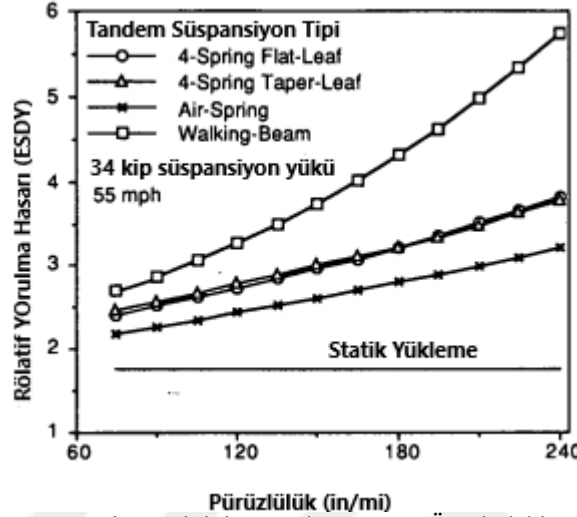


Şekil 4.14. Farklı Süspansiyon Tiplerinin Hıza Bağlı Olarak Lastik İzi Hasarına Etkisi (NHCRP, 1993)

4.3.1.6. Tek Aks ve Tandem Aks Süspansiyon Tipi

Araçların süspansiyon sistemleri, yükü aks grupları ve süspansiyon arasında dağıtarak, aracın dinamik yükünü etkileyen en önemli etmenlerden biridir. Aracın dinamik yükleri;

yolun pürüzlülüğü, aracın hızı, aracın süspansiyon tipi, lastiğin sertliği gibi etkilerle değişkenlik gösterir. İyi bir süspansiyon, dinamik yüklerdeki bu dalgalanmayı iyi şekilde sönmelimi ve akslar arasındaki yük dağılımını eşitleyebilmeli, bunun yanı sıra aracın kontrolünü kolaylaştırarak güvenli sürüşe yardımcı olabilmelidir (Everett, 2015).



Şekil 4.15. Tandem Süspansiyon Tipinin Yorulma Hasarı Üzerindeki Etkisi (NHCPR, 1993)

Araçların aks tipinin farklı olması yoldaki pürüzlülüğe bağlı olarak üstyapıya verilen hasar miktarında farklılıklar oluşmasına sebep olmaktadır. Araçlar statik haldeyken yorulma hasarı sabit olmaktadır, ancak araç karayolunda seyir halinde iken dinamik kuvvetlerin devreye girmesiyle üstyapıya verilen hasar miktarı artmaktadır. Şekil 4.15'de yol düzgünlüğüne bağlı olarak tek aks süspansiyon tipinin ve tandem aks süspansiyon tipinin yorulma hasarına etkisi görülmektedir. Grafikten de anlaşılacağı üzere yolun sıfır pürüzlülüğe sahip olduğu durumda aks tipinin yorulma hasarına herhangi bir katkısı olmayacaktır. Ancak yoldaki pürüzlülük oranı arttıkça akslardaki dinamik kuvvetlerin etki göstermeye başlamasıyla yorulma hasarı miktarında ciddi oranlarda artışlar meydana gelmektedir.

4.3.1.7. Araçların Manevraları

Araçların manevrası; akslar arasında yükü geçici olarak değiştirdiği için, yorulma hasarına sebep olmaktadır. Araç hızlanma esnasında arka akslara gelen yük değişimi miktarı fazla büyük olmamakta, bu nedenle yorulma hasarı da önemsiz miktarda olabilmektedir. Ancak, frenleme esnasında ön akslara gelen yük değişimi frenin şiddetine göre %100 ile %1000 aralığında lokalize yorulma hasarına sebep olmaktadır. Araçların frenleme, hızlanma ve viraj dönmeleri esnasında kaplama yüzeyi üzerinde

ilave gerilme artışları yaşanmaktadır. Hızlanma ve frenleme esnasında aracın ağırlığı yol boykesiti boyunca değişir. Viraj dönme esnasında ise yol enkesiti boyunca yanal olarak aracın ağırlığı değişir. Bu yüzden aracın hızlanma, yavaşlama ve viraj dönme gibi manevraları; kaplama üzerinde aracın teker yükünden dolayı oluşacak gerilmelerin değişmesine sebep olacaktır. Bu ilave kesme kuvvetlerinin kaplama hasarının artmasını hızlandırması kaçınılmazdır (NHCRP, 1993).

Lastik konfigürasyonu hususuna değinilecek olursa, ağır taşıtlarda kullanılan çeşitli lastik konfigürasyonlarından hasar konusunda en önemli olanı direksiyon tarafından kontrol edilebilen ağır yüklü akslardır. Tipik olarak 5,5 ton yük taşıyan direksiyonun kontrol ettiği tekil aks, çifttekerli 9 ton yük taşıyan bir aksa göre çok daha fazla yorulma ve lastik izi hasarına sebep olmaktadır. Direksiyonun kontrol ettiği tekil akstaki yük 5 ton ve altına indiğinde ise hasar miktarı büyük oranda azalmaktadır.

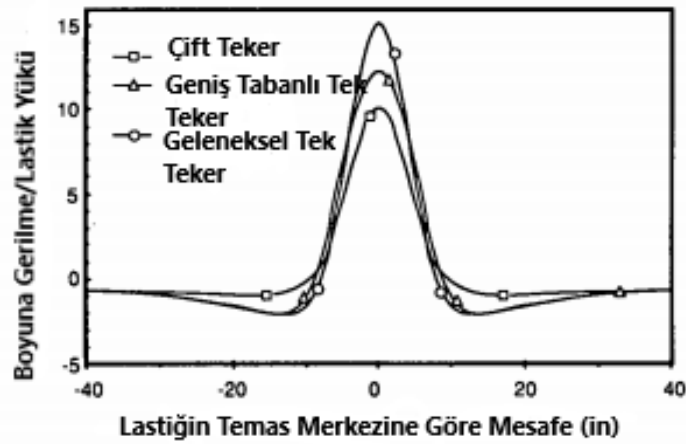
4.3.1.8. Lastik Tipi

Araçların lastikleri genellikle tek ve ikili olmaktadır. Manevrayı sağlayan ön aks tekli, treylerde arka akslar ve özel amaçlı taşıtlarda ise tüm aksların lastikleri ikili olmaktadır. Yükün belli bir limitin üstünde olduğu araçlarda ise manevrayı sağlayan ön aks geniş tabanlı tek lastik olabilmektedir. Lastik konfigürasyonunu karayolu üstyapısı açısından incelerken önemli olan husus; lastiğin tekli-çiftli olması, genişliği ve üstyapıya tutunduğu yüzey alanının büyüklüğüdür. Aracın yükü nedeniyle esnek üstyapıda oluşan hasarın temel sebebi lastik konfigürasyondur. Lastiğin üstyapıya temas ettiği yüzeydeki değişkenlikler, yüzey tabakasının altında oluşan en yüksek gerilme miktarını çok fazla etkilemektedir. Kaplamanın ömrünü tamamlamasının bu gerilme döngüsüyle eksponansiyel olarak ilişki içinde olduğu görülmektedir.

Şekil 4.16, 6,5 inç kalınlığında bir asfalt tabakasında, lastik tipindeki değişimin gerilme üzerinde tipik etkilerini göstermektedir. Tek lastik görüldüğü üzere en yüksek tepe çekme gerilmesine sahiptir. Çünkü en düşük temas yüzeyine sahiptir. Tek lastik çiftli lastiğe göre çok daha fazla yorulma hasarına sebep olmaktadır.

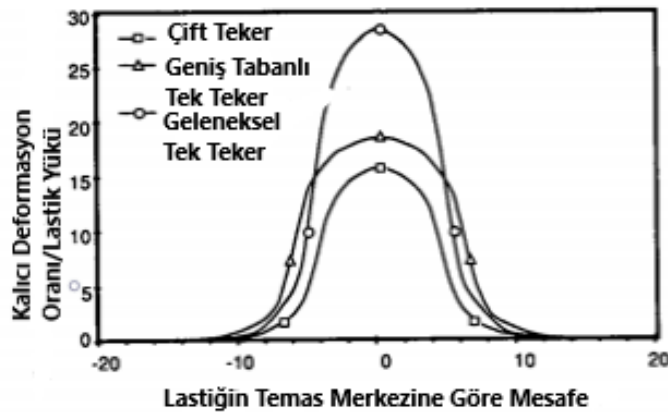
Esnek kaplamalarda lastik izi hasarı aks yüküne bağlı olduğu için lastik konfigürasyonu ile büyük ölçüde ilişkilidir. Lastik izi hasarı plastik deformasyon sonucu oluştuğu için yükün şiddeti ve yüke maruz kalma süresine bağlıdır. Lastik izi

hasarının miktarı, lastik izi derinliği ve yer değiştiren malzeme miktarına göre hesaplanmaktadır.



Şekil 4.16. Farklı Lastik Tipleri Sonucu Esnek Üstyapıda Oluşan Yorulma Hasarı (NHCRP, 1993)

Şekil 4.17’de 6,5 inç kalınlığında bir asfalt tabakasında, farklı lastik tiplerinin sebep olduğu lastik izi hasarı miktarları görülmektedir. Görüldüğü üzere aynı miktardaki yüke sahip tek tekerli aks, çift tekerli aksa göre yaklaşık iki kat hasara sebep olmaktadır. Çünkü çift tekerli aksta yük ikiye bölünmektedir. Ancak çift tekerli aksın lastiğin yola temas ettiği yüzeyden yanıl olarak daha uzak mesafeye kadar lastik izi hasarına sebep olduğu görülmektedir. Yani çift teker daha sığ lastik izi derinliğine sebep olmakta, ancak daha geniş bir alanda hasar etkisi görülmektedir.



Şekil 4.17. Farklı Lastik Tipleri Sonucu Esnek Üstyapıda Oluşan Lastik İzi Hasarı (NHCRP, 1993)

Geniş tabanlı tekerleğin çiftli tekerleğe göre üstyapı yüzeyinde, temel tabakası üzerinde ve taban zemini üzerinde daha yüksek defleksiyon değerleri ortaya çıkardığı görülmektedir. Doğal olarak oluşan defleksiyonlar arasındaki fark; üstyapı yüzeyinde, temel tabakası üzerinde ve taban zemini üzerinde oluşan farka göre daha yüksek olmaktadır. Bunun yanında yükten uzaklaştıkça defleksiyonlar arasındaki farkın

azalacağı açıktır. Günümüzde taşımacılıkta kullanılan araçlarda geniş tabanlı tekerlekler kullanılmaya başlamıştır. Geniş tabanlı tekerlerin çiftli tekerlere göre karayolu esnek üstyapılarda daha büyük bir zararlı etkiye yol açtığı görülmektedir. Bu durumda üstyapının proje ömrü azalacak ve ekonomik olarak beklenenden daha önce bir ekonomik yük doğacaktır (Saltan, Fındık, 2005).

Aşırı büyük yüklerin taşınmasında kullanılan özel amaçlı taşıtlar tasarlanırken tek teker ya da geniş tabanlı teker neredeyse hiç kullanılmamaktadır. Bunun yerine hep çift teker kullanılmakta böylelikle karayolu üstyapısına verilen hasarın azaltılması amaçlanmaktadır.

4.3.1.9. Lastik Basıncı

Araçların lastik basıncının artması sonucunda lastiğin kaplamayla olan temas yüzeyi azalacak, bu durum dingil yükünün kaplama üzerinde daha küçük bir alana etki etmesi anlamına gelecektir. Bu durum da doğal olarak kaplamanın yorulma hasarını artırıcı etki gösterecektir (Everett, 2015).

Lastik basıncının fazla olması, lastiğin dikey yöndeki sertliğini ve yola temas yüzeyini değiştirdiği için kaplama hasarını artırmaktadır. Lastik basıncındaki 10 psi'lik bir artış esnek kaplamalarda yorulma hasarını %50 oranında artırmaktadır. Lastik izi hasarı ise sadece çok az fazla lastik basıncı olduğu durumlarda artmaktadır. Lastik basıncının çok yüksek olması lastik izi hasarını etkilememektedir (NHCRP, 1993).

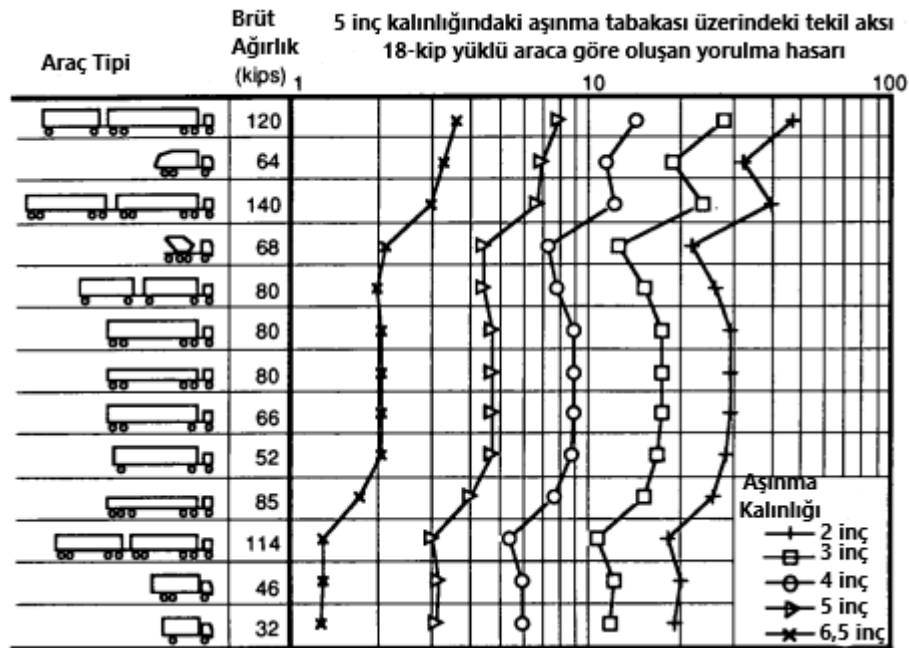
4.3.2. Kaplama Hasarına Etki Eden Yol ve Çevreyle İlgili Faktörler

Kaplama tasarımının ekonomikliği; yüksek ilk maliyet-yüksek sağlamlık (daha kalın kaplama tabakası) mı yoksa daha düşük sağlamlık (daha düşük kalınlıkta üstyapı tabakası seçimi)-daha yüksek bakım maliyeti mi arasındaki seçime göre değişmektedir. Ekonomiklik konusunda hangisinin tercih edileceği konusunda karar verilirken karayolu üstyapısına en büyük etkisi olan ağır taşıtlar aynı zamanda en kompleks problem olarak öne çıkmaktadır. İlk olarak hangi tipteki araçların karayolu üstyapısına en çok hasar verdiğinin iyi anlaşılması gerekmektedir. Bu bağlamda trafiğe çıkmasına izin verilen araçlar ne kadar rasyonel kategorize edilirse, yol tasarımının da hasara karşı direnci o kadar artırılabilir.

Kaplama hasarına etki eden yol ve çevreyle ilgili faktörler: Aşınma kalınlığı, temel-alttemel kalınlığı, taban zemini dayanımı, yüzey sıcaklığı ve pürüzlülüktür.

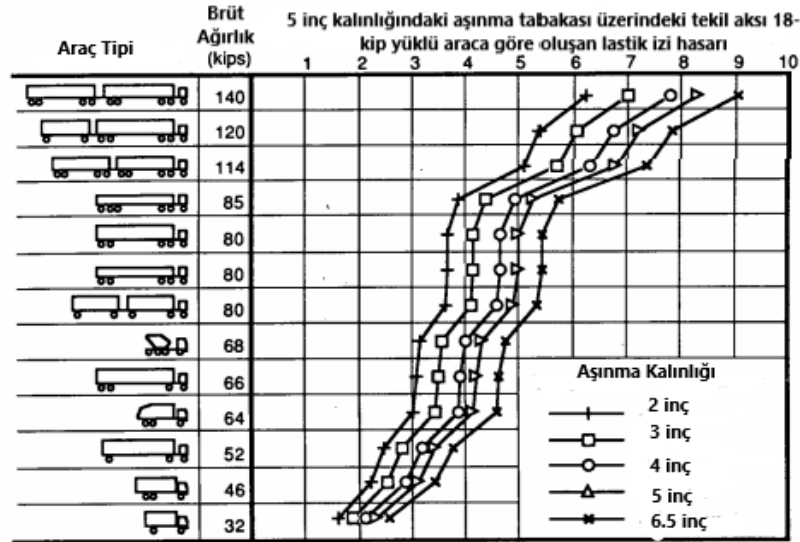
4.3.2.1. Aşınma Kalınlığı

Yorulma hasarı aşınma kalınlığına yüksek derecede bağlıdır. Şekil 4.18, bir esnek üstyapıda; farklı araç kombinasyonlarında her biri 18 kip aks ağırlığına sahip çift tekerli aksın farklı aşınma kalınlıklarında sebep olduğu yorulma hasarını göstermektedir. Mesela beş akslı treylerin 6,5 inç kalınlığında üstyapıya verdiği hasar, 2 inçlik üstyapıya verdiği hasarın yaklaşık 15'te 1'dir.



Şekil 4.18. Farklı Aşınma Kalınlılarında Esnek Üstyapıda Oluşan Yorulma Hasarı (NHCRP, 1993)

Büyük araç trafiği nedeniyle oluşan lastik izi derinliğinin seviyesi, aşınma tabakası kalınlığına göre önemli ölçüde değişmektedir. Yani 18 kip aks yükünün tek bir geçişi esnasında, 6,5 inçlik aşınma tabakasında, 2 inçlik aşınma tabakasına göre %40 daha fazla lastik izi derinliği oluşmaktadır. Bu daha kalın aşınma tabakasının daha fazla malzeme içermesi sebebiyle plastik akışa daha yatkın olmasıyla açıklanabilir. Bu durum Şekil 4.19'da farklı araç kombinasyonlarının farklı aşınma kalınlıklarında oluşan lastik izi derinliği daha açık şekilde görülebilmektedir. Burada sadece aşınma tabakasında oluşan plastik akış görülmektedir. Alttemel, temel ve taban zeminindeki değişimler görülmemektedir.



Şekil 4.19. Farklı Aşınma Kalınlıklarında Esnek Üstyapıda oluşan Lastik İzi Hasarı (NHCRP, 1993)

4.3.2.2. Temel ve Alttemel Kalınlığı:

Temel ve alttemel kalınlığının değişimi yorulma hasarı açısından asfalt tabakasına göre daha düşük derecede etkiye sahiptir. Çünkü bu tabakalar aracın lastiğinden asfalt tabakasına göre daha uzaktır ve direk olarak araç lastiğiyle temas halinde değildir ve asfalt tabakasına göre bir kaplamanın toplam dayanımına daha az katkıda bulunmaktadır. Lastik izi hasarı hususunda ise; araç trafiği bu tabakalarda çok küçük miktarda plastik akışa sebep olur. Alttemel temel kalınlığının plastik akış üzerinde etkisi çok küçük olmasına rağmen, daha kalın alttemel ve temel tabakası, taban zemininin kompaksiyonunun azalmasına yardım edecektir (NHCRP, 1993).

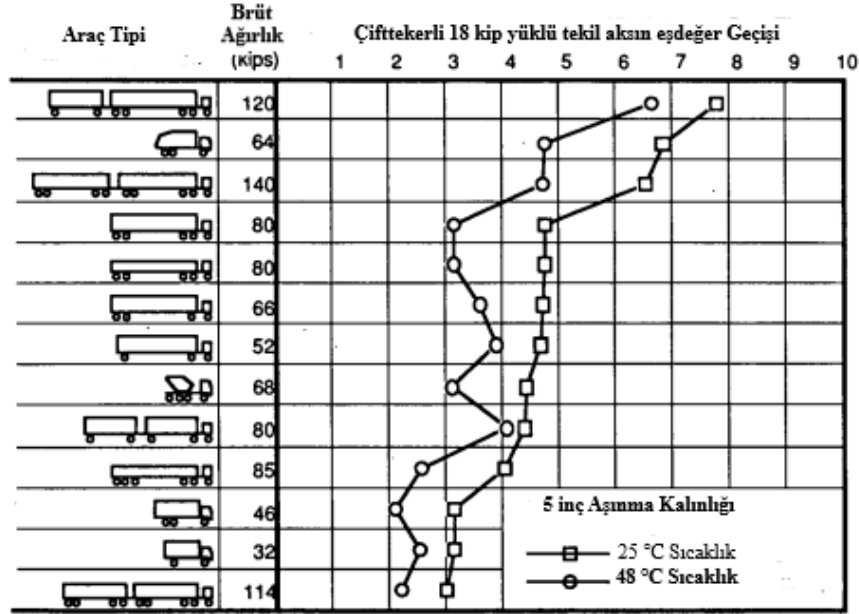
4.3.2.3. Taban Zemini Dayanımı:

Taban zeminin aşınma tabakasında oluşan gerilmelere etkisi çok küçük olduğu gibi, taban zeminin dayanımı da yorulma hasarı konusunda minimal etkiye sahiptir. Beklendiği gibi, daha ince asfalt tabakalarında, taban zeminin dayanımı yorulma hasarın konusunda daha fazla etkiye sahip olacaktır. Taban zemininin kompaksiyonunun artması ise yorulma hasarının oluşumuna daha yatkın bir durum oluşmasına sebep olacaktır.

4.3.2.4. Yüzey Sıcaklığı

Şekil 4.20, farklı araç kombinasyonları için yüzey sıcaklığının yorulma hasarı üzerinde etkisini göstermektedir. Yüzey sıcaklığının 48 °C olduğu her durumda yorulma

hasarının daha az olduğu görülmektedir. Çünkü yüksek ısılarda asfaltın kendini iyileştirebilme özelliği bilinmektedir. Bu sayede çatlakların oluşması ve gelişmesi daha düşük bir ihtimal olacaktır.



Şekil 4.20. Yüze Sıcaklığının Esnek Üstyapılarda Yorulma Hasarına Olan Etkisi (NHCPR, 1993)

Yüze sıcaklığının lastik izi hasarına etkisi ise yorulma hasarının tam tersidir. Yüze sıcaklığı arttıkça malzemenin plastik akış kabiliyeti artacağından, yüksek sıcaklıklarda lastik izi hasarı daha fazla olacaktır. Sıcaklık esnek kaplamaların özelliklerini, özellikle lastik izi hasarı konusunda, oldukça fazla etkilemektedir. Yüze sıcaklığının 25 °C'den 48 °C'ye çıkması hasar oranını 16 kata kadar artırmaktadır.

4.3.2.5. Pürüzlülük

Yol yüzeyinin pürüzlülüğü araçların dinamik davranışlarını artırarak hasarı da artırmaktadır. Uluslararası Pürüzsüzlük İndeksi (International Roughness Index-IRI) yol yüzeyinin düzgünlüğü için tüm dünyada kullanılan bir ölçüdür. Kaplamanın Servis Kabiliyeti (Present Serviceability Index-PSI) IRI ölçümlerinin en mükemmel olduğu durumda 5 kabul edilmektedir. Ancak hiçbir yol mükemmel şekilde düzgün olmadığından, pürüzsüzlükte asla sıfır olamamaktadır. Bu nedenle çoğu yolda PSI değeri 4,25 ile 2,5 arasında değişmektedir. En düzgün yollarda bile pürüzlülük var olduğu için yükün statik durumuna göre aracın yolda seyir etmesi kaplamaya verilen yorulma hasarını %50 oranında artırmaktadır. Daha pürüzlü yollarda ise yolun kaplama durumu ve aracın özelliklerine göre yorulma hasar oranı %200'den %400'e kadar

çıkabilmektedir. Yol yüzeyinin pürüzlülüğü arttıkça, aracın dinamik dingil yükleri artmaktadır. Bu durum yorulma çatlaklarında artmaya sebep olmaktadır. Mesela çoğu tipik kamyon süspansiyonu, servis kabiliyeti (PSI) 2,5 olan pürüzlü bir yolda, servis kabiliyeti 4,0 olan pürüzsüz bir yola göre karayolu üstyapısına yaklaşık %50 fazla hasar vermektedir. Hatta süspansiyonun tipine göre bu hasar üç katına kadar çıkabilmektedir (NHCRP, 1993).



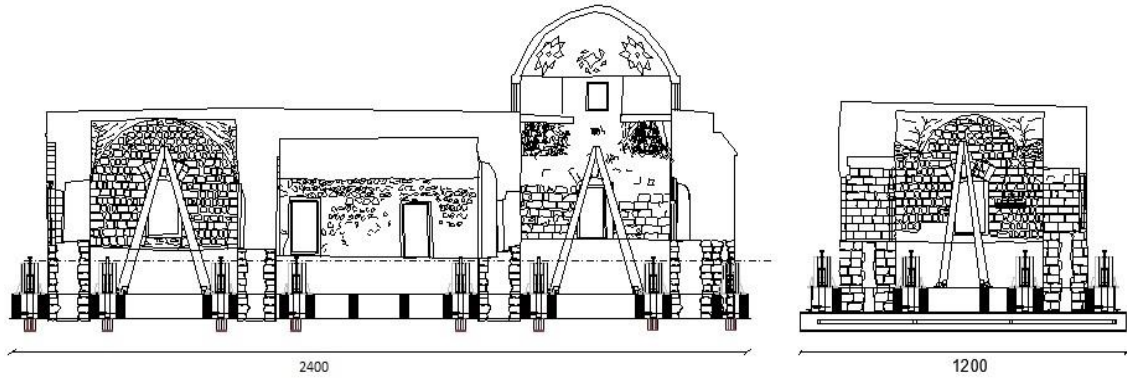
5. SPMT ÖRNEĞİ

Bu çalışmada Şekil 5.1’de görülen önemli bir yapının bir noktadan farklı bir noktaya taşınması işleminden esinlenilerek, karayolu standartlarına göre alışlageldik yüklerden farklı ağırlığa sahip bir yapının karayolunda nakledilmesi konusu ele alınmıştır. Öncelikle yapıyı taşıyabilecek SPMT seçilerek, SPMT’nin dingil yükünün Eşdeğer Standart Dingil Yüğü (ESDY)’ne dönüştürülmesi; halen ülkemizde ve dünyada en çok kullanılan karayolu üstyapı tasarım metodu olan AASHTO 1993 Üstyapı Tasarım Yöntemi kullanılarak gerçekleştirilerek, aracın standart dingil yüküne sahip bir araca göre dingil yükünün büyüklüğü hesaplanmıştır. SPMT’nin tek başına geçişi büyük çaplı bir trafik oluşturmadığından minimum üstyapı kalınlıkları kullanılmıştır. Mekanik-ampirik yöntemler üstyapı tasarımında son yıllarda giderek önem kazandığından; aracın karayolundan geçişi esnasında SPMT’nin aks yükünün, çiftteker arası mesafesinin ve lastik basıncı gibi araçla ilgili faktörler ile sıcak asfalt tabakasının özellikleri, granüler temel kalınlığı ve taban zemini dayanımı gibi yolla ilgili faktörlerin değişmesinin karayolu üstyapısında oluşacak hasara olan katkısı diğer değişkenler sabit tutularak incelenmiştir. Bunun için SPMT’nin belirlenen minimum üstyapı kalınlıklarından geçerken asfalt tabakası altında oluşacak maksimum yatay birim şekil değiştirme, taban zemini üstünde oluşan maksimum düşey birim şekil değiştirme ve üstyapıda oluşacak kalıcı oturma mekanik-ampirik yöntemle hesaplanarak, üstyapının ömrünü tamamlayacağı yük tekrar sayıları hesaplanmıştır.



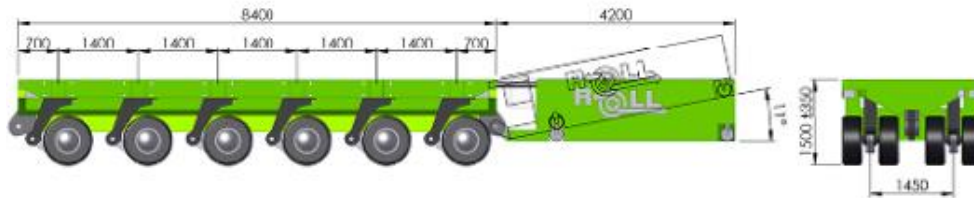
Şekil 5.1. Artuklu Hamamının SPMT Kullanılarak Taşınması.

Taşınacak yapı Şekil 5.2’de görüldüğü gibidir. Bu yapının ağırlığı 2200 ton, ebatları ise 22,0 m genişliğinde 10,0 m enindedir. Yapıyı bütün şekilde zarar vermeden kaldırabilmek için yapının etrafına bazı beton ve çelik ekipmanlar yapılmak zorundadır. Bu ekipmanların ağırlığı ise 400 ton’dur. Yapının ekipmanlı ebatları 24,0 m en, 12,0 m boy olmaktadır, toplam brüt ağırlığı ise 2600 tondur.



Şekil 5.2. SPMT ile Taşınacak Önemli Yapı

Bu ebat ve ağırlıktaki yükü taşıyacak SPMT’nin seçilmesi gerekmektedir. SPMT’ler 2, 4, 6 ya da 8 akslı modüler taşıyıcıların yükün ebat ve ağırlığına göre kombine edilmesiyle oluşturulmaktadır.



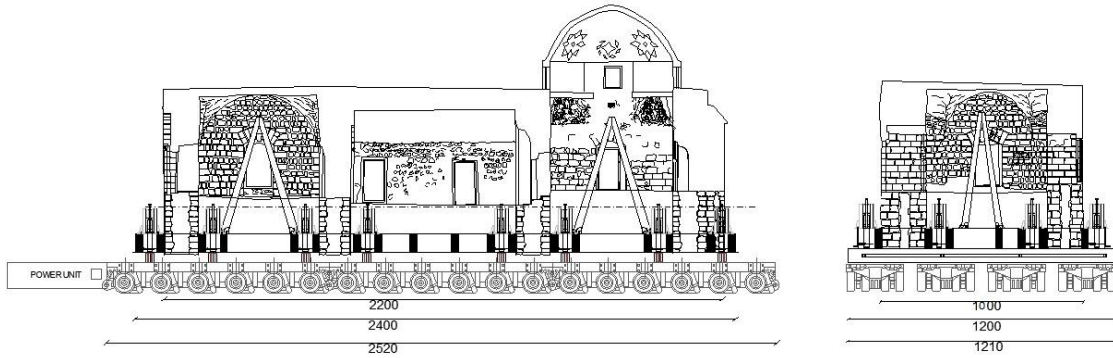
Self Propelled Modular Transporter: 6-axle PEKZ 210.12.4 (Poly)				
Reference travel speed	5km/h	3km/h	1km/h	0,5km/h
Payload, max. *	156,8T (190,8T)	168,8T (214,8T)	192,5T (262,8T)	216,5T (262,8T)
Deadweight, approx.	23,2T (25,2T)			
Admissible gross weight	180T (216T)	192T (240T)	216T (288T)	240T (288T)
Admissible axle load	30T (36T)	32T (40T)	36T (48T)	40T (48T)
Traction force at 400bar	4 x 60kN 240kN			
Brake force	6 x 55kN 330kN			

Power Pack Unit: Big	
PPU type	Z 350 DC
weight (with fluids)	7,2T
maximum axle lines	40

Şekil 5.3. Tipik Bir SPMT Modülünün Teknik Özellikleri (Aertssen, 2017)

Şekil 5.3’te tipik 6 akslı bir SPMT modülünün teknik özellikleri ve ölçüleri görülmektedir. Görüldüğü üzere 6 akslı bir SPMT modülü 8,40 m uzunluğunda, 2,43 m eninde, yaklaşık 24 ton ağırlığındadır. Her bir aksı yaklaşık 30 ile 40 ton arası yük taşıyabilmektedir. Yükteki bu farklılık aracın hızından kaynaklanmaktadır. Aracın hızı arttıkça taşıyabileceği yük azalmaktadır.

Taşınacak yapının uzunluğu 24 m (beton ve çelik temel ekipmanı dahil), genişliği 12m (beton ve çelik temel ekipmanı dahil) ve ağırlığı ise 2600 tondur. Bu yapıyı taşıyabilmek için 4 sıra (2,43m x 4 = 9,72m, modüller arasının yaklaşık 80'er cm olmasıyla 9,72 m + 2,40 m =12,10 m olmakta ve yapının eni sığmaktadır) ve her sırada 3 tane 6 akslı SPMT'nin arka arkaya eklenmesiyle (8,40m x 3 = 25,20 m uzunluğa erişerek yapının boyu sığmaktadır) toplam 72 akslı (6x4x3) bir SPMT seçilmiştir. 72 aks 2.200 ton ile 2.800 ton arası yükü taşıyabilmektedir. Yapının ağırlığı ise 2.600 ton olup, seçilen SPMT ile taşınabilecektir. Şekil 5.4'te görüldüğü üzere seçilen SPMT (4 sıra, her sırada 3 modül arka arkaya eklenmiş) yapının hem ebatlarını hem de ağırlığını taşıyabilecek kapasitededir.



Şekil 5.4. Önemli Yapının Seçilen SPMT ile Taşınması

6 akslı bir SPMT modülünün ağırlığı yaklaşık 24 tondur. 12 adet 6 akslı SPMT modülü kullanılacağı için 288 ton SPMT'nin toplam ölü ağırlığı olacaktır. 4 adet güç ünitesi kullanılacağından yaklaşık 30 tonluk güç ünitesinin de ilave edilmesiyle SPMT'nin toplam ölü ağırlığı yaklaşık 320 ton hesaplanmaktadır. Karayolu üstyapısının maruz kalacağı toplam yük SPMT ve yapının toplam ağırlığı olan 2.920 ton olarak hesaplanmaktadır.

5.1. AASHTO 1993 Tasarım Yöntemiyle Üstyapı Tasarımı Yapılması

SPMT modüllerinin her biri diğerinden bağımsız araçlar olduğu için bu taşıma işleminde 4 sıra SPMT yan yana kullanılacaktır. Her sırada 3 adet 6 akslı modül arka arkaya eklenmiş ve toplam 72 akslı bu araçla taşıma işlemi yapılacaktır. SPMT'nin toplam aks çizgisi sayısı 18, dört araç yan yana eklendiği için toplam aks sayısı 72, aks başına düşen yük ise; $2920/72=40,55$ tondur. SPMT'nin aks yükünü Eşdeğer Standart Dingil Yüküne (ESDY) dönüştürmek için öncelikle SPMT'nin DEF'i hesaplanmıştır, bunun için aşağıdaki AASHTO formülleri kullanılmıştır (Huang, 2004):

$$G_t = \log\left(\frac{4,2 - p_t}{4,2 - 1,5}\right) \quad (5.1)$$

$$\beta_x = 0,40 + \frac{0,081(L_x + L_2)^{3,23}}{(SN + 1)^{5,19} L_2^{3,23}} \quad (5.2)$$

$$\log\left(\frac{T_x}{T_{8,2}}\right) = 4,79 \log(18 + 1) - 4,79 \log(L_x - L_2) + 4,33 \log L_2 + \frac{G_t}{\beta_x} - \frac{G_t}{\beta_{18}} \quad (5.3)$$

T_x : t yıl sonunda x dingil yükünün tekerrür sayısı,

$T_{8,2}$: t yıl sonunda 8,2 ton standart dingil yükü tekerrür sayısı,

L_x : Tek dingil üzerindeki yük, kip (40,55 ton / 0,454 = 89,31 kip),

L_2 : Dingil kodu (tek dingil için 1),

p_t : Son servis kabiliyeti (2,0),

SN : Üstyapı sayısı,

$$\log_{10}(W_{t8,2}) = Z_R S_0 + 9,36 \log_{10}(SN + 1) - 0,20 + \frac{\log_{10}\left[\frac{\Delta PSI}{4,2 - 1,5}\right]}{0,40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5,19}}} + 2,32 \log_{10} M_R - 8,07 \quad (5.4)$$

$W_{t8,2}$ = t yıl sonunda 8,2 ton standart dingil yükü tekerrür sayısı,

ΔPSI = Proje hizmet yeteneği kaybı,

Z_R = Standart normal sapma (-0,524),

S_0 = Toplam standart sapma (0,45),

M_R = Tabakaların efektif esneklik modülü (6.350 psi),

5.1.1. Son Servis Kabiliyeti ve SN Üstyapı Sayısının Hesaplanması

Karayolunun son servis kabiliyeti önceki bölümde de bahsedildiği üzere üç faktöre bağlıdır: Trafik nedeniyle oluşan servis kaybı, zemin şişmesi nedeniyle oluşan servis kaybı ve donma kabarması nedeniyle oluşan servis kaybıdır. Servis yeteneğindeki toplam azalma şu şekildedir:

$$\Delta PSI = \Delta PSI_{\text{trafik}} + \Delta PSI_{\text{şişme}} + \Delta PSI_{\text{don kabarması}} \quad (5.5)$$

Burada;

ΔPSI = Hizmet yeteneği indeksindeki toplam azalma

$\Delta PSI_{\text{trafik}}$ = Trafik nedeniyle hizmet yeteneği indeksinde azalma,

$\Delta PSI_{\text{şişme}}$ = Taban zemini şişmesi nedeniyle hizmet yeteneği indeksinde azalma,

$\Delta PSI_{\text{don kabarması}}$ = Don kabarması nedeniyle hizmet yeteneği indeksindeki azalmadır.

SPMT'nin geçeceği yol il yolu kriterlerinde olduğu için son hizmet yeteneği endeksi $P_t=2,0$ alınarak; hizmet yeteneğindeki toplam azalma (ΔPSI) $4,2-2,0=2,2$ olarak bulunur. Şişme ve don kabarması nedeniyle hizmet yeteneği indeksindeki azalma ise aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$\Delta PSI_{\text{ş}} = 0,00335 \times V_R \times P_{\text{ş}} \times (1 - e^{-\theta t}) \quad (5.6)$$

$$\Delta PSI_{\text{d}} = 0,01 \times P_D \times \Delta PSI_{\text{max}} \times [1 - e^{-(0,02\phi t)}] \quad (5.7)$$

Burada;

V_R : Potansiyel düşey yükselme

$P_{\text{ş}}$: Şişme olasılığı

θ : Şişme oranı sabiti

P_D : Donma kabarması olasılığı

ΔPSI_{max} : Maksimum potansiyel servis kaybı

ϕ : Donma Kabarması oranını ifade etmektedir.

Şişme ve don kabarması nedeniyle hizmet yeteneğinde oluşan servis kaybının belirlenmesi için Tablo 5.1'deki değerler kullanılmıştır.

Tablo 5.1. SPMT'nin Geçtiği Karayolunun Oturduğu Taban Zemini Özellikleri (DSİ, 2016)

Plastisite İndeksi (PI)	14,6 ~ 30,6
Likit Limit	25,8 ~ 51,8
Doğal Su İçeriği	%3,2 ~ %16,1
Zemin Sınıfı	%62 Düşük Plastisiteli Kil (CL), %10 Çakıllı Silt (GM), %9 Kumlu Kil (SC), %7 Yüksek Plastisiteli kil(CH), %7 Kum (S), %5 Çakıllı Kil (GC)
Şişme Yüzdesi	0,01 ~ 0,68
200 no'lu Elek Altına Geçen Malzeme Oranı	%13 ~ %96

SPMT'nin geçeceği karayolundaki trafiğin hesaplanması için taşımanın yapılacağı bölgeye yakın olan il yollarındaki trafik verileri kullanılmıştır (KGM, 2017);

Tablo 5.2. Tasarımda Kullanılan Trafik Sayıları ve 8,2 Tonluk Eşdeğer Dingil Yükünün Hesaplanması

TRAFİK GRUPLARI		TREYL	KAMYON	OTOBÜS	TİCARİ TAŞIT	OTOMO	TOPLAM
YOGT sayım	2016	17	153	5	72	349	596
İlk trafik t_0 , $t_0 = t_{2016} (1+r)^t$	2019	19	172	6	81	393	671
Son Trafik t_{2036}	$r = \%4$	42	377	13	177	861	1.470
Proje Trafığı $0,4343 * [t_t - t_0 / \log(t_t/t_0)]$		29	261	9	123	597	1.019
TEF		4,1	2,9	3,2	0,6	0,0006	
Hesap Şer. Düş. Günlük (Eşitlik 3.18) $\eta=1, i=2$		30	189	7	19	1	246
$T_{8,2} = \text{Hes.Şer} \times t \times 365$		1.795.800					

$$T_{8,2}(t) = T_{8,2} * \left[\frac{(1+r)^t - 1}{r} \right] \quad (t \text{ yıl sonraki tasarım trafiği})$$

görülen yıllara göre tasarım trafiği hesaplanır.

Tablo 5.3. Yıllara Göre Tasarım Trafığı

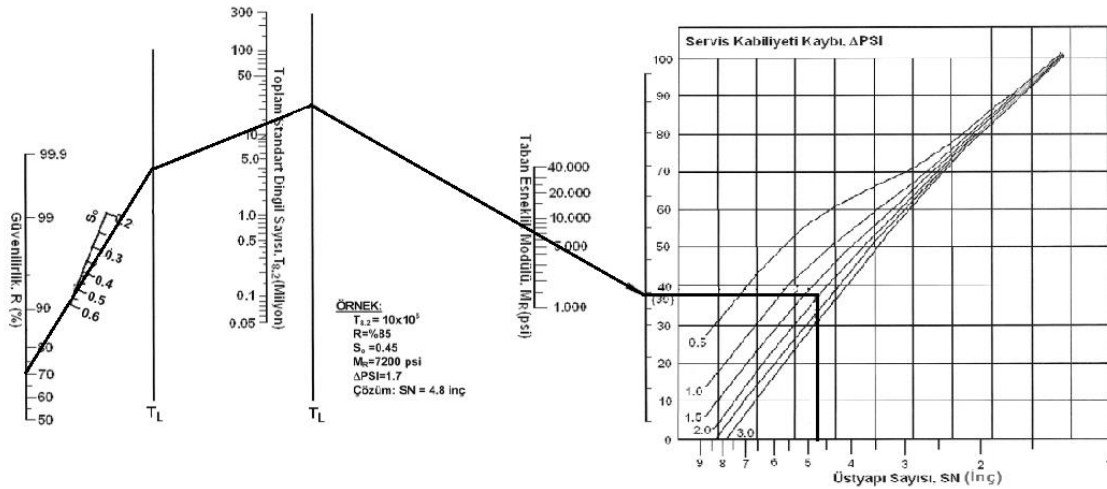
T (YIL)	$T_{8,2}(t) \times 10^6$
1	1,79
2	3,64
3	5,57
4	7,57
5	9,66
6	11,83
7	14,09
8	16,44

Donma kabarması ve zemin şişmesinden kaynaklanan hizmet yeteneği kaybı başlangıçta hızlı bir şekilde meydana gelirken, artış hızı zamanla tedricen azalmakta ve uzun bir süre sonra servis kabiliyeti kayıpları çok az oranda artmaktadır. Bu nedenle SN değeri daha büyük öneme sahip trafik etkilerinden kaynaklanan hizmet yeteneği kaybının dikkate alınmasıyla Tablo 5.4'te görüldüğü gibi bulunur.

Tablo 5.4. Proje Süresi ve SN sayısının Hesaplandığı İterasyon Tablosu

İterasyon No	Deneme Proje Süresi (yıl)	Donma ve şişme kaynaklı servis kabiliyeti kaybı ($\Delta PSI_{\delta,D}$)	Trafik Kaynaklı Servis Kabiliyeti Kaybı (ΔPSI_{TR})	Müsaade Edilir Toplam Trafik	Tekabül eden Proje Süresi (yıl)
1	20	0,55	1,65	9.835.619	5,1 yıl
2	10	0,42	1,78	11.236.281	5,6 yıl
3	8	0,37	1,83	11.838.482	6,6 yıl
4	7	0,34	1,86	12.206.877	6,8 yıl

Zemin şişmesi ve don kabarmasından dolayı hizmet yeteneğinde oluşan kayıp nedeniyle, performans periyodunda azaltma yapılarak, deneme-yanılma ile ideal performans periyodu tayin edilir. SPMT'nin geçeceği yol düşük trafik hacmine sahip olduğu için, güvenilirlik %70, toplam standart sapma 0,45, taban zemini esneklik modülü 6.350 psi değerleri Eşitlik 5.4'te yerine konularak iterasyon yoluyla müsaade edilebilir toplam trafik ve buna tekabül eden proje süresi bulunarak SN üstyapı sayısı 4,7 olarak hesaplanmıştır. Aynı sonuç Şekil 5.5'teki abak yardımıyla da bulunabilmektedir.

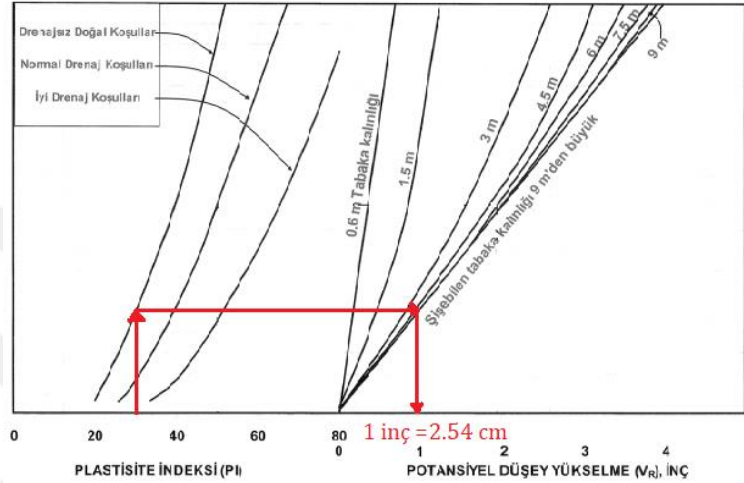
**Şekil 5.5.** Asfalt Betonu Kaplamalı Yollar İçin Proje Abağı (AASHTO, 1993)

Eşitlik 5.4 ile $SN = 4,7$, $\Delta PSI_{TR} = 1,86$ verileri kullanılarak, kabul edilebilir kümülatif trafik bulunmuştur. Buna tekabül eden performans periyodu ile tahmini performans periyodu arasındaki fark 1'den küçük olduğu için, performans periyodu süresi 7 yıl alınmıştır (Bu farkın 1'den büyük olması halinde, farklı performans periyodu tahminleri ile iterasyona devam edilmesi gerekmektedir).

Performans periyodunun 7 yıl olarak hesaplanmasının ardından donma ve zemin şişmesi nedeniyle hizmet yeteneğinde oluşacak kayıp hesaplanmıştır. Bunun için;

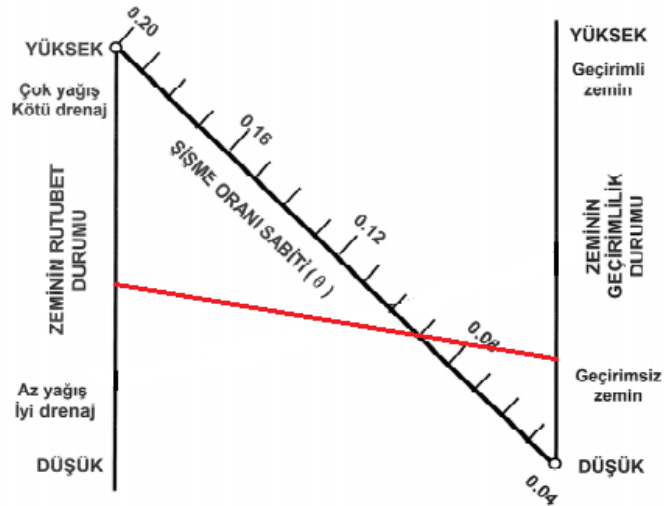
Şişme olasılığı (P_s); şişmeye duyarlı zeminlerin yol boyunca sahip oldukları uzunlukların yolun toplam uzunluğuna oranının yüzde cinsinden ifadesidir (KGM, 2006). Açılan araştırma çukurlarında karayolu güzergahında şişme olasılığının %1 ile %68 arasında değiştiği belirlenmiştir.

Potansiyel düşey yükselme (V_R); Şekil 5.6'daki abaktan 1 inç =2,54 cm olarak bulunmuştur.



Şekil 5.6. Potansiyel Düşey Yükselmenin (V_R) Bulunması (KGM, 2006).

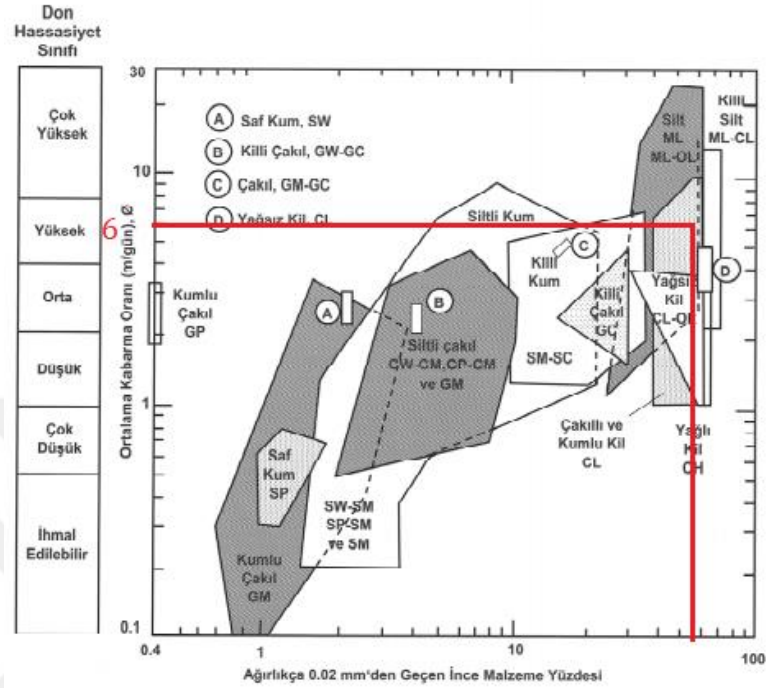
Şişme oranı sabiti (θ); Şekil 5.7'deki abaktan yararlanılarak 0.09 olarak belirlenmiştir.



Şekil 5.7. Şişme Oranı Sabitinin Tahmini (KGM, 2006).

Eşitlik 5.6'dan taban zemini şişmesi nedeniyle oluşan hizmet yeteneği indeksindeki azalma $\Delta PSI_s = 0,00335 \times 1 \times 68 \times (1 - e^{-0,09 \times 7}) = 0,11$ olarak bulunur.

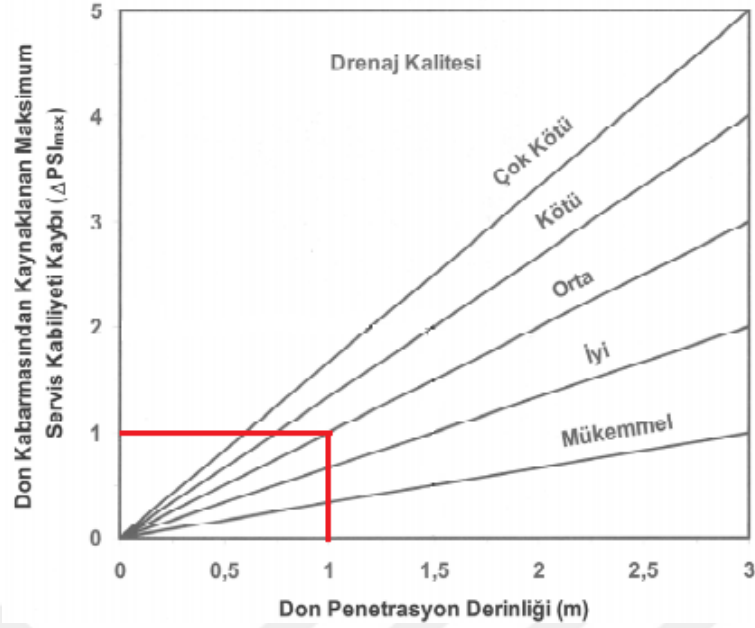
Donma Kabarması oranı (ϕ); milimetre cinsinden günlük hacimsel artış oranını (mm/gün) ifade eder. Zemin sınıfına ve ince malzeme yüzdesine bağlı olarak Şekil 5.8'deki abak yardımıyla bulunmaktadır.



Şekil 5.8. Donma Kabarması Oranının Bulunması

Maksimum Potansiyel Servis Kaybı (ΔPSI_{max}); drenaj kabiliyeti ve don penetrasyon derinliğine bağlı olarak Şekil 5.9 yardımıyla bulunur. Don penetrasyon derinliği Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından hazırlanan don indeksi ve don penetrasyon derinliği haritası yardımıyla tespit edilerek $\Delta PSI_{max} = 1$ olarak belirlenmiştir.

Donma kabarması olasılığı (P_D); yolun toplam uzunluğunun ne kadarında donma olabileceği tahminine göre bulunur. Dona duyarlı zeminlerin toplam yol uzunluğu içindeki yüzdesi, suyun mevcudiyeti, drenaj kabiliyeti ve don penetrasyon derinliği gibi faktörler bu tahmin yapılırken gözönünde bulundurulur (KGM, 2006).



Şekil 5.9. Maksimum Potansiyel Servis Kabiliyeti Kaybının Bulunması

Eşitlik 5.7'den Don kabarması nedeniyle hizmet yeteneği indeksindeki azalma $\Delta PSI_d = 0,01 \times 40 \times 1 \times [1 - e^{-(0,02 \times 6 \times 7)}] = 0,23$ olarak bulunur.

Servis yeteneğindeki toplam azalma (ΔPSI); Eşitlik 5.5'ten;

$\Delta PSI = 1,86 + 0,23 + 0,11 = 2,20$ olarak bulunur.

5.1.2. Eşdeğer Standart Dingil Yüğü Tekerrür Sayısının Bulunması

Bulunan başlangıç SN değeri (4,7) kullanılarak, Eşitlik 5.1, 5.2 ve 5.3'teki denklemler çözümlenerek;

Son servis kabiliyeti (p_t) 2,0 alınarak $G_t = -0,08894$ bulunur. β_x ise; $L_x = 40,55 / 0,454 = 89,3172$ kips, $L_2 = 1$ kips kullanılarak 20,47395 olarak hesaplanır. $\beta_{18} = 0,530578$, $T_x / T_{8,2} = 0,000927$ olarak bulunur.

Dingil eşdeğerlik faktörü (DEF);

$$DEF = \frac{T_{8,2}}{T_x} \quad (5.8)$$

şeklinde dir. Buradan $DEF = 1.079,04$ olarak bulunur.

DEF belirlendikten sonra, TEF aşağıdaki formül yardımıyla hesaplanmaktadır (Carvalho, 2006):

$$TEF = \sum_i (p_i \times DEF_i) \times A \quad (5.9)$$

Burada;

p_i = i yük grubunun tekerrür sayısı

DEF = Dingil Eşdeğerlik Faktörü

A = Araç başına ortalama aks sayısını ifade etmektedir.

TEF=1x1.079,04x18=19.422,72 olarak bulunur.

Taşıt Eşdeğerlik Faktörünü, 8,2 ton Eşdeğer Standart Tekil Dingil Yüğü Tekerrür Sayısına dönüştürmek için;

$$T_{8,2} = T_p \times TEF \times \frac{\eta}{i} \quad (5.10)$$

Burada;

$T_{8,2}$ = Proje süresi boyunca yoldan geçecek hesap şeridine düşen toplam standart dingil yüğü tekerrür sayısı

T_p = Yoldan proje süresi boyunca geçecek toplam trafiktir. Bu değer 1 alınmıştır.

η = Hesap şeridi faktörü (Tablo 3.6'dan 1,0 olarak kullanılmıştır),

i = Trafik yönü sayısı (1), formülü kullanılır.

Değerlerin yerine konulmasıyla $T_{8,2}$; toplam standart dingil yüğü tekerrür sayısı 19.422,72 bulunur.

5.2. Mekanik-Ampirik Tasarım Yöntemi Kullanılarak Üstyapı Hasarının Hesaplanması

Ülkemizde ve dünyada halen en çok kullanılan tasarım metodu olan AASHTO 1993 Tasarım yöntemi kullanılarak SPMT'nin geçeceği karayolunun üstyapı kalınlıkları hesaplanmıştır. AASHTO 1993 Tasarım Yöntemi halen en çok kullanılan metod olmasına rağmen, son yıllarda Mekanik-Ampirik Tasarım Yöntemi kaplama tasarımında ampirik yöntemlere göre giderek daha güçlü bir metod olmaya başlamıştır. Bu metod

kaplama yapısında yorulmaya sebep olan yük tekrarı sayısı ile, kaplama yapısında oluşan gerilmeler arasında ilişki kurmaktadır. Kaplama hasarını tanımlarken iki tip hasar çeşidi kullanılmaktadır. Birincisi, kaplama yüzeyinde %20 oranında yorulma çatlama sebepleri olan minimum yük tekrar sayısı, diğeri ise 12,5 mm derinliğinde teker izine sebep olan minimum yük tekrar sayısıdır (Tjan and Fung, 2005).

Aks yükleri nedeniyle yüzey tabakasının altında oluşan maksimum yatay birim şekil değiştirme, çatlama neden olan yük tekrar sayısını belirlemek için kullanılmıştır. Bu yük tekrar sayısı, kaplamanın yorulma ömrü olarak tanımlanmaktadır. Aks yükleri nedeniyle oluşan yatay çekme gerilmesi esnek tabakanın altında oluşmaktadır. Lastiklerin hemen altında oluşan basınç, esnek üstyapının yanal olarak genişlemesine yol açmaktadır. Bu genişleme sonucunda lastiklerin arasında sıkışan üstyapı birbirini itererek yüzeyde kendisini sınırlayan bir kuvvet olmadığı için dikey olarak yukarı doğru genişlemektedir. İşte bu durum esnek üstyapı tabakasında maksimum gerilme ya da basınca göre yorulma çatlama ya da lastik izi hasarına sebep olmaktadır (Khanal ve ark., 2016).

Aracın geçişi esnasında aks yüklerinin kaplama tabakasında ve taban zemini üzerinde yarattığı gerilmeler kaplamada aşağı doğru defleksiyon (oturma) oluşmasına sebep olmaktadır. Taban zemini en düşük sağlamlığa sahip tabaka olduğu için, düşey basınç gerilmesi genellikle taban zemininin hemen üstünde oluşmaktadır (Khanal ve ark., 2016).

AASHTO 1993 Tasarım Metodunda SPMT'nin yüküne göre ESDY hesaplaması yapılarak, bu tekerrür sayısına göre üstyapı kalınlıkları belirlenmiştir. Mekanik-Ampirik Tasarım Yönteminde ise üstyapı kalınlıkları başlangıçta projeci tarafından öngörülerek, karayolundan SPMT geçtiğinde oluşacak gerilmeler ve deformasyon Sonlu Elemanlar Metodu (SEM) kullanılarak hesaplanıp, yapılacak analizlerde belirlenen kalınlıkta bir üstyapının ömrünü tamamlayacağı yük tekrar sayısı bulunmaktadır. Kaplamanın deformasyona bağlı bozulmasında kullanılan çatlaklar ve lastik izi derinliğinin hesaplanmasında aşağıdaki formüller kullanılmaktadır. Bu formüller Asfalt Enstitüsü tarafından 1982 yılında geliştirilerek lastik izi ve yorulma hasarının tespiti için kullanılmıştır (Chen ve Ark., 2012):

$$N_f = f_1 (\varepsilon_t)^{-f_2} (E_1)^{-f_3} \quad (5.11)$$

$$N_d = f_4 (\varepsilon_z)^{-f_5} \quad (5.12)$$

Burada;

N_f = Kaplama tabakasında %20 yorulma çatlamasına neden olan yük tekrar sayısı,

ε_t = Asfalt tabakasının altında çekme kuvveti nedeniyle oluşan maksimum yatay birim şekil değiştirme,

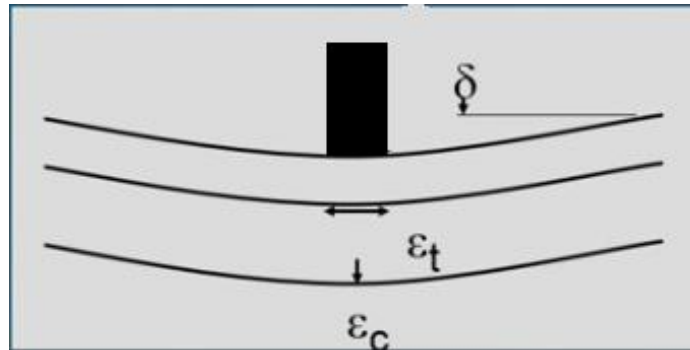
E_1 = Asfalt tabakasının elastisite modülü,

N_d = Kaplama tabakasında 12,5 mm kalıcı oturmaya sebep olan yük tekrar sayısı,

ε_z = Taban zemini yüzeyinde basınç kuvveti nedeniyle oluşan maksimum birim şekil değiştirme,

f_1, f_2, f_3, f_4, f_5 = Asfalt Enstitüsü ve Shell tarafından belirlenen faktörler (Tablo 5.5).

Şekil 5.10'da asfalt tabakasında çatlak oluşmasına sebep olan maksimum yatay birim şekil değiştirme, 12,5mm derinliğinde kalıcı oturmaya sebep olan düşey birim şekil değiştirme ve defleksiyon (oturma) görülmektedir. Aks yükleri kaplama tabakası üzerinde kaplama dizaynı için çok kritik iki farklı gerilmeye neden olmaktadır. Birincisi esnek tabakanın altında meydana gelen yatay çekme gerilmesi (σ_t), diğeri ise taban zemini tabakasının üstünde oluşan düşey basınç gerilmesidir (σ_z). Eğer yatay çekme gerilmesi (σ_t) çok fazlaysa yüzey tabakasında çatlaklar oluşacak ve kaplama yorulma hasarı nedeniyle bozulmaya uğrayacaktır. Eğer düşey basınç gerilmesi (σ_z) çok fazlaysa, kaplama yapısında kalıcı oturmalar oluşacak ve kaplamada lastik izinde oturma hasarı oluşacaktır (Gupta ve ark., 2014).



Şekil 5.10. SPMT'nin geçişi esnasında gerilmeler sonucu oluşan maksimum birim şekil değiştirmeler (ε) ve kalıcı oturma (δ)

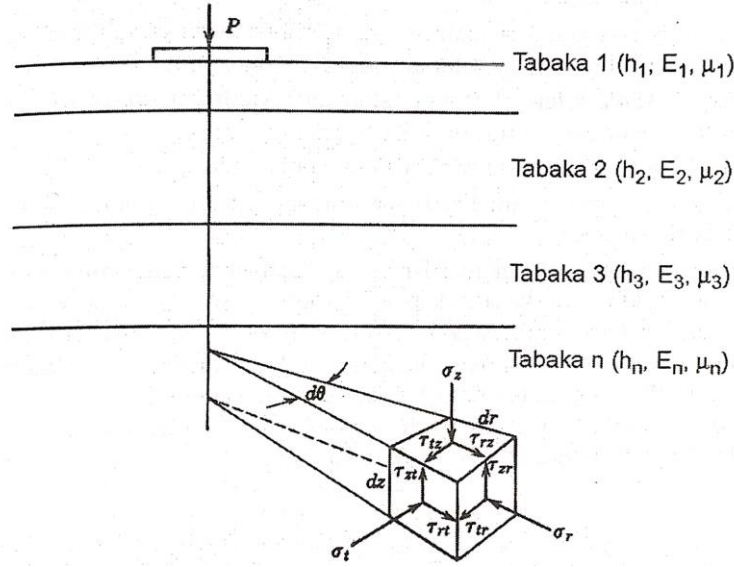
Tablo 5.5. Asfalt Enstitüsü ve Shell Tarafından Belirlenen Faktörler

	Asfalt Enstitüsü	Shell
f_1	0.0796	0.0685
f_2	3.291	5.671
f_3	0.854	2.363
f_4	1.365×10^{-9}	6.15×10^{-7}
f_5	4.477	4.000

Tablo 5.5'te ise Eşitlik 5.11 ve 5.12'de kullanılan sabit katsayıların Asfalt Enstitüsü ve Shell tarafından belirlenen değerleri görülmektedir.

Karayolu esnek üstyapısında %20 yorulma çatlağı ve 12,5 mm kalıcı oturma oluşmasına sebep olan yük tekrar sayılarını hesaplayabilmek için karayolu üstyapısında oluşan gerilmeler ve birim şekil değiştirmelerin hesaplanması gerekmektedir. Bunun için esnek üstyapı tabakasının yapısının iyi anlaşılması gerekmektedir.

Esnek kaplamalar çok tabakalı bir yapı olduğundan dolayı teorik gerilme ve deformasyon analizlerinde her bir tabaka homojen (her yerde aynı), her bir tabaka isotropik (her yönde aynı), her bir tabaka elastik, her bir tabaka arasında tam bir sürtünme olduğu gibi bir takım kabuller yapılmaktadır. Bu kabullere göre kaplamada herhangi bir elemana etki eden düşey (σ_z), radyal (σ_r) ve teğetsel (σ_t) olarak üç adet gerilme; $\tau_{rt} = \tau_{tr}$, $\tau_{rz} = \tau_{zr}$, $\tau_{tz} = \tau_{zt}$ olarak altı adet kayma gerilmesi mevcuttur. Bu gerilmeler Şekil 5.11'de görülmektedir (Tunç, 2004).



Şekil 5.11. Çok Tabakalı Sistemlerde Gerilmeler (Yoder ve Witczak, 1975)

Bu kabullerin neden yapılmak zorunda olduğu hususuna gelinecek olursa; Şekil 5.11’de görülen herhangi bir elemanın üç eksenli gerilme şartlarındaki deformasyonlarının analizi için her bir tabakanın elastisite modülü (E), ve poisson oranı (μ) gereklidir. Dolayısıyla kaplamanın teorik analizleri çok karmaşık hatta imkansız bile denilebilir. Çünkü;

- Asfalt ve asfalt bağlayıcılı karışımlar ısı ve yükleme hızına bağlı olarak elastisite modülleri ve poisson oranları değişken olup sabit bir değeri yoktur.
- Zeminin su içeriğine ve donma durumuna göre elastisite modülü değişken olup sabit bir değeri yoktur.
- Bağlayıcısız granüler malzeme su içeriğine bağlı olarak içsel sürtünme açısı değiştiğinden dolayı sabit bir elastisite modülü yoktur.
- Asfalt bağlayıcılı karışımların Hook cismi gibi gerilme-deformasyon ilişkileri lineer değildir.
- Trafik yükleri ve çevre şartları sürekli değişkendir.
- Esnek kaplamalar tam elastik malzemeler olmadığı gibi tam homojen oldukları da söylenemez.

Bu nedenlerden ötürü elastik teoriler ile yapılacak analizler tam doğru sonuçlar vermeyecek olup, kaplamadaki gerilme ve deformasyonların Boussinesq teorisi gibi (kaplamanın tek tabakalı, homojen, isotropik ve elastik, ayrıca trafik yükünün tekil yük olduğu) bir takım kabullere dayalı olarak hesaplanması mümkün olacaktır. Ayrıca

kaplamaya etki eden teker yükü tekil yük olmayıp dairesel veya eliptik dikdörtgen şeklindedir (Tunç, 2004).

Klasik zemin mekaniğinde olduğu gibi Boussinesq teorisi ile tek tabakalı esnek üstyapılarda tekil yükten dolayı zeminde oluşan gerilmeler ve oturmalar bir takım kabullere dayalı olarak hesaplanabilmektedir. Burmister tarafından geliştirilen abaklar ve katsayılar yardımıyla ise iki ve üç tabakalı sistemlere ait gerilmeler ve birim şekil değiştirmeler hesaplanabilmektedir. Bunlara ilave olarak ELSYM5, BISARA10, CHEVRON, BISAR, STRESS, CIRCLY4, SPDM-PC, JULEA, APSDS, LEDFAA, KENPAVE vb. gibi bilgisayar programları yardımıyla mekanik kaplama analizleri yapılabilmektedir (Tunç, 2004).

Esnek kaplamalar çok tabakalı olduğundan dolayı homojen olmayan yapıdadır. Bu nedenle Burmister analizi çok tabakalı esnek kaplamalar için daha uygundur. Çünkü Burmister analizi ile iki veya üç tabakalı esnek kaplamalardaki gerilmeler ve birim şekil değiştirmeler hesaplanabildiği gibi mekanik analiz yapan birtakım bilgisayar programları ile beş hatta on tabakalı esnek kaplamalar için de kullanılabilir. Burmister analizinde;

- Her bir tabaka sahip olduğu elastisite modülü (E) ve poisson oranı (μ) ile tanımlanabilir.
- Her bir tabaka homojen, isotropik ve elastik özelliğe sahip,
- Her bir tabaka ağırlıksız ve sonsuz uzunluğa sahip,
- Her bir tabaka belirli bir kalınlığa (h) ama zemin sonsuz kalınlığa sahip,
- Kaplamaya a yarıçapına sahip bir dairesel alan üzerinde üniform yayılı basınç (q) etkidiği,
- Tabakalar arasındaki ara yüzeyin sürekli (yani tabakalar arasındaki sürtünme direncinin kayma direncinden daha büyük olduğu)

gibi bir takım kabuller yapılmaktadır. Burmister analizinde esnek kaplama asfalt tabakası, granüler temel tabakası ve zemin olmak üzere üç tabakalı bir sistem mevcut olup, dairesel yükün ekseninde olmak üzere tabakaların ara yüzeylerinde düşey gerilme (σ_z) ve radyal gerilme (σ_r) oluşmakta fakat kayma gerilmesi (τ) oluşmamaktadır (Tunç, 2004).

Üç tabakalı sistemlerin analizinde birçok yaklaşım mevcuttur. Jones yaklaşımında k_1 , k_2 , A ve H oranları aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır:

$$k_1 = \frac{E_1}{E_2}, \quad k_2 = \frac{E_2}{E_3}, \quad A = \frac{a}{h_2}, \quad H = \frac{h_1}{h_2} \quad (5.13)$$

Burada E_1 ve E_2 ; birinci ve ikinci tabakaların ama E_3 ise zeminin elastisite modülünü ifade etmektedir. Gerilmeler ise;

$$\sigma_{z1} - \sigma'_{r1} = \frac{\sigma_{z1} - \sigma_{r1}}{k_1}, \quad \sigma_{z2} - \sigma'_{r2} = \frac{\sigma_{z2} - \sigma_{r2}}{k_2} \quad (5.14)$$

Burada;

σ_{z1} : Birinci tabakanın altındaki düşey gerilme

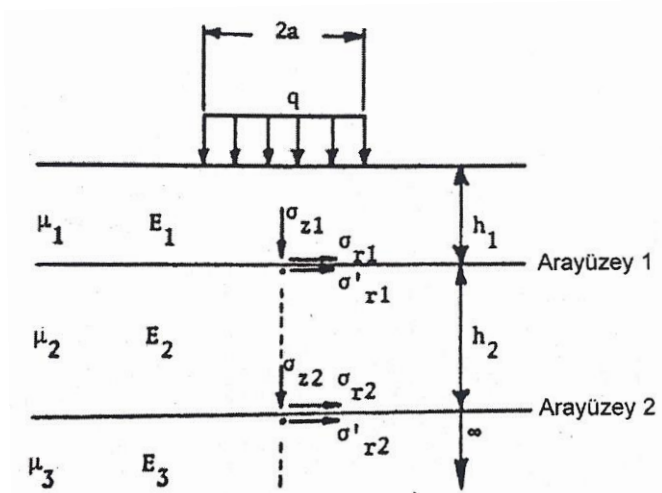
σ_{z2} : İkinci tabakanın altındaki düşey gerilme veya zeminin üstündeki gerilme

σ'_{r1} : İkinci tabakanın üstündeki radyal gerilme

σ_{r1} : Birinci tabakanın altındaki radyal gerilme

σ'_{r2} : Üçüncü tabakanın üstündeki radyal gerilme

σ_{r2} : İkinci tabakanın altındaki radyal gerilmedir.



Şekil 5.12. Üç Tabakalı Sistemlerde Gerilmeler (Tunç, 2004)

Bu gerilmeler Şekil 5.12'de görülmektedir. Jones tarafından geliştirilen Ek-1'de görülen tablolarda $k_1 = 2, 20$ ve 200 için, $H = 0,125, 0,25, 0,50, 1, 2$ ve 4 değerleri için ayrı ayrı olmak üzere gerilme faktörleri ($ZZ1, ZZ2, RR1, RR2$) ile teker temas basıncının çarpımını sonucunda;

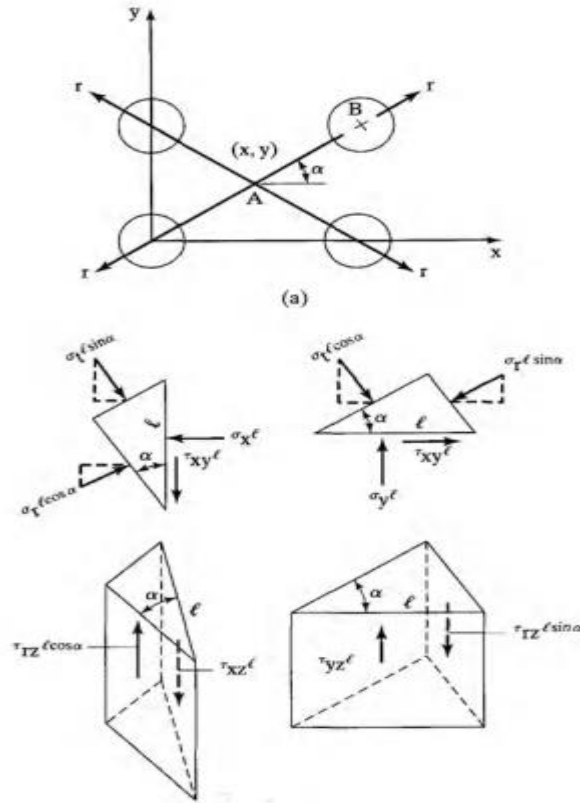
$$\sigma_{z1} = q (ZZ1), \sigma_{z2} = q (ZZ2) \quad (5.15)$$

$$\sigma_{z1} - \sigma_{r1} = q (ZZ1-RR1), \sigma_{z2} - \sigma_{r2} = q (ZZ2-RR2) \quad (5.16)$$

formüllerini yardımıyla gerilmeler hesaplanır. k_1 , k_2 , H ve A 'nın ara değerleri enterpole edilerek hesaplanabilmektedir (Tunç, 2004).

SPMT'nin karayolu üstyapısından geçişi esnasında kaplama tabakasında oluşan gerilme ve birim şekil değiştirmelerin hesaplanması için Jones tarafından geliştirilen tablolarla aynı sonuçları veren Kenpave bilgisayar programından yararlanılacaktır. Bu program yukarıdaki denklemlerde görülen gerilme ve deformasyonları pratik şekilde hesaplayabilen bir bilgisayar programı olup, Burmister analizinde yapılan kabullerin aynısını yapmakla birlikte daha fazla sayıda tabakanın analizini yapabilmektedir.

Programın algoritmasına gelinecek olursa; çoklu yüklerin etkidiği elastik çok tabakalı sistemlerin çözümünde; hesaplamaları süperpozisyon ilkesine göre yapmaktadır. Şekil 5.13'te bir tandem yük setine ait üst görünüş görülmektedir. A noktası altındaki düşey gerilme (σ_z) ve düşey kalıcı oturma (δ) her tekil yükün aynı z doğrultusunda etkimesinden dolayı kolayca hesaplanabilmektedir. Ancak, radyal (σ_r), teğetsel (σ_t) ve kayma gerilmesi (τ_{rz}); yükün A noktasına dört farklı radyal doğrultuda etkimesinden dolayı kolay şekilde hesaplanamamaktadır. Bu yüzden Şekil 5.13'te görüldüğü üzere B noktasındaki yükten dolayı A noktasında oluşan gerilmeler (σ_r , σ_t ve τ_{rz}) x ve y eksenini doğrultusunda hesaplanmak zorundadır (Huang, 2004).



Şekil 5.13. Tandem Yük Setinde Gerilmelerin Süperpozisyonu

X ve y yönündeki kuvvetleri sıfıra eşitleyerek aşağıdaki eşitlikler bulunmaktadır:

$$\sigma_x = \sigma_r \cos^2 \alpha + \sigma_t \sin^2 \alpha \quad (5.17)$$

$$\sigma_y = \sigma_r \sin^2 \alpha + \sigma_t \cos^2 \alpha \quad (5.18)$$

$$\tau_{xy} = (\sigma_r - \sigma_t) \sin \alpha \cos \alpha \quad (5.19)$$

$$\tau_{yz} = \tau_{rz} \sin \alpha \quad (5.20)$$

$$\tau_{xz} = \tau_{rz} \cos \alpha \quad (5.21)$$

Her yük için oluşan σ_x , σ_y , τ_{xy} , τ_{yz} ve τ_{xz} gerilmelerin hesabından sonra süperpozisyon yapılarak istenen noktadaki gerilmeler hesaplanır. Bu gerilmelerin süperpozisyon yapılarak hesaplanmasının ardından asal gerilmeler σ_1 , σ_2 ve σ_3 aşağıdaki denklemler çözülerek hesaplanabilir:

$$\sigma^3 - (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) \sigma^2 + (\sigma_x \sigma_y + \sigma_y \sigma_z + \sigma_x \sigma_z - \tau_{yz}^2 - \tau_{xz}^2 - \tau_{xy}^2) \sigma - (\sigma_x \sigma_y \sigma_z + 2\tau_{yz} \tau_{xz} \tau_{xy} - \sigma_x \tau_{yz}^2 - \sigma_y \tau_{xz}^2 - \sigma_z \tau_{xy}^2) = 0 \quad (5.22)$$

Asal gerilmeler doğrusal olmayan analizler için kullanılabilir. Asal birim şekil değiştirme ε_1 , ε_2 ve ε_3 ise aşağıdaki formüller yardımıyla hesaplanmaktadır:

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{E} [\sigma_1 - \nu(\sigma_2 + \sigma_3)] \quad (5.23)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{E} [\sigma_2 - \nu(\sigma_3 + \sigma_1)] \quad (5.24)$$

$$\varepsilon_3 = \frac{1}{E} [\sigma_3 - \nu(\sigma_1 + \sigma_2)] \quad (5.25)$$

Yorulma hesabı yapılırken; genel en küçük birim şekil değiştirme yerine, yatay en küçük birim şekil değiştirme kullanılır. Birim şekil değiştirme en küçük olarak adlandırılır, çünkü çekme gerilmesi negatif olarak dikkate alınmıştır. Asfalt tabakasının altında çatlak oluşumunun başlamasına neden olan şekil değiştirmesi yatay asal birim şekil değiştirmedir. Bu gerilme;

$$\varepsilon_t = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} - \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2}\right)^2 + \gamma_{xy}^2} \quad (5.26)$$

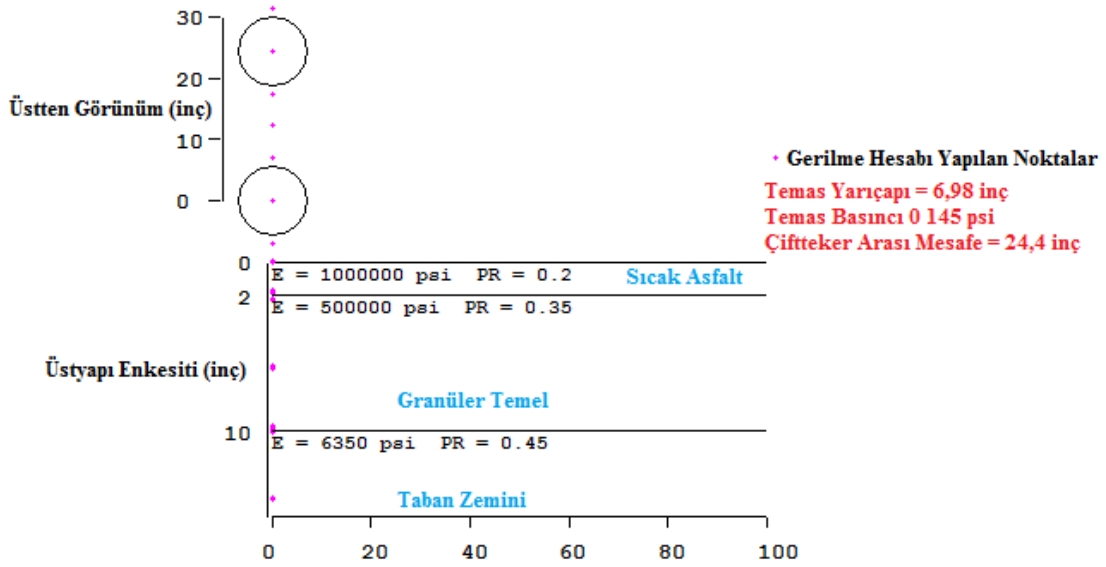
Burada, ε_t asfalt tabakasının altındaki yatay asal birim şekil değiştirmeyi, ε_x ; x doğrultusundaki şekil değiştirmeyi, ε_y ; y doğrultusundaki şekil değiştirmeyi, γ_{xy} ; x düzlemi üzerinde y doğrultusundaki kesme kuvveti yönündeki birim şekil değiştirmeyi ifade etmektedir (Huang, 2004).

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] \quad (5.27)$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)] \quad (5.28)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{2(1 + \nu)}{E} \tau_{xy} \quad (5.29)$$

Bu programla yapılacak analizlerde lastiğin kaplamaya dairesel alan üzerinde üniform yayılı basınç olarak etkidiği kabulüyle; Şekil 5.14'te görüldüğü şekilde kaplama yüzeyinde SPMT'nin iki lastiğinin aks eksenini doğrultusundaki noktalarda ve bu noktaların z eksenini doğrultusunda düşey olarak üstyapı yüzeyinden taban zeminine doğru özellikle tabakalar arasındaki noktalar olmak üzere gerilme ve birim şekil değiştirme analizleri yapılmıştır.

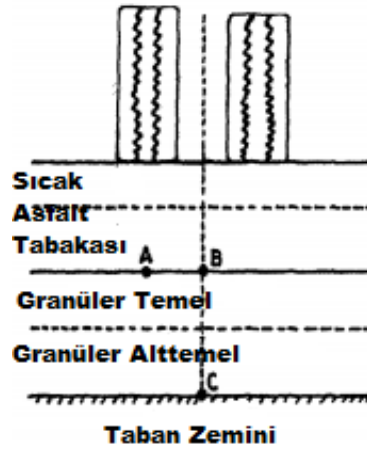


Şekil 5.14. Maksimum Birim Şekil Değişirme ve Kalıcı Oturma Hesabının Yapıldığı Noktalar

Gerilme ve birim şekil değiştirmeler ile üstyapı yüzeyinde oluşan kalıcı deformasyonların görüldüğü programın çıktısı Ek-2’de görüldüğü şekildedir. Burada bir numaralı sütun aracın aks eksenini doğrultusunda mekanik analizin yapıldığı noktaları göstermektedir. İki numaralı sütunda gerilmelerin hesaplandığı üstyapı yüzeyinden derinlik miktarını (inç), üç numaralı sütun, belirtilen noktalarda oluşan kalıcı defleksiyon (kalıcı oturma) (inç) miktarını göstermektedir. Dört numaralı sütun üstyapı katmanlarında oluşan düşey gerilmeyi (psi) (σ_z) ve düşey birim şekil değiştirmeyi yani deformasyonu (ϵ_z), beş numaralı sütun üstyapı katmanlarında oluşan en büyük asal gerilme (psi) (σ_1) ve en büyük birim şekil değiştirmeyi (ϵ_1), altı numaralı sütun üstyapı katmanlarında oluşan en küçük asal gerilme (psi) (σ_3) ve en küçük birim şekil değiştirmeyi (ϵ_3), yedi numaralı sütun üstyapı katmanlarında oluşan orta asal gerilme (psi) (σ_2) ve yatay birim şekil değiştirmeyi göstermektedir.

Üstyapıda yorulma ve lastik izi hasarı tespiti için oluşan kritik noktalar Şekil 5.15’te görülmektedir. Maksimum yatay birim şekil değiştirme (ϵ_t) sıcak asfalt tabakasının altında ve granüler tabakanın hemen üstünde oluşmakta olup, A ve B noktalarında görüldüğü gibidir. C noktasında taban zemininin üstünde ise maksimum düşey birim şekil değiştirme (ϵ_z) yani kalıcı oturma oluşmaktadır.

Sonrasında Eşitlik 5.11 ve 5.12’deki formüller kullanılarak kaplama tabakasında %20 yorulma çatlamasına neden olan yük tekrar sayısı (N_f) ile kaplama tabakasında 12,5 mm kalıcı oturmaya sebep olan yük tekrar sayısı (N_d) hesaplanır.



Şekil 5.15. Tipik Üç Katmanlı Esnek Üstyapıda Maksimum Deformasyonun Oluşturduğu Kritik Noktalar
(Kumar, 2013)

SPMT'nin karayolu üstyapısından geçişi esnasında oluşan gerilme ve birim şekil değiştirmeler için yapılacak mekanik kaplama analizlerinde; SPMT'nin aks yükü, akslar arası mesafesi, lastik basıncı gibi araçla ilgili faktörler ve sıcak asfalt kalınlığı, temel-alttemel kalınlığı ve taban zemini dayanımı gibi yolla ilgili faktörlerin değişmesinin üstyapı hasarına olan etkisi incelenecektir.

5.2.1. SPMT'nin Aks Yükünün Karayolu Üstyapı Hasarına Olan Etkisi

SPMT'ler sahip oldukları hidrolik sistemler sayesinde üzerinde taşıdıkları yükü aksları arasında eşit olarak dağıtabilmektedir. Şekil 4.23'te görüldüğü üzere AASHTO 1993 yöntemiyle ESDY'nin tespit edilmesinde; SPMT'nin 2600 ton ağırlığındaki önemli yapıyı taşıyabilmesi için 4 sıra 3'er tane 6 akslı SPMT modülünün arka arkaya eklenmesiyle oluşturulan 72 akslı aracın aks yükü 40,45 ton olarak hesaplanmıştı. Ancak SPMT'nin farklı şekilde tasarlanması sonucunda aks yükü değişebilecek olup, aks yükünün 20 ton, 25 ton, 30 ton, 40,45 ton 45 ton ve 50 ton olduğu durumlarda üstyapıda oluşacak hasar değişimi incelenecektir.

Mekanik analizlerde SPMT'nin aks yükü lastik temas yarıçapı ile ifade edilmektedir. Lastik temas yarıçapının (CR) tespit edilmesi için ise aşağıdaki formül kullanılmıştır (Yoder ve Witczak, 1975);

$$CR(cm) = 100 \sqrt{\frac{\text{Tek Lastik Üzerindeki Yük (kN)}}{3,14 * \text{Lastik Basıncı (kPa)}}} \quad (5.30)$$

Aks yükünün değişmesinin karayolu üstyapısına vereceği hasarı incelerken;

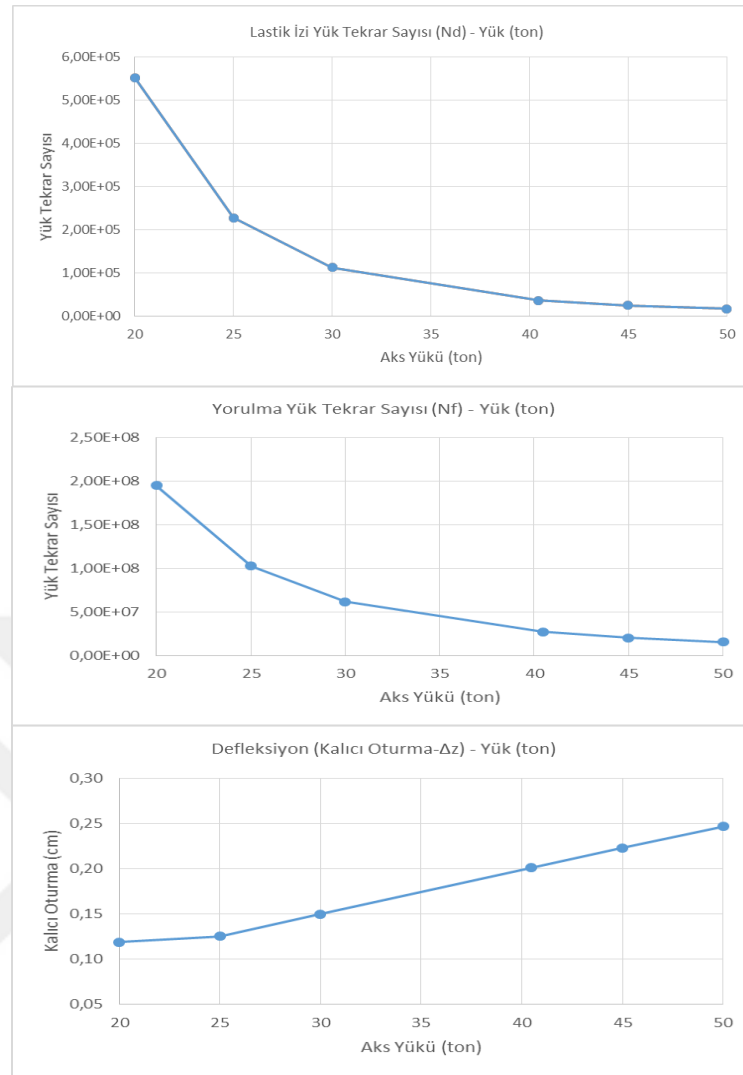
- Üstyapı kalınlığı 2 inç sıcak asfalt ve 8 inç granüler temel,
- Lastik basıncı (215x75 – R17,5 – Industrial Tire = 1000 kpa) (Scheuerle, 2019),
- İki lastik arası mesafe 62 cm, akslar arası mesafe 140 cm, (Sterling, 2019),
- Tabakların elastisite modülleri (E) ve poisson oranları (μ); sıcak asfalt için $E=6.894$ MPa (1.000.000 psi), $\mu=0,2$, granüler temel için $E=3.447$ MPa (500.000 psi), $\mu=0,35$, taban zemini için $E=44$ MPa (6.350 psi), $\mu=0,45$ verileri kullanılarak,

Tablo 5.6'daki sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo 5.6. Aks Yükündeki Değişimin Yorulma Hasarı, Lastik İzi Hasarı ve Defleksiyon Üzerinde Etkisi

Aks Yükü (ton)	(Temas Yarıçapı) (inç)	Lastik Basıncı (kPa)	Düşey Birim Ş.D. (ϵ_z)	Lastik İzi Yük Tekrar S. (N_d)	Yatay Birim Ş.D. (ϵ_t)	Yorulma Yük Tekrar S. (N_f)	Kalıcı Oturma (cm) (Δ_z)
20	4,91	1000	$5,463 \times 10^{-4}$	$551,6 \times 10^3$	$2,337 \times 10^{-4}$	$194,8 \times 10^6$	0,1188
25	5,48	1000	$6,658 \times 10^{-4}$	$227,5 \times 10^3$	$2,839 \times 10^{-4}$	$102,7 \times 10^6$	0,1251
30	6,01	1000	$7,792 \times 10^{-4}$	$112,5 \times 10^3$	$3,312 \times 10^{-4}$	$61,8 \times 10^6$	0,1495
40,45	6,98	1000	$1,005 \times 10^{-3}$	$36,0 \times 10^3$	$4,246 \times 10^{-4}$	$27,3 \times 10^6$	0,2008
45	7,36	1000	$1,098 \times 10^{-3}$	$24,2 \times 10^3$	$4,627 \times 10^{-4}$	$20,5 \times 10^6$	0,2229
50	7,75	1000	$1,195 \times 10^{-3}$	$16,6 \times 10^3$	$5,026 \times 10^{-4}$	$15,6 \times 10^6$	0,2467

Şekil 5.6'da görüldüğü üzere SPMT'nin aks yükü 40,55 ton yerine 20 ton olsaydı esnek üstyapının lastik izi hasarına bağlı ömrünü tamamlayacağı geçiş sayısı 15,3 kat, yorulma hasarına bağlı ömrünü tamamlayacağı geçiş sayısı ise 7,1 kat artacaktı. Aks yükü ile defleksiyon (kalıcı oturma) arasında ise yaklaşık olarak lineer bir ilişki söz konusu olduğu şekilde görülmektedir. Yani aks yükü iki katına çıktığında yoldaki oturma da yaklaşık iki katına çıkmaktadır. Çünkü kalıcı oturma aracın aks yüküyle lineer olarak bağlantılıdır.



Şekil 5.16. Yüke Bağlı Olarak Lastik İzi Yük Tekrar Sayısı (N_d), Yorulma Yük Tekrar Sayısı (N_f) ve Defleksiyonun (Δ_z) Değişimi

5.2.2. SPMT'nin Çiftteker Arası Mesafesinin Üstyapı Hasarına Olan Etkisi

SPMT'lerin aksının tekerleri arasındaki mesafe genellikle 50-70 cm arasında değişmektedir. Teker arası mesafenin 46 cm, 53 cm, 62 cm, 68 cm, 76 cm olmasının esnek üstyapı tabakasında oluşan gerilmeler üzerinde etkisini incelemek için;

- Üstyapı kalınlığı 2 inç sıcak asfalt ve 8 inç granüler temel,
- Aks yükü 40,45 ton,
- Lastik basıncı (215x75 – R17,5 – Industrial Tire = 1000 kpa) (Scheuerle, 2019),
- Tabakların elastisite modülleri (E) ve poisson oranları (μ); sıcak asfalt için $E=6.894$ MPa (1.000.000 psi), $\mu=0,2$, granüler temel için $E=3.447$ MPa (500.000 psi), $\mu=0,35$, taban zemini için $E=44$ MPa (6.350 psi), $\mu=0,45$ verileri kullanılarak,

Tablo 5.7'deki sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo 5.7. Çiftteker Mesafe Değişiminin Yorulma, Lastik İzi Hasarı ve Defleksiyon Üzerinde Etkisi

Aks Yüğü (ton)	(Temas Yarıçapı) (inç)	Teker Ara Mesafe (inç)	Düşey Birim Ş.D. (ϵ_z)	Lastik İzi Yüğü Tekrar S. (N_d)	Yatay Birim Ş.D. (ϵ_t)	Yorulma Yüğü Tekrar S. (N_f)	Kalıcı Oturma (cm) (Δ_z)
40,45	6,98	18	$1,096 \times 10^{-3}$	$24,4 \times 10^3$	$4,876 \times 10^{-4}$	$17,3 \times 10^6$	0,2097
40,45	6,98	21	$1,049 \times 10^{-3}$	$29,7 \times 10^3$	$4,439 \times 10^{-4}$	$23,5 \times 10^6$	0,2054
40,45	6,98	24,4	$1,005 \times 10^{-3}$	$36,0 \times 10^3$	$4,246 \times 10^{-4}$	$27,3 \times 10^6$	0,2008
40,45	6,98	27	$9,768 \times 10^{-3}$	$40,9 \times 10^3$	$4,122 \times 10^{-4}$	$30,1 \times 10^6$	0,1972
40,45	6,98	30	$9,493 \times 10^{-3}$	$46,4 \times 10^3$	$3,999 \times 10^{-4}$	$33,2 \times 10^6$	0,1932

Tablo 5.7'de görüldüğü üzere çiftteker arası mesafenin 18 inçten 30 içe çıkması durumunda esnek üstyapının yorulma ve lastik izi hasarı nedeniyle ömrünü tamamlayacağı tekerrür sayısı yaklaşık iki katına çıkmaktadır. Dolayısıyla teker arası mesafenin artması üstyapı hasarını azaltan bir etken olmakta iken kalıcı oturma üzerinde etkisi ise çok sınırlıdır.

5.2.3. SPMT'nin Lastik Basıncının Üstyapı Hasarına Olan Etkisi

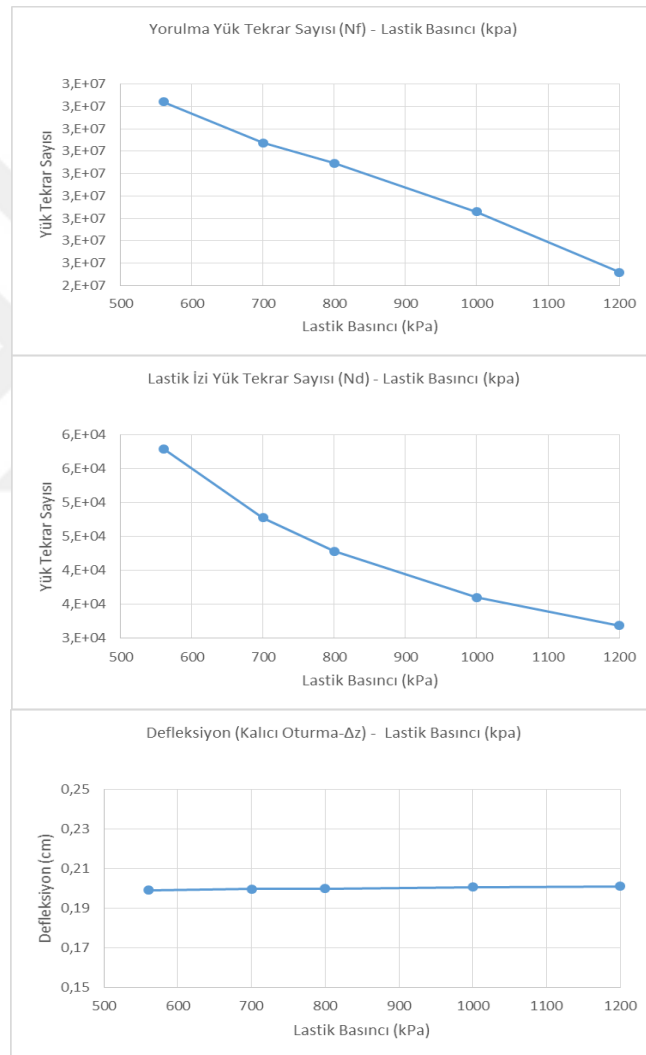
SPMT'nin lastik basıncının artması kaplamayla olan temas yüzeyinin azalmasına dolayısıyla da aynı yükün daha küçük bir yüzeye etki etmesi sonucunda kaplamada oluşan hasarın artmasına yol açmaktadır. SPMT'lerin lastik basınçları 560 kpa, 700 kpa, 800 kpa, 1000 kpa ve 1200 kpa olduğu durumlarda üstyapıda oluşan hasarı incelemek için;

- Üstyapı kalınlığı 2 inç sıcak asfalt ve 8 inç granüler temel,
- Aks yükü 40,45 ton,
- İki lastik arası mesafe 62 cm, akslar arası mesafe 140 cm, (Sterling, 2019),
- Tabakların elastisite modülleri (E) ve poisson oranları (μ); sıcak asfalt için $E=6.894$ MPa (1.000.000 psi), $\mu=0,2$, granüler temel için $E=3.447$ MPa (500.000 psi), $\mu=0,35$, taban zemini için $E=44$ MPa (6.350 psi), $\mu=0,45$ verileri kullanılarak,

Tablo 5.8'deki sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo 5.8. Lastik Basıncındaki Değişimin Yorulma, Lastik İzi Hasarı ve Defleksiyon Üzerinde Etkisi

Aks Yüğü (ton)	(Temas Yarıçapı) (inç)	Lastik Basıncı (kPa)	Düşey Birim Ş.D. (ϵ_z)	Lastik İzi Yüğü Tekrar S. (N_d)	Yatay Birim Ş.D. (ϵ_t)	Yorulma Yüğü Tekrar S. (N_f)	Kalıcı Oturma (cm) (Δ_z)
40,45	9,33	560	$9,037 \times 10^{-4}$	$57,9 \times 10^3$	$4,038 \times 10^{-4}$	$32,2 \times 10^6$	0,1992
40,45	8,34	700	$9,436 \times 10^{-4}$	$47,7 \times 10^3$	$4,111 \times 10^{-4}$	$30,3 \times 10^6$	0,1997
40,45	7,80	800	$9,667 \times 10^{-4}$	$42,8 \times 10^3$	$4,149 \times 10^{-4}$	$29,4 \times 10^6$	0,2000
40,45	6,98	1000	$1,005 \times 10^{-3}$	$36,0 \times 10^3$	$4,246 \times 10^{-4}$	$27,3 \times 10^6$	0,2008
40,45	6,37	1200	$1,033 \times 10^{-3}$	$31,8 \times 10^3$	$4,383 \times 10^{-4}$	$24,6 \times 10^6$	0,2012

**Şekil 5.17.** Lastik Basıncına Bağlı Olarak Lastik İzi Yüğü Tekrar Sayısı (N_d), Yorulma Yüğü Tekrar Sayısı (N_f) ve Defleksiyonun (Δ_z) Değişimi

Görüldüğü üzere araç lastik basıncının 560 kpa'dan 1200 kpa'ya çıkması durumunda lastik izi hasarı nedeniyle üstyapının ömrünü tamamlayacağı tekerrür sayısı % 55 oranında azalmakta iken yorulma hasarı nedeniyle ömrünü tamamlayacağı tekerrür sayısı %33 oranında azalmaktadır. Kalıcı defleksiyon ise lastik basıncından neredeyse

hiç etkilenmemektedir. Çünkü kalıcı oturmaya sebep olan ana etken araçların aks yüküdür. Şekil 5.17’de lastik basıncındaki değişimin üstyapıda oluşan yorulma hasarı ve lastik hasarına olan etkisi ile kalıcı deformasyon oluşumuna katkısı görülmektedir.

5.2.4. Sıcak Asfalt Tabakasının Özelliklerinin Üstyapı Hasarına Olan Etkisi

Sıcak asfalt kalınlığının üstyapının ömrüne etkisini incelemek için sıcak asfalt tabakasının kalınlığı (h) ve malzeme özellikleri (elastisite modülü ve poisson oranının) üstyapı hasarına olan etkisi incelenmiştir. Bunun için;

- Sıcak asfalt tabakası kalınlığı (2 inç, 3 inç, 4 inç, 5 inç ve 6 inç olmak üzere beş farklı kalınlık), granüler temel tabakası kalınlığı 8 inç,
- Aks yükü 40,45 ton,
- İki lastik arası mesafe 62 cm, akslar arası mesafe 140 cm, (Sterling, 2019),
- Lastik basıncı (215x75 – R17,5 – Industrial Tire = 1000 kpa) (Scheuerle, 2019),
- Tabakaların elastisite modülleri (E) ve poisson oranları (μ); sıcak asfalt için E=1.200.000 psi, 1.000.000 psi, 800.000 psi, 600.000 psi olmak üzere dört farklı elastisite modülü, $\mu=0,20, 0,30, 0,40$ ve $0,45$ olmak üzere üç farklı poisson oranı,
- Granüler temel için E=500.000 psi, $\mu=0,35$, taban zemini için E=6.350 psi, $\mu=0,45$ verileri kullanılarak,

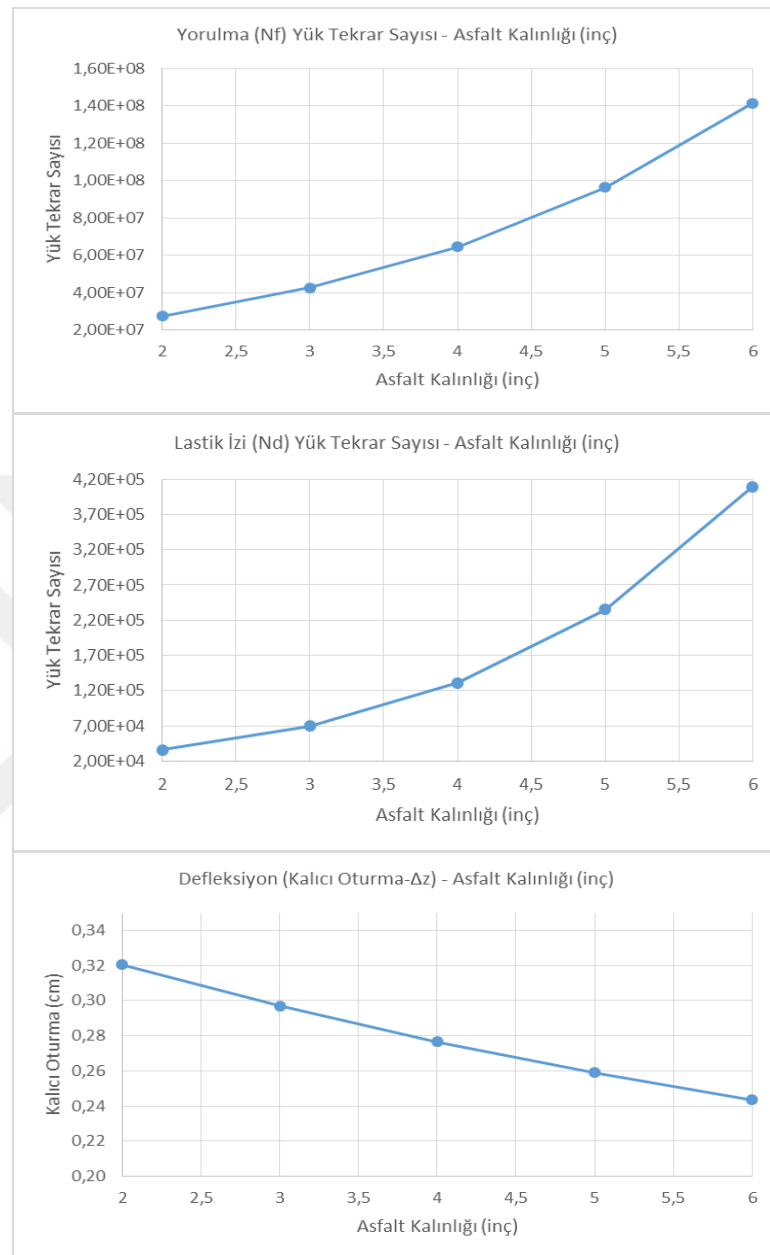
Öncelikle sıcak asfalt kalınlığının üstyapının yorulma ömrü ve kalıcı oturma üzerindeki etkisi incelenmiş ve Tablo 5.9’deki sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo 5.9. Asfalt Kalınlığındaki Değişimin Yorulma, Lastik İzi Hasarı ve Defleksiyon Üzerinde Etkisi

Aks Yük (ton)	Elastisite Modülü (E) Poisson Or. (μ)	Asfalt Kalın. (inç)	Düşey Birim Ş.D. (ϵ_z)	Lastik İzi Yük Tek. Say. (N_d)	Yatay Birim Şekil Değ. (ϵ_t)	Yorulma Yük Tek. Say. (N_f)	Kalıcı Ot.(cm) (Δ_z)
40,45	1.000.000-0,20	2	$1,005 \times 10^{-3}$	$36,0 \times 10^3$	$4,246 \times 10^{-4}$	$27,3 \times 10^6$	0,3204
40,45	1.000.000-0,20	3	$8,658 \times 10^{-4}$	$70,1 \times 10^3$	$3,714 \times 10^{-4}$	$42,4 \times 10^6$	0,2971
40,45	1.000.000-0,20	4	$7,532 \times 10^{-4}$	$130,9 \times 10^3$	$3,271 \times 10^{-4}$	$64,4 \times 10^6$	0,2767
40,45	1.000.000-0,20	5	$6,607 \times 10^{-4}$	$235,5 \times 10^3$	$2,895 \times 10^{-4}$	$96,3 \times 10^6$	0,2591
40,45	1.000.000-0,20	6	$5,840 \times 10^{-4}$	$409,1 \times 10^3$	$2,576 \times 10^{-3}$	$141,4 \times 10^6$	0,2436

Görüldüğü üzere diğer parametreler sabit tutulduğunda sadece sıcak asfalt kalınlığının 2 inçten 6 inç çıkması durumunda üstyapının lastik izi hasarı nedeniyle ömrünü tamamlayacağı yük tekrar sayısı 36.011’den 409.168’e çıkmış olup yaklaşık 11,3 kat bir artış söz konusudur. Yorulma yük tekrar sayısında ise yaklaşık 5,2 kat bir artış

olmaktadır. Kalıcı oturma ise %24 oranında azalmaktadır. Belirtilen durum Şekil 5.18'de daha iyi görülmektedir.



Şekil 5.18. Sıcak Asfalt Tabakası Kalınlığına Bağlı Olarak Lastik İzi Yük Tekrar Sayısı (N_d), Yorulma Yük Tekrar Sayısı (N_r) ve Defleksiyonun (Δ_z) Değişimi

Sıcak asfalt tabakasının kalınlığının 2 inç olduğu durumda sadece malzeme özelliklerinin (elastisite modülü ve poisson oranı) değişmesi durumunda ise Tablo 5.10 ve 5.11'deki sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo 5.10. Sıcak Asfalt Tabakasının Elastisite Modülündeki Değişimin Yorulma, Lastik İzi Hasarı ve Defleksiyon Üzerinde Etkisi

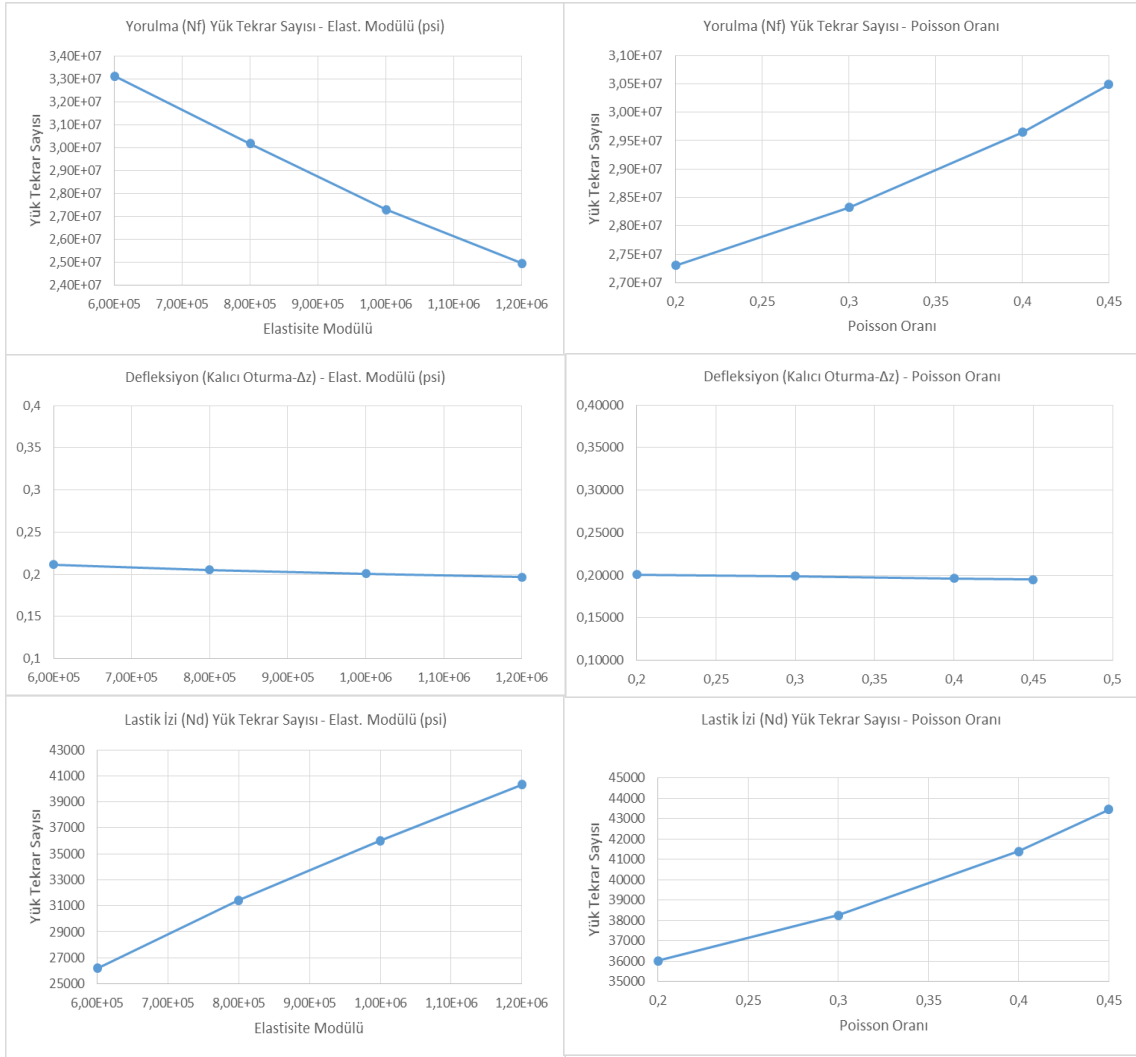
Aks Yük (ton)	Elastisite Modülü (E) Poisson Oranı (μ)	Sıcak Asfalt Kalın. (inç)	Düşey Birim Şekil Değ. (ϵ_z)	Lastik İzi Yük Tekrar S. (N_d)	Yatay Birim Şekil Değ. (ϵ_t)	Yorulma Yük Tekrar S. (N_f)	Defleks. (Kalıcı Ot.) (cm)(Δ_z)
40,45	600.000-0,20	2	$1,079 \times 10^{-3}$	$26,2 \times 10^3$	$4,572 \times 10^{-4}$	$33,1 \times 10^6$	0,2116
40,45	800.000-0,20	2	$1,036 \times 10^{-3}$	$31,4 \times 10^3$	$4,365 \times 10^{-4}$	$30,1 \times 10^6$	0,2055
40,45	1.000.000-0,20	2	$1,005 \times 10^{-3}$	$36,0 \times 10^3$	$4,246 \times 10^{-4}$	$27,3 \times 10^6$	0,2007
40,45	1.200.000-0,20	2	$9,800 \times 10^{-4}$	$40,3 \times 10^3$	$4,162 \times 10^{-4}$	$24,9 \times 10^6$	0,1969

Görüldüğü üzere sıcak asfalt tabakasının elastisite modülünün 600.000 psi'den 1.200.000 psi'ye artması durumunda; N_f %25 oranında azalmakta, N_d %54 oranında artmakta iken, defleksiyon %7 oranında azalmaktadır.

Tablo 5.11. Sıcak Asfalt Tabakasının Poisson Oranındaki Değişimin Yorulma, Lastik İzi Hasarı ve Defleksiyon Üzerinde Etkisi

Aks Yük (ton)	Elastisite Modülü (E) Poisson Oranı (μ)	Sıcak Asfalt Kalın. (inç)	Düşey Birim Şekil Değ. (ϵ_z)	Lastik İzi Yük Tekrar S. (N_d)	Yatay Birim Şekil Değ. (ϵ_t)	Yorulma Yük Tekrar S. (N_f)	Defleks. (Kalıcı Ot.) (cm)(Δ_z)
40,45	1.000.000-0,20	2	$1,005 \times 10^{-3}$	$36,0 \times 10^3$	$4,246 \times 10^{-4}$	$27,3 \times 10^6$	0,2007
40,45	1.000.000-0,30	2	$9,916 \times 10^{-4}$	$38,2 \times 10^3$	$4,199 \times 10^{-4}$	$28,3 \times 10^6$	0,1990
40,45	1.000.000-0,40	2	$9,742 \times 10^{-4}$	$41,3 \times 10^3$	$4,141 \times 10^{-4}$	$29,6 \times 10^6$	0,1965
40,45	1.000.000-0,45	2	$9,637 \times 10^{-4}$	$43,4 \times 10^3$	$4,106 \times 10^{-4}$	$30,5 \times 10^6$	0,1950

Sıcak asfalt tabakasının poisson oranının 0,2'den 0,45'e çıkması durumunda ise; N_f %20 oranında, N_d %12 oranında artmakta iken, defleksiyon %3 oranında azalmaktadır. Şekil 5.19'da sıcak asfalt tabakasının elastisite modülü ve poisson oranındaki değişimin lastik izi, yorulma yük tekrar sayıları ve defleksiyon üzerindeki etkisini göstermektedir.



Şekil 5.19. Sıcak Asfalt Tabakası Malzeme Özelliklerine (E- μ) Bağlı Olarak Lastik İzi Yük Tekrar Sayısı (N_d), Yorulma Yük Tekrar Sayısı (N_f) ve Defleksiyonun (Δ_z) Değişimi

5.2.5. Granüler Temel Tabakası Kalınlığının Üstyapı Hasarına Olan Etkisi

Granüler temel tabakasının kalınlığındaki değişimin esnek üstyapıda oluşan hasara olan katkısını tespit edebilmek için;

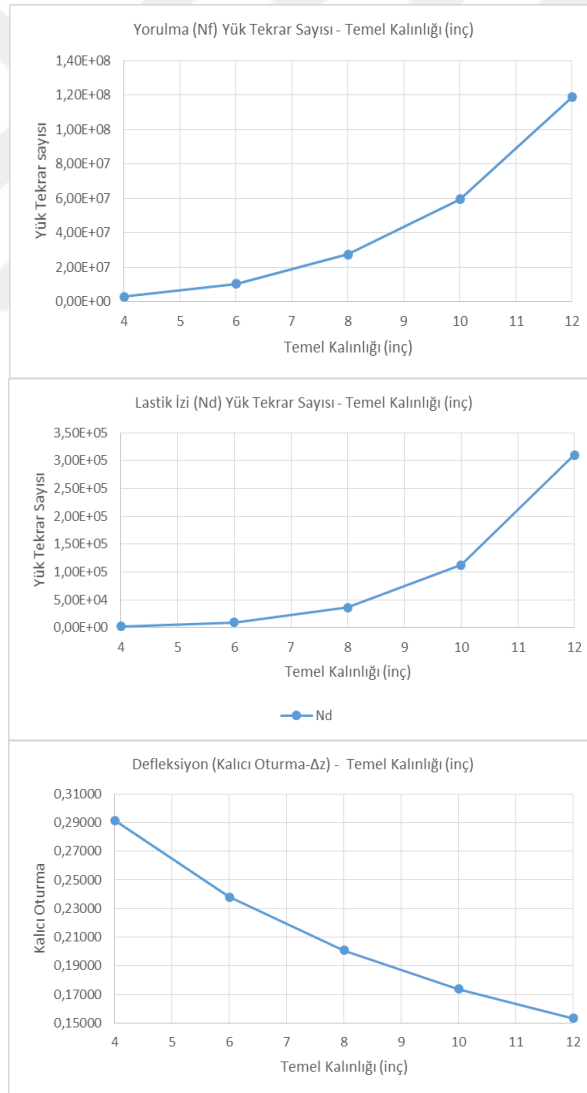
- Aks yükü 40,45 ton,
- Üstyapı kalınlığı 2 inç sıcak asfalt ve granüler temel kalınlığı (4 inç, 6 inç, 8 inç, 10 inç, 12 inç olmak üzere beş farklı kalınlık)
- Lastik basıncı (215x75 – R17,5 – Industrial Tire = 1000 kpa) (Scheuerle, 2019),
- İki lastik arası mesafe 62 cm, akslar arası mesafe 140 cm, (Sterling, 2019),
- Tabakların elastisite modülleri (E) ve poisson oranları (μ); sıcak asfalt için $E=6.894$ MPa (1.000.000 psi), $\mu=0,2$, granüler temel için $E=3.447$ MPa

(500.000 psi), $\mu=0,35$, taban zemini için $E=44$ MPa (6.350 psi), $\mu=0,45$ verileri kullanılarak,

verileri kullanılarak Tablo 5.12'deki sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo 5.12. Granüler Temel Tabakası Kalınlığındaki Değişimin Yorulma, Lastik Hasarı ve Defleksiyon Üzerinde Etkisi

Aks Yüğü (ton)	Temel Kalın. (inç)	Düşey Birim Ş.D. (ϵ_z)	Lastik İzi Tekrar S. (N_d)	Yatay Birim Şekil Değ. (ϵ_t)	Yorulma Yük Tekr. S. (N_f)	Kalıcı Oturm (cm) (Δ_z)
40,45	4	$1,903 \times 10^{-3}$	$2,0 \times 10^3$	$8,486 \times 10^{-4}$	$2,8 \times 10^6$	0,2914
40,45	6	$1,345 \times 10^{-3}$	$9,7 \times 10^3$	$5,735 \times 10^{-4}$	$10,1 \times 10^6$	0,2379
40,45	8	$1,005 \times 10^{-3}$	$36,0 \times 10^3$	$4,246 \times 10^{-4}$	$27,3 \times 10^6$	0,2008
40,45	10	$7,790 \times 10^{-4}$	$112,6 \times 10^3$	$3,352 \times 10^{-4}$	$59,4 \times 10^6$	0,1738
40,45	12	$6,213 \times 10^{-3}$	$310,1 \times 10^3$	$2,717 \times 10^{-4}$	$118,6 \times 10^6$	0,1533



Şekil 5.20. Granüler Temel Tabakası Kalınlığına Bağlı Olarak Lastik İzi Yük Tekrar Sayısı (N_d), Yorulma Yük Tekrar Sayısı (N_f) ve Defleksiyonun (Δ_z) Değişimi

Tabloda görüldüğü üzere granüler temel tabakası kalınlığı AASHTO 1993'e göre yapılan tasarımda 8 inç olarak belirlenmişti. Kalınlığın 4 inç olarak belirlenmesi durumunda; Yorulma yük tekrar sayısı 9,7 kat, lastik izi yük tekrar sayısı 18 kat azalmakta iken, kalıcı oturma % 45 oranında artmaktadır. Tam aksi durumda kalınlığın 12 inç olarak belirlenmesi durumunda ise esnek üstyapının ömrünü tamamlayacağı yorulma yük tekrar sayısı 4,3 kat, lastik izi yük tekrar sayısı ise 8,6 kat artmakta iken kalıcı oturma %25 oranında azalmaktadır. Bu durum Şekil 5.20'de de görülmektedir.

5.2.6. Taban Zemini Esneklik Modülündeki (M_R) Değişimin Üstyapı Hasarına Olan Etkisi

Taban zemini esneklik modülünün 3.000 psi, 6.350 psi, 10.000 psi, 15.000 psi ve 20.000 psi olmasının esnek üstyapıda oluşan hasarı ve defleksiyonu nasıl etkilediği incelenirken;

- Aks yükü 40,45 ton,
- Üstyapı kalınlığı 2 inç sıcak asfalt ve granüler temel kalınlığı 8 inç,
- Lastik basıncı (215x75 – R17,5 – Industrial Tire = 1000 kPa) (Scheuerle, 2019),
- İki lastik arası mesafe 62 cm, akslar arası mesafe 140 cm, (Sterling, 2019),
- Tabakların elastisite modülleri (E) ve poisson oranları (μ); sıcak asfalt için $E=6.894$ MPa (1.000.000 psi), $\mu=0,2$, granüler temel için $E=3447$ MPa (500.000 psi), $\mu=0,35$ verileri kullanılarak,

Tablo 5.13'teki sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo 5.13. Taban Zemini Esneklik Modülündeki Değişimin Yorulma, Lastik İzi Hasarı ve Defleksiyon Üzerinde Etkisi

Aks Yüğü (ton)	Taban Zemini Esn. Modülü (M_R) (psi)	Düşey Birim Şekil Değ. (ϵ_z)	Lastik İzi Yük Tekrar S. (N_d)	Yatay Birim Şekil Değ. (ϵ_t)	Yorulma Yük Tekrar S. (N_f)	Defleks. (Kalıcı Ot.) (cm)(Δ_z)
40,45	3.000	$1,285 \times 10^{-3}$	$11,9 \times 10^3$	$1,177 \times 10^{-3}$	$1,0 \times 10^6$	0,5275
40,45	6.350	$1,005 \times 10^{-3}$	$36,0 \times 10^3$	$4,246 \times 10^{-4}$	$27,3 \times 10^6$	0,2008
40,45	10.000	$8,574 \times 10^{-4}$	$73,3 \times 10^3$	$3,766 \times 10^{-4}$	$40,5 \times 10^6$	0,1451
40,45	15.000	$7,385 \times 10^{-4}$	$143,1 \times 10^3$	$3,344 \times 10^{-4}$	$59,9 \times 10^6$	0,1082
40,45	20.000	$6,609 \times 10^{-4}$	$235,2 \times 10^3$	$3,049 \times 10^{-4}$	$81,2 \times 10^6$	0,0877

Tablo 5.13'te görüldüğü üzere taban zemini esneklik modülü 6.350 psi yerine 3.000 psi olması durumunda; lastik izi yük tekrar sayısı yaklaşık 3 kat, yorulma yük tekrar sayısı

ise 27 kat azalmakta iken, kalıcı oturma 2,6 kat artmaktadır. Taban zemini esneklik modülünün 20.000 psi olması durumunda ise; lastik izi yük tekrar sayısı yaklaşık 6,5 kat, yorulma yük tekrar sayısı ise 3 kat artmakta iken, kalıcı oturma 2,3 kat azalmaktadır. Bu durum Şekil 5.21'deki grafiklerde görülmektedir.



Şekil 5.21. Taban Zemini Esneklik Modülüne (M_R) Bağlı Olarak Lastik İzi Yük Tekrar Sayısı (N_d), Yorulma Yük Tekrar Sayısı (N_f) ve Defleksiyonun (Δ_z) Değişimi

6. SONUÇLAR

Aşırı yüklü veya aşırı büyük araçların karayolu esnek üstyapısında oluşturduğu hasar; araçla ilgili faktörler, kaplama ile ilgili faktörler ve çevresel faktörlerdir.

Araçla ilgili en önemli faktör aracın aks yüküdür. Bunun dışında akslar arası mesafe, aracın brüt ağırlığı, aracın üzerindeki yükün akslara dağılım oranı, aracın hızı, aracın süspansiyon tipi, aracın yaptığı manevralar ve araçta kullanılan lastik tipi, araçla ilgili diğer faktörler olarak sayılmaktadır.

Esnek üstyapıda hasara sebep olan diğer faktör ise kaplama ile ilgili faktörlerdir. Bunlar, bitümlü kaplama kalınlığı, temel ve alttemel tabakası kalınlığı ve taban zeminin dayanımıdır.

Bu çalışmada, yapının bir yerden başka bir yere nakliyesi sırasında, yapının yükünü ve ebatlarını taşıyabilecek kapasitede SPMT'nin seçimi yapılarak, aracın dingil yükü hesaplanmıştır.

40,45 ton dingil yüküne sahip SPMT'nin ESDY'ye dönüşümü yapılmış, kullanılan 72 akslı SPMT'nin karayolundan bir geçişi için AASHTO 1993 tasarım yöntemiyle hesaplanan DEF 1.079,04 olarak hesaplanmıştır. Yani brüt ağırlığı 2.920 ton, aks yükü 40,45 ton olan SPMT'nin bir kez karayolundan geçişi, standart dingil yüküne sahip bir aracın geçişine göre üstyapıya 1.079 kat fazla hasar vermektedir.

Yol tasarımı yapılırken ilk etapta sadece SPMT'nin geçeceği düşünülmüştür. Bu yüzden, minimum üstyapı kalınlıklarının kullanılması öngörülmüştür. Öngörülen üstyapı kalınlığı 5 cm (2 inç) sıcak asfalt, 20 cm (8 inç) granüler temeldir.

Mekanik -Ampirik Tasarım Yöntemi kullanılarak, SPMT'nin karayolundan geçişiyle ilgili kaplama tabakasında mekanik analizler yapılmıştır. Bu metot kaplama yapısında yorulmaya ve lastik izi hasarına sebep olan yük tekrarı sayısı ile, kaplama yapısında oluşan gerilmeler arasında ilişki kurmaktadır. 40,45 ton dingil ağırlığına sahip SPMT'nin 2 inç sıcak asfalt, 8 inç granüler temel tabakasına sahip karayolu üstyapısından geçişi esnasında; üstyapı tabakasında oluşan maksimum gerilmeler, deformasyonlar ve kalıcı defleksiyon Burmister ve Jones tarafından geliştirilen yaklaşımı esas alan mekanik analiz programı Kenpave yardımıyla hesaplanmıştır. Hesaplanan deformasyonlarla karayolunun yorulma hasarı nedeniyle ömrünü

tamamlayacağı yük tekrar sayısı ile lastik izi hasarı sonucunda ömrünü tamamlayacağı yük tekrar sayıları ve kalıcı oturma asfalt enstitüsü tarafından geliştirilen Eşitlik 5.11 ve 5.12 yardımıyla hesaplanmıştır.

SPMT'nin aks yükünün, teker arası mesafesinin ve lastik basıncının değişmesi gibi araçla ilgili faktörler ve sıcak asfaltın tabaka kalınlığı, elastisite modülü ve poisson oranının, granüler temel tabaka kalınlığının ve taban zemini esneklik modülünün değişmesi gibi yolla ilgili faktörlerde değişiklik olmasının kaplamanın ömrü üzerindeki etkileri üzerinde mekanik analizler yapılarak şu sonuçlara varılmıştır:

SPMT'nin modül sayısı artırılarak aks yükü düşürülebilmektedir. Aks yükünün değişmesi durumunda üstyapı tabakasında oluşacak hasar, Tablo 6.1'de görüldüğü şekilde değişmektedir.

Tablo 6.1. Artan Aks Yükünün Kaplama Ömrü Üzerindeki Etkisi

Aks Yüğü (ton)	Aks Yüğündeki Artış	Lastik İzi Yük Tekrar Sayısı Değişimi (N_d)	Yorulma Yük Tekrar Sayısı Değişimi (N_f)	Kalıcı Oturmada Yaşanan Değişim (Δ_z)
20	%100	$551,6 \times 10^3$ (%0)	$194,8 \times 10^6$ (%0)	0,1188 (%100)
25	%125	$227,5 \times 10^3$ (-%59)	$102,7 \times 10^6$ (-%48)	0,1251 (%105)
30	%150	$112,5 \times 10^3$ (-%80)	$61,8 \times 10^6$ (-%68)	0,1495 (%126)
40,45	%202	$36,0 \times 10^3$ (-%94)	$27,3 \times 10^6$ (-%86)	0,2008 (%170)
45	%225	$24,2 \times 10^3$ (-%96)	$20,5 \times 10^6$ (-%90)	0,2229 (%188)
50	%250	$16,6 \times 10^3$ (-%97)	$15,6 \times 10^6$ (-%92)	0,2467 (%207)

Tablo 6.1'de görüldüğü üzere aks yükünün 20 tondan 40,45 tona yani iki katına çıkması durumunda; lastik izi yük tekrar sayısı 15,3 kat, yorulma yük tekrar sayısı 7,1 kat azalmakta, kalıcı oturma ise yüke paralel şekilde 1,7 katına çıkmaktadır. Yani kaplamanın lastik izi hasarı nedeniyle ömrünü tamamlayacağı yük tekrar sayısının 15,3 kat azalacağı anlamını taşımaktadır. Benzer durum yorulma yük tekrar sayısında da söz konusudur. Kalıcı oturma en büyük sebebi araçların aks yüküdür. Tablodan da anlaşılacağı üzere aks yükünde yaşanan değişimle kalıcı oturmada yaşanan değişim birbirine paralel oranda artmakta ya da azalmaktadır.

SPMT'ler ve diğer nakliye araçlarını üreten firmaların araç tasarımında kullandıkları çiftteker arası mesafeler değişkenlik göstermektedir. Bazı araçlarda aracın dingil yükü ağırlığına göre bu mesafe 45 cm civarında iken bazılarında 80 cm'lere kadar

çıkabilmektedir. Çiftteker arası mesafenin değişiminin üstyapıda oluşan hasara olan etkisinin incelenmesi neticesinde Tablo 6.2'deki sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo 6.2. Artan Çiftteker Arası Mesafenin Kaplama Ömrü Üzerindeki Etkisi

Çift Teker Arası Mesafe (inç)	Çift Teker Mesafe Artış	Lastik İzi Yük Tekrar Sayısı Değişimi (N_d)	Yorulma Yük Tekrar Sayısı Değişimi (N_f)	Kalıcı Oturmada Yaşanan Değişim (Δ_z)
18	%100	24,4x10 ³ (%100)	17,3x10 ⁶ (%100)	0,2097 (%100,0)
21	%117	29,7x10 ³ (%122)	23,5x10 ⁶ (%135)	0,2054 (%102,1)
24,4	%135	36,0x10 ³ (%147)	27,3x10 ⁶ (%158)	0,2008 (%104,2)
27	%150	40,9x10 ³ (%167)	30,1x10 ⁶ (%174)	0,1972 (%106,0)
30	%167	46,4x10 ³ (%190)	33,2x10 ⁶ (%192)	0,1932 (%107,9)

Görüldüğü üzere çiftteker arası mesafenin %67 oranında artırılması hem lastik izi yük tekrar sayısı, hem de yorulma yük tekrar sayısında %90 civarında artışlara neden olmakta, dolayısıyla kaplamanın ömründe iki kata varan oranda artış yaşanmaktadır. Kalıcı oturma ise çiftteker arası mesafeden çok az miktarda etkilenmektedir.

Diğer araçla ilgili faktör olan lastik basıncının incelenmesinde ise; SPMT'ler gibi bütün nakliye araçlarında yükün durumuna, hava şartları gibi faktörlere göre araçların lastik basınçları değişkenlik gösterebilmektedir. Lastik basıncında yaşanan değişimin kaplamanın ömrüne olan etkisinin incelenmesi neticesinde;

Tablo 6.3. Artan Lastik Basıncının Kaplama Ömrü Üzerindeki Etkisi

Lastik Basıncı (kPa)	Lastik Basıncı Artışı	Lastik İzi Yük Tekrar Sayısı Değişimi (N_d)	Yorulma Yük Tekrar Sayısı Değişimi (N_f)	Kalıcı Oturmada Yaşanan Değişim (Δ_z)
560	%100	57,9x10 ³ (%0)	32,2x10 ⁶ (%0)	0,1992 (%100,0)
700	%125	47,7x10 ³ (-%18)	30,3x10 ⁶ (-%6)	0,1997 (%100,2)
800	%143	42,8x10 ³ (-%26)	29,4x10 ⁶ (-%9)	0,2000 (%100,4)
1000	%178	36,0x10 ³ (-%38)	27,3x10 ⁶ (-%16)	0,2008 (%100,8)
1200	%214	31,8x10 ³ (-%45)	24,6x10 ⁶ (-%24)	0,2012 (%101,0)

Tablo 6.3'e bakıldığında; lastik basıncının 560 kPa'dan 1200 kPa'ya çıkması durumunda lastik izi hasarı nedeniyle kaplamanın ömrünü tamamlayacağı yük tekrar sayısı %45, yorulma hasarı nedeniyle ömrünü tamamlayacağı yük tekrar sayısı %24 azalmaktadır. Yani lastik basıncı artışı sonucunda kaplamanın lastik izi hasarı ömrü neredeyse yarı yarıya azalmaktadır. Lastik basıncının kaplama tabakasında oluşacak kalıcı oturma üzerindeki etkisi ise yok denecek kadar azdır.

Kaplamayla ilgili faktörlere gelecek olursak sıcak asfalt tabakasının kalınlığı ve elastisite modülü ile poisson oranının kaplama ömrü üzerindeki etkisi incelendiğinde şu sonuçlara ulaşılmıştır:

Tablo 6.4. Artan Sıcak Asfalt Kalınlığının Kaplama Ömrü Üzerindeki Etkisi

Sıcak Asfalt Kalınlığı (inç)	Asfalt Kalınlığı Artışı	Lastik İzi Yük Tekrar Sayısı Değişimi (N_a)	Yorulma Yük Tekrar Sayısı Değişimi (N_f)	Kalıcı Oturmada Yaşanan Değişim (Δ_z)
2	%100	36,0x10 ³ (%100)	27,3x10 ⁶ (%100)	0,3204 (%0)
3	%150	70,1x10 ³ (%195)	42,4x10 ⁶ (%155)	0,2971 (-%7)
4	%200	130,9x10 ³ (%363)	64,4x10 ⁶ (%235)	0,2767 (-%14)
5	%250	235,5x10 ³ (%654)	96,3x10 ⁶ (%352)	0,2591 (-%19)
6	%300	409,1x10 ³ (%1136)	141,4x10 ⁶ (%518)	0,2436 (-%24)

Tablo 6.5. Elastisite Modülündeki Değişimin Kaplama Ömrü Üzerindeki Etkisi

Elastisite Modülü (psi)	Elastisite modülü Değişimi	Lastik İzi Yük Tekrar Sayısı Değişimi (N_a)	Yorulma Yük Tekrar Sayısı Değişimi (N_f)	Kalıcı Oturmada Yaşanan Değişim (Δ_z)
600.000	%100	26,2x10 ³ (%100)	33,1x10 ⁶ (%0)	0,2116 (%0)
800.000	%133	31,4x10 ³ (%120)	30,1x10 ⁶ (-%10)	0,2055 (-%3)
1.000.000	%167	36,0x10 ³ (%137)	27,3x10 ⁶ (-%18)	0,2007 (-%5)
1.200.000	%200	40,3x10 ³ (%154)	24,9x10 ⁶ (-%25)	0,1969 (-%7)

Tablo 6.6. Poisson Oranındaki Değişimin Kaplama Ömrü Üzerindeki Etkisi

Poisson Oranı	Poisson Oranı Değişimi	Lastik İzi Yük Tekrar Sayısı Değişimi (N_a)	Yorulma Yük Tekrar Sayısı Değişimi (N_f)	Kalıcı Oturmada Yaşanan Değişim (Δ_z)
0,20	%100	36,0x10 ³ (%100)	27,3x10 ⁶ (%100)	0,2007 (%0)
0,30	%150	38,2x10 ³ (%106)	28,3x10 ⁶ (%103)	0,1990 (-%1)
0,40	%200	41,3x10 ³ (%114)	29,6x10 ⁶ (%108)	0,1965 (-%2)
0,45	%225	43,4x10 ³ (%120)	30,5x10 ⁶ (%112)	0,1950 (-%3)

Sıcak asfalt kalınlığının kaplama ömrüne olan etkisi Tablo 6.4'te görüldüğü şekildedir. Tablodan görüldüğü üzere kaplamanın ömrünü artıran en önemli etkenlerden biri sıcak asfalt kalınlığının artırılmasıdır. Sıcak asfalt kalınlığı 2 inç (5 cm) yerine 6 inç (15 cm) olduğunda; lastik izi hasarı nedeniyle kaplamanın ömrünü tamamlayacağı yük tekrar sayısı 11,3 kat, yorulma hasarı nedeniyle kaplamanın ömrünü tamamlayacağı yük tekrar sayısı ise 5,1 kat artmaktadır. Kaplama tabakasında oluşacak kalıcı oturma ise %25 oranında azalmaktadır.

Elastisite modülü çevresel koşullardan etkilenerek değişkenlik gösterebilmektedir. Özellikle sıcak ortamlarda asfalt tabakasının elastisite modülünde düşüş

gözlemlenmektedir. Bunun yanı sıra kullanılan sıcak asfalt tabakasının malzeme özellikleri ve karışım oranı da elastisite modülünde farklılık oluşturmaktadır. Bu sebeple farklı koşullar göz önünde bulundurularak; elastisite modülünün sıcak asfalt tabakasının kaplama ömrüne etkisi incelenmiş olup; Tablo 6.5'te görüldüğü üzere elastisite modülünün iki katına çıkması durumunda kaplamanın lastik izi hasarı nedeniyle ömrünü tamamlayacağı tekrar sayısı %54 oranında artmakta iken, yorulma hasarında ise %25'lik bir düşüş söz konusudur. Elastisite modülünün kalıcı oturma üzerindeki etkisi ise sınırlıdır.

Yapılan çalışmalarda, poisson oranının bitümlü karışımlar için sıcaklığa bağlı olarak; 5 °C için 0,20; 25 °C için 0,35; 40 °C için 0,40 olarak değiştiği görülmüştür. Poisson oranının kaplama ömrüne etkisi incelendiğinde ise; Tablo 6.6'da görüldüğü üzere poisson oranının 0,20'den 0,45'e artması durumunda; lastik izi hasarı nedeniyle kaplamanın ömrünün tamamlayacağı tekrar sayısı yani kaplamanın ömrü sadece %20 oranında artmaktadır. Yorulma hasarında ise bu oran %12 olmaktadır. Poisson oranının kalıcı oturma üzerindeki etkisi ise yok denecek kadar azdır.

Granüler temel tabakasının kalınlığı ise kaplamanın ömrü açısından önemli bir etkiye sahiptir. Özellikle sıcak asfalt tabakasının kalınlığı ince olduğunda bu etki çok daha fazla olmaktadır. Sıcak asfalt kalınlığı en ince olarak 2 inç (5 cm), granüler temel tabakasının ise 8 inç (20 cm) olduğu duruma göre kıyaslama yapılarak granüler temel tabakası kalınlığının kaplama ömrüne etkisi incelenmiş ve Tablo 6.7'de görülen sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo 6.7. Artan Granüler Temel Tabakası Kalınlığının Kaplama Ömrü Üzerindeki Etkisi

Temel Kalınlığı (inç)	Temel Kalınlığı Artışı	Lastik İzi Yük Tekrar Sayısı Değişimi (N_d)	Yorulma Yük Tekrar Sayısı Değişimi (N_f)	Kalıcı Oturmada Yaşanan Değişim (Δ_z)
4	%100	$2,0 \times 10^3$ (%5)	$2,8 \times 10^6$ (%10)	0,2914 (%145)
6	%150	$9,7 \times 10^3$ (%27)	$10,1 \times 10^6$ (%37)	0,2379 (%118)
8	%200	$36,0 \times 10^3$ (%100)	$27,3 \times 10^6$ (%100)	0,2008 (%100)
10	%250	$112,6 \times 10^3$ (%312)	$59,4 \times 10^6$ (%217)	0,1738 (%86)
12	%300	$310,1 \times 10^3$ (%860)	$118,6 \times 10^6$ (%434)	0,1533 (%76)

Görüldüğü üzere sıcak asfalt kalınlığı 2 inç (5 cm), granüler temel tabakasının ise 8 inç (20 cm) olduğu durum yerine; sadece granüler temel tabakası kalınlığı değiştirilerek 4 inç (10 cm) olduğunda; lastik izi nedeniyle kaplamanın ömrünü tamamlayacağı yük

tekrar sayısı %95 oranında azalmakta, yorulma nedeniyle kaplamanın ömrünü tamamlayacağı yük tekrar sayısı ise %90 oranında azalmaktadır. Kalıcı oturma ise %45 oranında artmaktadır. Aksi durumda granüler temel tabaka kalınlığını 4 inç (10 cm) yerine 12 inç (30 cm) olarak belirlediğimizde ise; lastik izi nedeniyle kaplamanın ömrünü tamamlayacağı yük tekrar sayısı 8,6 kat artmakta, yorulma nedeniyle kaplamanın ömrünü tamamlayacağı yük tekrar sayısı ise 4,3 kat artmaktadır. Kalıcı oturma ise %24 oranında azalmaktadır. Buradan anlaşılacağı üzere granüler temel tabakası kalınlığı kaplama hasarına etki eden önemli bir faktördür. Burada sıcak asfalt kalınlığı 2 inç (5 cm) yerine daha kalın kabul edilseydi granüler temel tabakasının hasar üzerindeki etkisi daha az olacaktı. Çünkü ince sıcak asfalt tabakası nedeniyle granüler temel tabakası aracın lastik yüküne daha fazla maruz kalmaktadır. Sıcak asfalt tabakası kalınlığının artması durumunda yükün alt tabakalara inildikçe azalan etkisi nedeniyle granüler temel tabakasının hasar üzerindeki etkisi de azalacaktı.

Diğer yolla ilgili faktör olan taban zemininin esneklik modülünün hasar üzerinde etkisine bakıldığında ise Tablo 6.8'deki sonuçlarla karşılaşılmaktadır;

Tablo 6.8. Artan Granüler Temel Tabakası Kalınlığının Kaplama Ömrü Üzerindeki Etkisi

Taban Zemini Es.Mod. (psi)	Esneklik Modülü Artışı	Lastik İzi Yük Tekrar Sayısı Değişimi (N_a)	Yorulma Yük Tekrar Sayısı Değişimi (N_f)	Kalıcı Oturmada Yaşanan Değişim (Δ_z)
3.000	%100	$11,9 \times 10^3$ (%100)	$1,0 \times 10^6$ (%100)	0,5275 (%0)
6.350	%211	$36,0 \times 10^3$ (%302)	$27,3 \times 10^6$ (%273)	0,2008 (-%62)
10.000	%333	$73,3 \times 10^3$ (%620)	$40,5 \times 10^6$ (%405)	0,1451 (-%73)
15.000	%500	$143,1 \times 10^3$ (%1200)	$59,9 \times 10^6$ (%599)	0,1082 (-%80)
20.000	%666	$235,2 \times 10^3$ (%1980)	$81,2 \times 10^6$ (%812)	0,0877 (-%84)

Görüldüğü üzere taban zemini esneklik modülünün 3.000 psi yerine 20.000 psi olması durumunda lastik izi hasarı nedeniyle kaplamanın ömrü yaklaşık olarak 20 kat, yorulma ömrü ise yaklaşık 8 kat artmaktadır. Kalıcı oturma ise yaklaşık 6 kat azalmaktadır.

Sonuç olarak;

- Maksimum yatay birim şekil değiştirme (ϵ_t) sıcak asfalt tabakasının altında ve granüler tabakanın hemen üstünde oluşmaktadır. Taban zemininin üstünde ise maksimum düşey birim şekil değiştirme (ϵ_z) oluşmaktadır.

- Esnek üstyapılarda oluşacak lastik izi hasarı yorulma hasarından çok önce ortaya çıkmaktadır. Yani kaplama tabakası lastik izi hasarına karşı çok daha hassastır.
- Esnek üstyapılarda lastik izi hasarı ve yorulma hasarına sebep olan araçla ilgili en önemli etken araçların aks yüküdür. Yine aynı şekilde kalıcı oturma, araçla ilgili faktörlerden en çok aks yükleri sebebiyle oluşmaktadır. Çiftteker arası mesafe ve lastik basıncı ise lastik izi ve yorulma hasarı üzerinde belli oranda etkili iken, kalıcı oturma üzerinde etkisi yok denecek kadar azdır.
- Kaplamayla ilgili faktörlerden sıcak asfalt tabakası kalınlığı, temel kalınlığı ve taban zemini esneklik modülü hem lastik izi hasarı hem de yorulma hasarı üzerinde çok önemli etkiye sahiptir.
- Esnek üstyapılarda kalıcı oturmaya sebep olan en önemli faktör taban zeminin esneklik modülüdür. Çok düşük taban zemini esneklik modülüne sahip yollarda yüksek oranda kalıcı oturma oluşabilmektedir.
- Sıcaklık nedeniyle sıcak asfalt tabakasının elastisite modülü ve poisson oranında düşüşler yaşanmakta, bu durum; esnek üstyapıda oluşan gerilme ve deformasyonların artmasına sebep olmakta ve kaplamada oluşan hasarı artırıcı etki göstermektedir. Sıcak asfalt tabakasının elastisite modülü lastik izi hasarı ve yorulma hasarı oluşmasında bir miktar etkiye sahiptir. Poisson oranı ise elastisite modülüne göre daha düşük bir etkiye sahiptir. Elastisite modülü ve poisson oranının kalıcı oturma üzerindeki etkisi ise yok denecek kadar azdır.

Öneri olarak esnek üstyapılarda lastik izi ve yorulma hasarı ile kalıcı deformasyonu azaltmak için;

- SPMT'nin modül sayısı artırılarak aks yükünün 40,45 tondan 20 tona düşürülmesi; kaplamanın lastik izi hasarı ömrünü 15,3 kat, yorulma hasarı ömrünü 7,1 kat, kaplama yüzeyindeki kalıcı oturmaya ise %70 oranında azaltmaktadır. Bu sebeple SPMT modüllerinin artırılarak aks yükünün düşürülmesi lastik izi ve yorulma ömrünü artıran en önemli etkidir.
- Çiftteker arası mesafe taşıma esnasında 24,4 inç olarak belirlenmiştir. Farklı bir SPMT modülü kullanılarak bu mesafe 30 inçe kadar çıkarılabilmektedir. Mesafenin artırılmasıyla kaplamanın lastik izi hasarı ömrü %29, yorulma hasarı

ömrünü %21 artırabilmek mümkündür. Çiftteker arası mesafenin kalıcı oturma üzerindeki etkisi ise yok denecek kadar azdır.

- SPMT'nin lastik basıncı taşıma esnasında 1000 kPa olarak belirlenmiştir. Lastik basıncının artması sonucunda; aynı yük kaplama yüzeyinde daha küçük bir alana etki edeceğinden üstyapı tabakalarında oluşan gerilmelerde artış olacaktır. Bu da oluşacak deformasyon miktarını artıracak ve kaplamanın ömrünün kısalmasına sebep olacaktır. Lastik basıncı 560 kPa'ya düşürülerek kaplamanın lastik izi ömrü %61, yorulma ömrü ise %18 oranında artırılabilir. Lastik basıncının kalıcı oturma üzerinde hiç etkisi yoktur. Çünkü kalıcı oturma aracın aks yükünün miktarıyla orantılı olarak artmakta ya da azalmaktadır.
- SPMT'nin geçeceği karayolunun üstyapı kalınlığı 2 inç (5 cm) sıcak asfalt, 8 inç (20 cm) granüler temel olarak belirlenmiştir. İnce sıcak asfalt tabakalarında granüler temel tabakası aks yüklerine yüksek miktarda maruz kalacağından sadece granüler temel tabakasının kalınlığının artırılması kaplamanın lastik izi ve yorulma hasar ömrünü büyük oranda etkilemektedir. Sıcak asfalt tabakasının daha kalın seçilmesi durumunda ise granüler temel tabakasının hasar üzerindeki etkisi nispeten daha düşük olacaktır. Bu sebeple tasarım yapılırken ihtiyaçlar doğrultusunda fayda-maliyet analizi yapılarak kaplama kalınlıklarının bu doğrultuda artırılması yerinde olacaktır. Sadece sıcak asfalt tabakasının 2 inç yerine 6 inç olarak belirlenmesi durumunda lastik izi ömrü 11 kat, yorulma ömrü 5 kat artmakta, kalıcı deformasyon ise %25 oranında düşmektedir.
- Sıcak asfalt tabakasının elastisite modülü ve poisson oranı kaplamanın ömrünü etkileyen diğer faktörlerdendir. Taşımanın yüksek sıcaklıklarda yapılması durumunda sıcak asfalt tabakasının elastisite modülü ve poisson oranı değişeceğinden, bu durum; esnek üstyapıda oluşan gerilme ve deformasyonların değişmesine sebep olmaktadır. Bu sebeple taşımanın yüksek sıcaklıklarda yapılmaması yerinde olacaktır.
- Taban zeminin esneklik modülü özellikle kalıcı oturmayı etkileyen en önemli faktördür. Taşımanın yapılacağı karayolunun esneklik modülü 6.350 psi olarak belirlenmiş olup, esneklik modülünün 20.000 psi olması durumunda kaplamanın lastik izi ömrü 6,5 kat, yorulma ömrü 3 kat artmakta, oluşacak kalıcı oturma ise

%57 oranında azalacaktır. Tam aksi durumda esneklik modülünün 3.000 psi olarak belirlenmesi lastik izi ömrünü 3'te birine düşürmekte, yorulma ömrünü ise 27'de birine düşürmektedir. Kalıcı oturma ise 2,6 katına çıkacaktır. Taşıma yapılacak yolla ilgili fayda-maliyet analizi yapılarak ihtiyaç doğrultusunda en ekonomik yolun yapılabilmesi için taban zeminine kullanılacak malzemenin bu doğrultuda belirlenmesi yerinde olacaktır.

Yapının karayolunda SPMT ile taşınması esnasında yolda oluşacak kalıcı oturmalar hassas ölçüm cihazlarıyla ölçülerek bu çalışmada bulunan kalıcı oturma değerleriyle kıyaslanabilir, böylece mekanik-ampirik yöntemle hesaplanan kalıcı oturma değerlerinin ne kadar doğru olduğu kanıtlanmış olacaktır. Çünkü mekanik-ampirik yöntemle gerilmeler, birim şekil değiştirmeler ve kalıcı oturma hesabı yapılırken; üstyapıyla ilgili birçok kabul yapılarak sonuca ulaşılmıştır. Oysaki gerçekte durum yapılan kabullerden farklılık oluşturabilecektir. Ancak hesaplamaların yapılabilmesi için bu kabullerin yapılması şarttır. Örneğin lastiğin üstyapıya a yarıçapına sahip bir dairesel alan üzerinde üniform yayılı basınç olarak etkimesi, her bir tabakanın homojen, isotropik ve elastik özelliğe sahip olması, her tabakanın sabit bir elastisite modülü ve poisson oranına sahip olması vb.

Yapılan hesaplamalar yolun herhangi bir noktasında oluşacak gerilme, birim şekil değiştirme ve kalıcı oturmaların hesaplanması esasına dayanmaktadır. Oysaki taşıma yol boyunca yapılacağından tabakaların özellikleri yol boyunca homojenlik göstermeyebilir, özellikle taban zemini yol boyunca özellikleri en çok değişkenlik gösterecek tabakadır. Bu sebeple taşıma esnasında yapılacak ölçümlerle, hesaplanan değerler arasında farklılık olması durumunda; farklılığın olduğu bölgede tabakaların özelliklerinin daha hassas ölçülmesi ve mekanik analizde kullanılan değerlerle kıyaslama yapılması yerinde olacaktır.

KAYNAKLAR

- AASHTO, 1993, Interim Guide for Design of Pavement Structures, *American Associate of State Highway and Transportation Officials*, Washington DC.
- Aertssen, 2017, *Guide to citing Internet sources* [online], Aertssen Kranen, Belgium, <https://www.aertssen.be/files/spmt.pdf>
- Anonim, 1997, Karayolları Trafik Yönetmeliği, *Resmi Gazete, Sayı:23053*, Ankara, 416.
- Anstertrailer, 2017, *Guide to citing Internet sources* [online], Anstertrailer, China, <https://anstertrailer.com/wp-content/uploads/2017/09/SPMT-Modular-Trailer-Ultimate-Guide.pdf> [Ziyaret Tarihi : 20 Mart 2019].
- Aguib, A.A., 2013, Flexible Pavement Design AASHTO 1993 versus Mechanistic-Empirical Pavement Design, Cairo, 14-15.
- Ağar, E. ve Umar, F., 1991, Yol Üstyapısı, *İTÜ Ulaştırma Anabilim Dalı*.
- Avcı, S., 2006, Esnek Üstyapı Tasarım Yöntemlerinden AASHTO 2002 ile AASHTO 1993 Yönteminin Karşılaştırılması, *İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 222-240.
- Baladi, G.Y. ve McKelvey F.X., 1994, Mechanistic Evaluation and Calibration of the AASHTO Design Equations and Mechanistic Analysis of the SHRP Asphalt Surfaced Pavement Sections, Washington DC, 87.
- Boone, J.N. 2013, Comparison of Ontario Pavement Designs Using the AASHTO 1993 Empirical Method and the Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide Method, Ontario, 1-2.
- Carvalho, R.L.H., 2006, Mechanistic Empirical Design of Flexible Pavements: A Sensitivity Study, Maryland, 22-26.
- Chen, X., Lambert, J.R., Tsai, C., Zhang, Z., 2012, Evaluation of Superheavy Load Movement on Flexible Pavements, *International Journal of Pavement Engineering*, USA, 1-9.
- Dawid, R. Ve Piotr, J., 2018, Analysis of Pavement Structure Sensitivity to Passage of Oversized Heavy Duty Vehicle in Terms of Bearing Capacity, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 356-012013, 4.
- DSİ, 2016, Zeynel Bey Türbesinin Taşıma Güzergahı Jeolojik-Jeoteknik Etüt Raporu, *Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü*, 1-86.
- Erdal, M., Görçün, Ö.F., Saygılı, M.S., 2008, Entegre Lojistik Yönetimi, *İkinci Baskı*, İstanbul, 263-272.
- Everett, S.R., 2015, Overweight Vehicle Permitting Alternatives, *Purdue University, Doctor of Philosophy*, India, 69-81.

- Hanlı, E., 2009, Esnek Yol Üstyapısında Oluşan Bozulmalar ve değerlendirilmesi, *İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 42-48.
- Fick, S.B., 2010, Evaluation of the AASHTO Empirical and Mechanistic-Empirical Pavement Design Procedures Using the AASHTO Roas Test, Maryland, 50-51.
- Gupta, A., Kumar, A., 2014, Comparative Structural Analysis of Flexible Pavements Using Finite Element Method, *The International Journal of Pavement Engineering and Asphalt Technology*, Volume:15, Issue:1, May 2014, 11-19.
- Huang, Y.H., 2004, Pavement Analysis and Design, *Second Edition*, Kentucky, 510.
- KGM, 2006, Karayolları Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi, *TC Ulaştırma ve Haberleşme Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı Üstyapı Şubesi Müdürlüğü*, Ankara, 15-19.
- KGM, 2017, İl Yollarının Trafik Dilimlerine Göre Yıllık Ortalama Günlük Trafik Değerleri ve Ulaşım Bilgileri, *TC Ulaştırma ve Haberleşme Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü Trafik Güvenliği Dairesi Başkanlığı Ulaşım Etütleri Şubesi Müdürlüğü*, Ankara, 123-128.
- Khanal, S., Hein, D.K., Olidis, C., 2016, Modelling Pavement Response to Superheavy Load Movement, *Conference of the Transportation Association of Toronto*, Canada, 9-11.
- Kök, B.V. ve Kuloğlu N., 2007, Esnek Üstyapı Tasarımında AASHTO-1972 ve AASHTO-1986 Yöntemlerinin Analitik ve Ekonomiklik Karşılaştırması, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 23 (1-2)*, Elazığ, 136-148.
- Kök, E., 2008, Karayolu ve Havaalanı Üdtyapı Tasarım Yöntemleri, Karşılaştırması ve Türkiye Uygulamaları, *İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 28-30.
- Kumar, H., 2013, Analysis of Flexible Pavement Using Kenlayer, *National Institute of Technology Kurukshetra*, India, 17-34.
- NHCRP, 1993, Effects of Heavy-Vehicle Characteristics on Pavement Response and Performance, *National Cooperative Highway Research Program Report 353*, Cambridge, United Kingdom, 1-47.
- Örnek, A., 2009, Lojistik Açısından Proje Taşımacılığı, *İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul, 8-12.
- Prozzie, J.A. ve De Beer, M., 1997, Equivalent Damage Factors (EDFs) for Multiple Load and Axle Configurations, *1997 XIIIth IRF World Meeting*, Toronto, Ontario, Canada, 10.
- Saltan, M. ve Fındık, F.S., 2014, Geniş Tabanlı ve Çift Tekerlekli Taşıtların Karayolu Esnek Üstyapıları Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi, *İsparta*, 2-11.
- Scheuerle, 2019, *Guide to citing Internet sources* [online], The TII Group, Germany, https://www.scheuerle.com/fileadmin/data_all/brochures/tii-group-spm-en.pdf [Ziyaret Tarihi : 15 Mart 2019].

- Sterling, 2019, *Guide to citing Internet sources* [online], Premay Equipment, England, <https://www.sterlingcrane.ca> › SPMT-Brochure [Ziyaret Tarihi : 15 Eylül 2019].
- Schwartz, C.W., 2007, Implementation of the NCHRP 1-37A Design Guide, *Final Report Volume 1: Summary of Findings and Implementation Plan*, Maryland, 59.
- Schwartz, C.W. ve Carvalho, R.L., 2007, Implementation of the NCHRP 1-37A Design Guide, *Final Report Volume 2: Evaluation of Mechanistic-Empirical Design Procedure*, Maryland, 4.
- Shahji, S., 2002, Sensitivity Analysis of AASHTO's 2002 Flexible and Rigid Pavement Design Methods, Orlando, 2.
- Tjan, A. Ve Fung, C., 2005, Determination of Equivalent Axle Load Factor of Trailer with Multiple Axles on Flexible Pavement Structures, *Journal of the eastern Asia Society for Transportation Studies*, Vol. 6., Indonesia, 1194-1206.
- Tunç, A., 2004, Kaplama Mühendisliği ve Uygulamaları, *Birinci Baskı*, Ankara, 72-96.
- Yoder, E.J. ve Witczak M.W., 1975, Principles of Pavement Design, *Second Edition*, New York, 507-513.

EKLER

EK-1 Üç Tabakalı Sistemlerde Jones Tablosu (Huang, 2004).

H	k ₂	A	k ₁ = 2				k ₁ = 20				k ₁ = 200			
			ZZ1	ZZ2	(ZZ1 - RR1)	(ZZ2 - RR2)	ZZ1	ZZ2	(ZZ1 - RR1)	(ZZ2 - RR2)	ZZ1	ZZ2	(ZZ1 - RR1)	(ZZ2 - RR2)
0.125	2	0.1	0.42950	0.00896	0.70622	0.01716	0.14529	0.00810	1.81178	0.01542	0.03481	0.00549	3.02259	0.00969
		0.2	0.78424	0.03493	0.97956	0.06647	0.38799	0.03170	3.76886	0.06003	0.11491	0.02167	8.02452	0.03812
		0.4	0.98044	0.12667	0.70970	0.23531	0.78651	0.11650	5.16717	0.21640	0.33218	0.08229	17.64175	0.14286
		0.8	0.99434	0.36932	0.22319	0.63003	1.02218	0.34941	3.43631	0.60493	0.72695	0.27307	27.27701	0.45208
		1.6	0.99364	0.72113	-0.19982	0.97707	0.99060	0.69014	1.15211	0.97146	1.00203	0.63916	23.38638	0.90861
		3.2	0.99922	0.96148	-0.28916	0.84030	0.99893	0.93487	-0.06894	0.88358	1.00828	0.92560	11.87014	0.91469
0.25	20	0.1	0.43022	0.00228	0.69332	0.03467	0.14447	0.00182	1.80664	0.02985	0.03336	0.00128	3.17763	0.01980
		0.2	0.78414	0.00899	0.92086	0.13541	0.38469	0.00716	3.74573	0.11697	0.10928	0.00509	8.66097	0.07827
		0.4	0.97493	0.03392	0.46583	0.49523	0.77394	0.02710	5.05489	0.43263	0.31094	0.01972	20.12259	0.29887
		0.8	0.97806	0.11350	-0.66535	1.49612	0.98610	0.09061	2.92533	1.33736	0.65934	0.07045	36.29943	1.01694
		1.6	0.96921	0.31263	-2.82859	3.28512	0.93712	0.24528	-1.27093	2.99215	0.87931	0.20963	49.40857	2.64313
		3.2	0.98591	0.68433	-5.27906	5.03952	0.96330	0.55490	-7.35384	5.06489	0.93309	0.49938	57.84369	4.89895
0.5	2	0.1	0.15524	0.00710	0.28362	0.01353	0.04381	0.00530	0.63215	0.00962	0.00909	0.00259	0.96553	0.00407
		0.2	0.42809	0.02783	0.70225	0.05278	0.14282	0.02091	1.83766	0.03781	0.03269	0.01027	3.10763	0.01611
		0.4	0.77939	0.10306	0.96634	0.19178	0.37882	0.07933	3.86579	0.14159	0.10684	0.04000	8.37852	0.06221
		0.8	0.96703	0.31771	0.66885	0.55211	0.75904	0.26278	5.50796	0.44710	0.30477	0.14513	18.95534	0.21860
		1.6	0.98156	0.66753	0.17331	0.95080	0.98743	0.61673	4.24281	0.90115	0.66786	0.42940	31.18909	0.58553
		3.2	0.99840	0.93798	-0.05691	0.89390	1.00064	0.91258	1.97494	0.93254	0.98447	0.84545	28.98500	0.89191
1	20	0.1	0.15436	0.00179	0.25780	0.02728	0.04236	0.00123	0.65003	0.01930	0.00776	0.00065	1.08738	0.00861
		0.2	0.42462	0.00706	0.67115	0.10710	0.13708	0.00488	1.90693	0.07623	0.02741	0.00257	3.59448	0.03421
		0.4	0.76647	0.02697	0.84462	0.39919	0.35716	0.01888	4.13976	0.29072	0.08634	0.01014	10.30923	0.13365
		0.8	0.92757	0.09285	0.21951	1.26565	0.68947	0.06741	6.48948	0.98565	0.23137	0.03844	26.41442	0.49135
		1.6	0.91393	0.26454	-1.22411	2.94860	0.85490	0.20115	6.95639	2.55231	0.46835	0.13148	37.46409	1.53833
		3.2	0.95243	0.60754	-3.04320	4.89878	0.90325	0.48647	6.05854	4.76234	0.71083	0.37342	99.29034	3.60964
2	20	0.1	0.04330	0.00465	0.08250	0.00878	0.01122	0.00259	0.17997	0.00440	0.00215	0.00094	0.26620	0.00128
		0.2	0.15325	0.01836	0.28318	0.03454	0.04172	0.01028	0.64779	0.01744	0.00826	0.00373	0.98772	0.00509
		0.4	0.42077	0.06974	0.70119	0.12954	0.13480	0.03998	1.89817	0.06722	0.02946	0.01474	3.19580	0.01996
		0.8	0.75683	0.23256	0.96681	0.41187	0.35175	0.14419	4.09592	0.23476	0.09508	0.05622	8.71973	0.07434
		1.6	0.93447	0.65298	0.70726	0.85930	0.70221	0.42106	6.22002	0.62046	0.27135	0.19358	20.15765	0.23838
		3.2	0.98801	0.88655	0.33878	0.96353	0.97420	0.82256	5.41828	0.93831	0.62399	0.52912	34.25229	0.54931
4	20	0.1	0.01083	0.00241	0.02179	0.00453	0.00263	0.00100	0.04751	0.00160	0.00049	0.00029	0.06883	0.00035
		0.2	0.04176	0.00958	0.08337	0.01797	0.01029	0.00347	0.18481	0.00637	0.00195	0.00116	0.26966	0.00138
		0.4	0.14665	0.03724	0.28491	0.06934	0.03810	0.01565	0.66727	0.02498	0.00746	0.00460	1.00131	0.00545
		0.8	0.39942	0.13401	0.71341	0.24250	0.12173	0.05938	1.97428	0.09268	0.02647	0.01797	3.24971	0.02092
		1.6	0.71032	0.38690	1.02680	0.63631	0.31575	0.20098	4.37407	0.29253	0.08556	0.06671	8.92442	0.07335
		3.2	0.92112	0.75805	0.90482	0.97509	0.66041	0.53398	6.97695	0.65446	0.25186	0.22047	20.83387	0.21288
2	20	0.1	0.00963	0.00061	0.02249	0.00920	0.00193	0.00024	0.05737	0.00322	0.00027	0.00007	0.08469	0.00062
		0.2	0.03697	0.00241	0.08618	0.03654	0.00751	0.00098	0.22418	0.01283	0.00104	0.00028	0.33312	0.00248
		0.4	0.12805	0.00950	0.29640	0.14241	0.02713	0.00387	0.82430	0.05063	0.00384	0.00110	1.25495	0.00985
		0.8	0.33263	0.03578	0.76292	0.51815	0.08027	0.01507	2.59672	0.19267	0.01236	0.00436	4.26100	0.03825
		1.6	0.57721	0.12007	1.25168	1.56503	0.17961	0.05549	6.77014	0.66326	0.03379	0.01683	12.91809	0.13989
		3.2	0.65530	0.33669	1.70723	3.51128	0.34355	0.18344	15.23252	1.88634	0.08859	0.06167	36.04291	0.45544
2	20	0.1	0.00250	0.00100	0.00555	0.00188	0.00059	0.00033	0.01219	0.00051	0.00011	0.00008	0.01737	0.00009
		0.2	0.00991	0.00397	0.02199	0.00750	0.00235	0.00130	0.04843	0.00203	0.00045	0.00033	0.06913	0.00036
		0.4	0.03832	0.01569	0.08465	0.02950	0.00922	0.00518	0.18857	0.00803	0.00179	0.00131	0.27103	0.00142
		0.8	0.13516	0.05974	0.29365	0.11080	0.03412	0.02023	0.68382	0.03093	0.00685	0.00520	1.00808	0.00553
		1.6	0.36644	0.20145	0.75087	0.35515	0.10918	0.07444	2.04134	0.10864	0.02441	0.02003	3.27590	0.02043
		3.2	0.67384	0.51156	1.17294	0.77434	0.29183	0.23852	4.60426	0.30709	0.08061	0.07248	9.02195	0.06638
4	20	0.1	0.00181	0.00025	0.00652	0.00378	0.00033	0.00008	0.01568	0.00094	0.00005	0.00002	0.02160	0.00014
		0.2	0.00716	0.00099	0.02586	0.01507	0.00130	0.00031	0.06236	0.00374	0.00018	0.00007	0.08604	0.00058
		0.4	0.02746	0.00394	0.10017	0.05958	0.00503	0.00123	0.24425	0.01486	0.00071	0.00030	0.33866	0.00229
		0.8	0.09396	0.01535	0.35641	0.22795	0.01782	0.00485	0.90594	0.05789	0.00261	0.00119	1.27835	0.00901
		1.6	0.23065	0.05599	1.00785	0.78347	0.05012	0.01862	2.91994	0.21190	0.00819	0.00467	4.35311	0.03390
		3.2	0.37001	0.17843	2.16033	2.13215	0.11331	0.06728	7.95104	0.67732	0.02341	0.01784	13.26873	0.11666
4	20	0.1	0.00057	0.00034	0.00147	0.00065	0.00013	0.00010	0.00312	0.00015	0.00003	0.00002	0.00437	0.00002
		0.2	0.00228	0.00137	0.00587	0.00260	0.00054	0.00039	0.01245	0.00029	0.00011	0.00009	0.01746	0.00009
		0.4	0.00905	0.00544	0.02324	0.01032	0.00214	0.00154	0.04944	0.00235	0.00042	0.00036	0.06947	0.00036
		0.8	0.03500	0.02135	0.08957	0.04031	0.00837	0.00610	0.19247	0.00924	0.00168	0.00142	0.27221	0.00144
		1.6	0.12354	0.07972	0.31215	0.14735	0.03109	0.02358	0.69749	0.03488	0.00646	0.00560	1.01140	0.00553
		3.2	0.34121	0.25441	0.81908	0.43632	0.10140	0.08444	2.09049	0.11553	0.02332	0.02126	3.28913	0.01951
4	20	0.1	0.00030	0.00008	0.00201	0.00128	0.00005	0.00002	0.00413	0.00025	0.00001	0.00000	0.00545	0.00003
		0.2	0.00119	0.00034	0.00803	0.00510	0.00021	0.00009	0.01651	0.00099	0.00003	0.00002	0.02178	0.00014
		0.4	0.00469	0.00134	0.03191	0.02032	0.00083	0.00035	0.06569	0.00396	0.00013	0.00008	0.08673	0.00054
		0.8	0.01790	0.00532	0.12427	0.07991	0.00321	0.00138	0.25739	0.01565	0.00050	0.00031	0.34131	0.00215
		1.6	0.06045	0.02049	0.45100	0.29991	0.01130	0.00542	0.95622	0.05993	0.00186	0.00124	1.28773	0.00833
		3.2	0.14979	0.07294	1.36427	0.97701	0.03258	0.02061	3.10980	0.20906	0.00612	0.00483	4.38974	0.03010

EK-2 Kenpave Program Çıktı Örneği (Esnek Üstyapıda Oluşan Gerilmeler ve Kalıcı Deformasyon)

NUMBER OF PROBLEMS TO BE SOLVED = 1

TITLE -NPROB

MATL = 1 FOR LINEAR ELASTIC LAYERED SYSTEM
 NDAMA = 0, SO DAMAGE ANALYSIS WILL NOT BE PERFORMED
 NUMBER OF PERIODS PER YEAR (NPY) = 1
 NUMBER OF LOAD GROUPS (NLG) = 1
 TOLERANCE FOR INTEGRATION (DEL) -- = 0.001
 NUMBER OF LAYERS (NL)----- = 3
 NUMBER OF Z COORDINATES (NZ)----- = 8
 LIMIT OF INTEGRATION CYCLES (ICL)- = 80
 COMPUTING CODE (NSTD)----- = 9
 SYSTEM OF UNITS (NUNIT)----- = 0

Length and displacement in in., stress and modulus in psi
 unit weight in pcf, and temperature in F

THICKNESSES OF LAYERS (TH) ARE : 2 8
 POISSON'S RATIOS OF LAYERS (PR) ARE : 0.2 0.35 0.45
 VERTICAL COORDINATES OF POINTS (ZC) ARE: 0 2 2.001 6 10 10.001 14
 20
 ALL INTERFACES ARE FULLY BONDED

FOR PERIOD NO. 1 LAYER NO. AND MODULUS ARE : 1 1.000E+06 2
 5.000E+05
 3 6.350E+03

LOAD GROUP NO. 1 HAS 2 CONTACT AREAS
 CONTACT RADIUS (CR)----- = 6.98
 CONTACT PRESSURE (CP)----- = 145
 NO. OF POINTS AT WHICH RESULTS ARE DESIRED (NPT)-- = 7
 WHEEL SPACING ALONG X-AXIS (XW)----- = 0
 WHEEL SPACING ALONG Y-AXIS (YW)----- = 24.4

RESPONSE PT. NO. AND (XPT, YPT) ARE: 1 0.000 -6.980 2 0.000 0.000
 3 0.000 6.980 4 0.000 12.200 5 0.000 17.420 6 0.000 24.400
 7 0.000 31.380

PERIOD NO. 1 LOAD GROUP NO. 1

POINT NO.	VERTICAL COORDINATE	VERTICAL DISP.	VERTICAL STRESS (STRAIN)	MAJOR PRINCIPAL STRESS (STRAIN)	MINOR PRINCIPAL STRESS (STRAIN)	INTERMEDIATE P. STRESS (HORIZONTAL P. STRAIN)
1	0.00000	0.07081	145.000	327.947	67.026	218.338
	(STRAIN)		-4.223E-05	2.709E-04	-4.223E-05	1.393E-04
1	2.00000	0.07089	60.141	158.450	14.183	135.746
	(STRAIN)		1.049E-05	1.285E-04	-4.466E-05	7.331E-05
1	2.00100	0.07089	60.134	146.582	7.865	104.634
	(STRAIN)		-1.900E-05	2.144E-04	-1.601E-04	7.329E-05
1	6.00000	0.07070	27.307	64.297	-66.548	-54.590
	(STRAIN)		1.135E-04	2.134E-04	-1.399E-04	-1.076E-04
1	10.00000	0.06993	8.085	8.102	-226.953	-156.660
	(STRAIN)		2.847E-04	2.847E-04	-3.499E-04	-3.499E-04
1	10.00100	0.06993	8.085	8.713	3.255	3.458
	(STRAIN)		7.530E-04	8.964E-04	-3.499E-04	-3.499E-04
1	14.00000	0.06694	7.271	7.775	2.490	2.704
	(STRAIN)		7.412E-04	8.563E-04	-3.504E-04	-3.504E-04
1	20.00000	0.06260	6.271	6.668	1.724	1.915
	(STRAIN)		7.016E-04	7.922E-04	-3.367E-04	-3.367E-04
2	0.00000	0.07753	145.000	449.902	152.273	410.273
	(STRAIN)		-1.976E-05	3.374E-04	-1.976E-05	2.898E-04
2	2.00000	0.07695	133.631	180.777	126.499	150.359
	(STRAIN)		6.883E-05	1.254E-04	6.027E-05	8.035E-05
2	2.00100	0.07695	133.619	159.371	126.325	149.981
	(STRAIN)		5.580E-05	1.253E-04	3.610E-05	8.028E-05
2	6.00000	0.07639	60.104	61.537	-63.522	-52.028
	(STRAIN)		2.001E-04	2.040E-04	-1.337E-04	-1.337E-04
2	10.00000	0.07527	9.936	9.939	-296.299	-249.914
	(STRAIN)		4.022E-04	4.022E-04	-4.246E-04	-4.246E-04
2	10.00100	0.07527	9.935	10.043	3.676	4.117
	(STRAIN)		1.005E-03	1.029E-03	-4.246E-04	-4.246E-04
2	14.00000	0.07143	8.569	8.708	2.761	3.158
	(STRAIN)		9.202E-04	9.519E-04	-4.061E-04	-4.061E-04
2	20.00000	0.06620	7.156	7.304	1.884	2.185
	(STRAIN)		8.281E-04	8.619E-04	-3.758E-04	-3.758E-04
3	0.00000	0.07887	145.000	402.813	81.598	319.620
	(STRAIN)		-6.289E-05	3.226E-04	-6.289E-05	2.227E-04
3	2.00000	0.07843	60.133	168.756	43.124	165.460
	(STRAIN)		-3.308E-06	1.270E-04	-2.372E-05	1.027E-04
3	2.00100	0.07843	60.126	138.915	37.389	125.189
	(STRAIN)		-4.871E-05	1.640E-04	-1.101E-04	1.026E-04
3	6.00000	0.07826	28.011	38.966	-68.528	-51.306
	(STRAIN)		1.322E-04	1.618E-04	-1.284E-04	-1.284E-04
3	10.00000	0.07732	9.749	9.749	-277.881	-197.540
	(STRAIN)		3.523E-04	3.523E-04	-4.243E-04	-4.243E-04
3	10.00100	0.07732	9.749	9.751	3.855	4.803
	(STRAIN)		9.216E-04	9.220E-04	-4.243E-04	-4.243E-04

3	14.00000	0.07362	8.801	8.808	2.910	3.602
	(STRAIN)		9.240E-04	9.256E-04	-4.212E-04	-4.212E-04
3	20.00000	0.06820	7.540	7.561	1.978	2.407
	(STRAIN)		8.751E-04	8.800E-04	-3.949E-04	-3.949E-04
4	0.00000	0.07885	0.000	377.897	55.091	277.513
	(STRAIN)		-7.599E-05	3.114E-04	-7.599E-05	1.909E-04
4	2.00000	0.07820	-0.615	173.804	-0.615	143.010
	(STRAIN)		-6.398E-05	1.453E-04	-6.398E-05	1.084E-04
4	2.00100	0.07820	-0.614	104.044	-0.614	90.378
	(STRAIN)		-1.373E-04	1.453E-04	-1.373E-04	1.084E-04
4	6.00000	0.07832	5.428	5.428	-68.425	-32.684
	(STRAIN)		8.163E-05	8.163E-05	-1.178E-04	-1.178E-04
4	10.00000	0.07753	9.391	9.391	-258.623	-158.932
	(STRAIN)		3.111E-04	3.111E-04	-4.126E-04	-4.126E-04
4	10.00100	0.07753	9.391	9.391	3.884	5.063
	(STRAIN)		8.448E-04	8.448E-04	-4.126E-04	-4.126E-04
4	14.00000	0.07401	8.730	8.730	2.942	3.743
	(STRAIN)		9.011E-04	9.011E-04	-4.207E-04	-4.207E-04
4	20.00000	0.06863	7.597	7.597	1.999	2.469
	(STRAIN)		8.798E-04	8.798E-04	-3.985E-04	-3.985E-04
5	0.00000	0.07887	145.000	402.813	81.598	319.620
	(STRAIN)		-6.289E-05	3.226E-04	-6.289E-05	2.227E-04
5	2.00000	0.07843	60.133	168.758	43.124	165.458
	(STRAIN)		-3.308E-06	1.270E-04	-2.372E-05	1.027E-04
5	2.00100	0.07843	60.126	138.915	37.389	125.189
	(STRAIN)		-4.871E-05	1.640E-04	-1.101E-04	1.026E-04
5	6.00000	0.07826	28.011	38.966	-68.528	-51.306
	(STRAIN)		1.322E-04	1.618E-04	-1.284E-04	-1.284E-04
5	10.00000	0.07732	9.749	9.749	-277.881	-197.540
	(STRAIN)		3.523E-04	3.523E-04	-4.243E-04	-4.243E-04
5	10.00100	0.07732	9.749	9.751	3.855	4.803
	(STRAIN)		9.216E-04	9.220E-04	-4.243E-04	-4.243E-04
5	14.00000	0.07362	8.801	8.808	2.910	3.602
	(STRAIN)		9.240E-04	9.256E-04	-4.212E-04	-4.212E-04
5	20.00000	0.06820	7.540	7.561	1.978	2.407
	(STRAIN)		8.751E-04	8.800E-04	-3.949E-04	-3.949E-04
6	0.00000	0.07753	145.000	449.902	152.273	410.273
	(STRAIN)		-1.976E-05	3.374E-04	-1.976E-05	2.898E-04
6	2.00000	0.07695	133.631	180.777	126.499	150.359
	(STRAIN)		6.883E-05	1.254E-04	6.027E-05	8.035E-05
6	2.00100	0.07695	133.619	159.371	126.325	149.981
	(STRAIN)		5.580E-05	1.253E-04	3.610E-05	8.028E-05
6	6.00000	0.07639	60.104	61.537	-63.522	-52.028
	(STRAIN)		2.001E-04	2.040E-04	-1.337E-04	-1.337E-04
6	10.00000	0.07527	9.936	9.939	-296.299	-249.914
	(STRAIN)		4.022E-04	4.022E-04	-4.246E-04	-4.246E-04
6	10.00100	0.07527	9.935	10.043	3.676	4.117
	(STRAIN)		1.005E-03	1.029E-03	-4.246E-04	-4.246E-04
6	14.00000	0.07143	8.569	8.708	2.761	3.158
	(STRAIN)		9.202E-04	9.519E-04	-4.061E-04	-4.061E-04

6	20.00000	0.06620	7.156	7.304	1.884	2.185
	(STRAIN)		8.281E-04	8.619E-04	-3.758E-04	-3.758E-04
7	0.00000	0.07081	145.000	327.947	67.026	218.338
	(STRAIN)		-4.223E-05	2.709E-04	-4.223E-05	1.393E-04
7	2.00000	0.07089	60.141	158.450	14.184	135.746
	(STRAIN)		1.049E-05	1.285E-04	-4.466E-05	7.331E-05
7	2.00100	0.07089	60.134	146.582	7.865	104.634
	(STRAIN)		-1.900E-05	2.144E-04	-1.601E-04	7.329E-05
7	6.00000	0.07070	27.307	64.297	-66.548	-54.590
	(STRAIN)		1.135E-04	2.134E-04	-1.399E-04	-1.076E-04
7	10.00000	0.06993	8.085	8.102	-226.953	-156.660
	(STRAIN)		2.847E-04	2.847E-04	-3.499E-04	-3.499E-04
7	10.00100	0.06993	8.085	8.713	3.255	3.458
	(STRAIN)		7.530E-04	8.964E-04	-3.499E-04	-3.499E-04
7	14.00000	0.06694	7.271	7.775	2.490	2.704
	(STRAIN)		7.412E-04	8.563E-04	-3.504E-04	-3.504E-04
7	20.00000	0.06260	6.271	6.668	1.724	1.915
	(STRAIN)		7.016E-04	7.922E-04	-3.367E-04	-3.367E-04

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Durmuş Ali YILMAZOK
Uyruğu : Türkiye Cumhuriyeti
Doğum Yeri ve Tarihi : Ereğli-1984
Telefon : 05075089837
Faks :
e-mail : yilmazok@selcuk.edu.tr

EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise	: Ereğli Lisesi, Ereğli, KONYA	2000
Üniversite	: İstanbul Teknik Üniversitesi	2005
Yüksek Lisans	:	
Doktora	:	

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2005-2007	Ağaoğlu İnşaat	Saha Mühendisi
2007-2016	Karayolları Genel Müdürlüğü	Kontrol Şefi
2016-2018	Selçuk Üniversitesi	İç Denetçi

UZMANLIK ALANI

Karayolları, Kamuda Denetim

YABANCI DİLLER

İngilizce-İyi Derecede

BELİRTMEK İSTEĞİNİZ DİĞER ÖZELLİKLER

YAYINLAR

ICOLES 2019 2nd International Conference on Life and Engineering Sciences, 27-29

Haziran 2019, İstanbul, Türkiye.