

**T.C.
SÜLEYMAN DEMİREL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ANFİS YÖNTEMİNİN ESNEK YOL ÜSTYAPILARININ YAPISAL
ANALİZİNDE KULLANILABİLİRLİĞİ**

Fakhr Abdulsada YASEEN

**Danışman
Prof. Dr. Mehmet SALTAN**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
İSPARTA – 2016**



© 2016 [Fakhir Abdulsada YASEEN]

TEZ ONAYI

Fakhr Abdulsada YASEEN tarafından hazırlanan " **ANFIS Yönteminin Esnek Yol Üstyapılarının Yapısal Analizinde Kullanılabilirliği**" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri üyeleri önünde Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak başarı ile savunulmuştur.

Danışman

Prof. Dr. Mehmet SALTAN
Süleyman Demirel Üniversitesi

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Serdal TERZİ
Süleyman Demirel Üniversitesi

Jüri Üyesi

Yard. Doç. Dr. Sedat ÇETİN
Afyon Kocatepe Üniversitesi



Enstitü Müdürü

Doç. Dr. Yasin TUNCER.

TAAHHÜTNAME

Bu tezin akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.

Fakhir Abdulsada YASEEN

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER.....	i
ÖZET.....	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Genel Bakış.....	1
1.2. Çalışmanın Amacı Ve İzlenen Yol	8
2. KAYNAK ÖZETLERİ.....	10
2.1. Geri Hesaplama	10
2.2. Esnek Üstyapının Kalan Ömrü.....	10
2.3. Adaptif Ağ Yapılı Bulanık Çıkarım Sistemi(ANFIS).....	11
3. KARAYOLU ÜSTYAPI	19
3.1. Genel Bakış.....	19
3.2. Karayolu Üstyapıları	21
3.3. Karayolu Esnek ÜstYapıları	22
3.3.1. Esnek üstyapıyı oluşturan tabakalar ve görevleri.....	23
3.3.1.1. Taban zemini	25
3.3.1.2. Alttemel tabakası	25
3.3.1.3. Temel tabakası.....	26
3.3.1.4. kaplama tabakası	26
3.3.2. Esnek üstyapı tabakalarındaki gerilme ve şekil değiştirme.....	28
3.3.2.1. KENLAYER programı	30
3.3.3. Gerilme-deformasyonlara bağlı yolda oluşan tipik bozulmalar	32
3.3.3.1. Tekerlek izi bozulmalar	32
3.3.3.2. Yorulma çatlakları	33
3.3.4. Üstyapıların durumunun belirlenmesi.....	34
3.3.5. Esnek üstyapılar kalan ömrü.	36
3.3.5.1. Mevcut üstyapıların kalan ömrü hesaplaması	39
4. ÜSTYAPIDA TAHRİBATSIZ YÖNTEMLER.....	42
4.1. Genel Bakış.....	42
4.2. Üstyapıda Tahribatsız Test Yöntemleri	43
4.2.1. Defleksiyon temelli yöntemler	45
4.2.1.1. Statik yüklemeli yöntem	46
4.2.1.1.1. Benkelman kirişi	46
4.2.1.1.2. Traveling deflektometre ve deflectograph.....	48
4.2.1.2. Sabit-sarsıcı yükleme yapan aletler	50
4.2.1.2.1. Dynaflect aleti	51
4.2.1.2.2. Road rater aleti	53
4.2.1.2.3. Rolling dinamik deflektometre (RDD)	53
4.2.1.3. Ani çarpma yükleme yapan aletleri.....	57
4.2.1.4. Sürekli yüklemeli defleksiyonlar ölçer	60
4.2.2. Elektromanyetik yöntemler	61
4.2.2.1. Zemin penetrasyon radarı (GPR).....	61

4.2.2.2. Nükleer elektromanyetik yöntemler (NYÖ).....	65
4.2.2.3. Nükleer olmayan elektromanyetik yöntemler (PQI)	67
4.2.2.4. İnfrared tomografi yöntemi	69
4.2.2.5. lazerli profil yöntemi.....	70
4.2.2.6. Manyetik görüntüleme teknikler	71
4.2.3. Gerilme dalga yöntemleri.....	73
4.2.3.1. Darbe-yankı yöntemi(Impact- Echo IE-Pulse Echo PE) .	74
4.2.3.2. Ultrases geçiş hızı cihazı (UGH).....	75
4.2.3.3. Yüzey dalgaların spektral analizi (SASW).....	76
4.2.4. Diğer tahribatsız değerlendirme teknikleri.....	78
4.2.4.1. Akıllı kompaktör	78
4.2.4.2. Yüzey sürtünmesi ölçüm cihazları	79
5. DÜŞEN AĞIRLIKLI DEFLEKTOMETRE ALETİ(DAD)	86
5.1. Genel Bakış.....	86
5.2. Düşen Ağırlık Deflektometre Cihazı.....	87
5.3. Düşen Ağırlık Deflektometre Aleti Çalışması.....	88
5.4. Düşen Ağırlık Deflektometre Test Sistemi	89
5.5. Düşen Ağırlıklı Deflektometresinde Veri Toplama.....	90
5.6. Defleksiyon Ölçümünün Aralığı, Zaman ve Lokasyonun.....	91
5.7. Düşen Ağırlıklı Deflektometrenin Faydaları.....	92
5.8. Düşen Ağırlıklı Deflektometre Modelleri.....	92
5.8.1. Dynatest düşen ağırlıklı deflektometre.....	94
5.8.2. KUAB düşen ağırlıklı deflektometre.....	95
5.8.3. Phoenix düşen ağırlıklı deflektometre	96
5.8.4. Diğer düşen ağırlıklı deflektometre modeller	96
5.8.4.1. JILS düşen ağırlıklı deflektometre.....	97
5.8.4.2. IITKGP düşen ağırlıklı deflektometre	98
5.8.4.3. CARL BRO GROUP düşen ağırlıklı deflektometre	100
5.8.4.4. Geotran düşen ağırlıklı deflektometre	101
5.8.4.5. Nagaoka düşen ağırlıklı deflektometre	102
5.9. Defleksiyonları Etkileyen Faktörler	104
5.9.1. Yükleme faktörleri.....	104
5.9.2. Üstyapı durumu	106
5.9.3. Mevsimsel etkiler.....	107
5.9.3.1. Sıcaklığın etkisi.....	109
5.9.3.2. Nemin etkisi	112
5.9.4. Defleksiyon eğrisi	112
6. ADAPTİF SİNİR AĞINA DAYALI BULANIK ÇIKARIM SİSTEMİ (ANFIS).....	115
6.1. Genel Bakış.....	115
6.2. Adaptif Ağ Yapılı Bulanık Çıkarım Sistemi	115
6.3. Adaptif Sinir Ağına Dayalı Bulanık Çıkarım Sistemi Görevi.....	117
6.4. Adaptif Sinir Ağına Dayalı Bulanık Çıkarım Sistemi Yapısı.....	119
6.5. ANFIS Tasarımcı Penceresi	121
6.5.1 Pilot bölge.....	121
6.5.2. Tipik bir iş akışını desteklemek için farklı alanlar	122
6.5.2.1. Veri yükleme ve temizleme	122
6.5.2.2. Başlangıç FIS yapısını üretme veya yükleme.....	123
6.5.2.3. FIS'ın Eğitimi.....	123
6.5.2.4. FIS'ın Doğrulanması	124

7. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	125
7.1. Esnek Üstyapı Kalan Ömrü Hesaplaması	125
7.2. Esnek Üstyapı Kalan Ömrü Tahmini	130
7.2.1 ANFIS'in ana penceresi.....	130
7.2.1.1. Veri yükleme.....	131
7.2.1.2. FIS yapısını üretme	132
7.2.1.3. FIS eğitimi	134
7.2.1.4. FIS testi.....	134
7.2.2. Bulanık çıkarım sistem editörü.....	135
7.2.3. Üyelik fonksiyon editörü	135
7.2.4. ANFIS modelin yapısı	140
7.2.5. Kural editörü.....	141
7.2.6. Kural izleyici.....	142
7.2.7. ANFIS modelinin testi	143
7.2.7.1. Eğitim seti	143
7.2.7.2. Test seti.....	144
8. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	146
8.1. Esnek Üstyapı Kalan Ömrü Hesaplaması	146
8.2. Esnek Üstyapı Kalan Ömrü Tahmini	146
KAYNAKLAR	148
EKLER	154
EK A. KENLAYER Programını Pencereleleri ve Sonuçları.....	155
EK B. KENLAYER programını sonuçları	160
ÖZGEÇMİŞ	161

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ANFIS YÖNTEMİNİN ESNEK YOL ÜSTYAPILARININ YAPISAL ANALİZİNDE KULLANILABİLİRLİĞİ

Fakhr Abdulsada YASEEN

Süleyman Demirel Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Mehmet SALTAN

Kullanımdaki bir kaplamanın kalan ömrünü doğru bir şekilde değerlendirme ihtiyacı, karayolu harcamalarında son zamanlarda yeni bir kaplamanın inşaatından kaplama rehabilitasyonuna kadar uzanan büyük değişimlerin ışığında büyük ölçüde önemi giderek artan bir sorun olmaktadır. Bu nedenle, kaplama yapısının kalan ömrünü doğru bir şekilde tahmin etmek gereklidir. Herhangi bir rehabilitasyon girişiminde bulunulmadan önce, karayolu mühendisleri rehabilitasyonun boyutunu belirlemek için mevcut kaplamanın kalan ömrünü tahmin etmelidirler. Kalan ömür, kaplama sisteminin gelecekteki rehabilitasyon ihtiyaçlarının tahmin edilmesinde çok önemli bir rol oynamaktadır. Gelecekteki planlama ve bütçe oluşturma amacıyla, sistemdeki her bir kaplama kesiminin kalan ömrünü tahmin etmek önemlidir. Bu sadece büyük bir rehabilitasyonun zamanlaması için yararlı olmamakta aynı zamanda ağır uzun vadeli ihtiyaçlarını tahmin etmede yöneticilere yardımcı olmaktadır. Bir BSK (Bitümlü Sıcak Karışım) kaplamasının kalan ömrünü tahmin etmek için çeşitli tahribatsız test yöntemlerinden geliştirilmiş malzeme özelliklerini kullanan farklı tahmin modelleri vardır.

Bu çalışmada esnek üstyapı kalan ömrü tahmini, Adaptif Ağ Yapısına Dayalı Bulanık Çıkarım Sistemi (ANFIS) uygulayarak yapılmıştır. Tahmin metotlarında girdiler olarak, tabaka sayısı, yük tekrar sayısı, elastisite modülü (iki tabaka asfalt, temel ve taban zemini), tabaka kalınlığı (iki asfalt ve temel) parametreleri kullanılmış ve esnek üstyapı kalan ömrü çıktı olarak alınmıştır. Tahmin edilen sonuçlar elde edilmiş hesaplama sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak tahmin edilen verilerin hesaplama verileriyle oldukça yakın olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Esnek üstyapı, Tahribatsız testleri, Düşen Ağırlık Deflektometre (DAD), ANFIS, Esnek üstyapı kalan ömrü.

2016, 161 sayfa

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

USABILITY OF ADAPTIVE NEURO-FUZZY INFERENCE SYSTEM (ANFIS) FOR STRUCTURAL ANALYSIS OF HIGHWAY FLEXIBLE PAVEMENTS

Fakhir Abdulsada YASEEN

**Süleyman Demirel University
Graduate School of Applied and Natural Sciences
Department of Civil Engineering**

Supervisor: Prof. Dr. Mehmet SALTAN

The need for an accurate assessment of the remaining life of a pavement in service is a problem of greatly increasing importance in light of recent major shifts in highway expenditures from new pavement construction to pavement rehabilitation. So, it is necessary to accurately predict the remaining life of the pavement structure. Before any rehabilitation effort is undertaken, highway engineers should predict the remaining life in the existing pavement to determine the magnitude of the rehabilitation effort. Remaining life plays a pivotal role in forecasting the future rehabilitation needs of the pavement system. For the purpose of future planning and budgeting, it is important to estimate the remaining life of each pavement section in the system. This is not only useful for timing a major rehabilitation, it also assists managers in forecasting the long-term needs of the network. A number of different prediction models exist that use material properties developed from various Non-Destructive Testing (NDT) methods to predict the remaining life of a Hot Mix Asphalt (HAM) pavement.

In this study, adaptive neuro-fuzzy inference systems (ANFIS), using Sugeno ANFIS for predicting remaining life of flexible pavements. Input variables used the number of layers, actual traffic applications, modulus of elasticity for (two asphalt, base and subgrade) layer and thickness for (two asphalt and base) layer and the remaining life of the pavement as output. As a result the predicted results were compared with the results obtained from the calculation and found that they are close to each other.

Keywords: Flexible Pavements, Nondestructive tests (NDT), Falling Weight Deflectometer(FWD), ANFIS, Remaining life of a pavement.

2016, 161 pages

TEŞEKKÜR

Çalışmalarımın her aşamasında beni yönlendirerek yardımlarını esirgemeyen, bilgi ve önerileriyle her zaman destek olan ve akademik olarak gelişmemde ve ilerlememde çok büyük bir paya sahip olan çok değerli Danışman Hocam Prof. Dr. Mehmet SALTAN'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

ANFIS programında yardımcı olan değerli Hocalarım Prof. Dr. Serdal TERZİ ve Prof. Dr. Mesut TIĞDEMİR'e teşekkür ederim.

Çalışmalarım esnasında manevi desteklerini esirgemeyen tüm arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Tezim boyunca manevi desteklerini esirgemeyen aileme (özellikle anneme ve babama), bu uzun ve zorlu süreçte tüm olumsuzluklarda sürekli yanımda olan ve beni yalnız bırakmayan sevgili eşim'e sonsuz sevgi ve saygılarımı sunarım.

Fakhir Abdulsada YASEEN
ISPARTA, 2016

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1.1. Esnek üstyapıların bozulması	1
Şekil 1.2. Geri-hesaplama yöntemleri tüm kategorileri akış diyagramı.....	5
Şekil 1.3. Klasik geri-hesaplama akış diyagramı.....	6
Şekil 3.1. Esnek ve rijit üstyapılarda trafik yüklerinin üst kaplama tabakasından zemine intikali.....	21
Şekil 3.2. Kaplama tipileri ve tabakaları.....	22
Şekil 3.3. Tipik esnek üstyapı enkesiti	23
Şekil 3.4. Esnek üstyapı tipik tabakaları	24
Şekil 3.5. Tipik kaplama kesiti	28
Şekil 3.6. Eksenel simetrik yükleme altında oluşan gerilmeler	29
Şekil 3.7. Asfaltta kritik çekme ve basınç gerilmeleri.....	29
Şekil 3.8. Üstyapıların kalan ömrü hesaplamanın adımları akış diyagramı	41
Şekil 4.1. Benkelman kiriş aleti	46
Şekil 4.2. Esnek üstyapılar için benkelman kirişi uygulaması.....	47
Şekil 4.3. Benkelman kirişi ve temel elemanları.....	48
Şekil 4.4. Esnek üstyapılar için la croix deflectograph uygulaması.....	49
Şekil 4.5. Zemine statik bir önyüklem ve sinüs biçimli dalga oluşumu....	51
Şekil 4.6. Dynaflect aleti	52
Şekil 4.7. Road rider aleti.....	53
Şekil 4.8. Rolling dinamik deflectometer	55
Şekil 4.9. Rolling dinamik deflectometer (RDD) bir şematik diyagramıdır	55
Şekil 4.10. RDD'te Tipik bir yuvarlanma sensör.....	56
Şekil 4.11. Düşen ağırlıklı deflektometre aleti	58
Şekil 4.12. Yüksek ağırlıklı deflektometresi HWD,Hafif ağırlık deflektometresi cihazı LWD.....	59
Şekil 4.13. Hareketli ağırlık deflektometresi	60
Şekil 4.14. Arazi aracına monte edilmiş GPR sistemi	62
Şekil 4.15. Zemin penetrasyon radarı	63
Şekil 4.16. Temel prensip GPR tekniği,.....	64
Şekil 4.17. Antenlere ait genlik zaman grafikleri	65
Şekil 4.18. Üstyapıda nükleer yoğunluk ölçümü	66
Şekil 4.19. Nükleer yoğunluk ölçümü.....	67
Şekil 4.20. PQI deney aleti.....	68
Şekil 4.21. Şematik nükleer olmayan cihazı	69
Şekil 4.22. Karayolunun bozulmuş.....	70
Şekil 4.23. Lazerlerin aracı ve sensörleri.....	71
Şekil 4.24. Manyetik görüntüleme deney aleti	72
Şekil 4.25. Manyetik görüntüleme deney aleti.....	72
Şekil 4.26. Gerilme dalgaları.....	73
Şekil 4.27. IE testi için tasarım örneği.....	74
Şekil 4.28. Darbe-yankı cihazı	75
Şekil 4.29. Ultrases geçiş hızı cihazı.....	75
Şekil 4.30. Ultrases geçiş hızı deney düzeneği	76
Şekil 4.31. SASW deneyi için şematik gösterim	77

Şekil 4.32. Yüzey dalgaların spektral analizi aleti.....	77
Şekil 4.33. Akıllı kompaktör şematik.....	78
Şekil 4.34. Çiştirli sürtünmesi ölçüm cihazları.....	79
Şekil 5.1. Düşen ağırlık deflektometre ve jeofonlar sistemi	88
Şekil 5.2. Düşen Ağırlık Deflektometre sistemi.....	89
Şekil 5.3. Dynatest düşen ağırlıklı deflektometre	94
Şekil 5.4. KUAB Düşen Ağırlıklı Deflektometre.....	95
Şekil 5.5. Phoenix Düşen Ağırlıklı Deflektometre	96
Şekil 5.6. JILS Düşen ağırlıklı deflektometre	98
Şekil 5.7. IITKGP düşen ağırlıklı deflektometre	99
Şekil 5.8. Carl Bro Group düşen ağırlıklı deflektometre.....	100
Şekil 5.9. Geotran düşen ağırlıklı deflektometre	101
Şekil 5.10. Dinamik yükün bir fonksiyonu olarak üstyapı defleksiyonu	105
Şekil 5.11. Yükleme frekansının defleksiyonla değişimi.....	106
Şekil 5.12. Esnek üstyapıda (40 kN yük) olarak defleksiyona timsah sırtı çatlak etkisi.	106
Şekil 5.13. Üstyapı defleksiyonla sezonun etkisi.....	108
Şekil 5.14. Mevsimlik üstyapı defleksiyonları üzerinde zemin etkisi	109
Şekil 5.15. Esnek üstyapı defleksiyona sıcaklığın etkisi.....	110
Şekil 5.16. Aynı derinlikte farklı şekil eğrisi.....	113
Şekil 6.1. ANFIS bulanık mantık ve sinir ağları sistemi	116
Şekil 6.2. Sugeno bulanık modeli için bulanık çıkarım sistemi	118
Şekil 6.3. Tipik bir ANFIS mimarisi	119
Şekil 6.4. Plot Region	121
Şekil 6.5. Veri yükleme alanı ve FIS Yapısını üretmesi alanı	123
Şekil 6.6. FIS Eğitimi alanı ve FIS'in Doğrulanması alanı	124
Şekil 7.1. Adaptif ağ yapısına dayalı bulanık çıkarım sistemi editörü.....	130
Şekil 7.2. Çalışma da Eğitim ve test verileri	131
Şekil 7.3. Model parametreleri	133
Şekil 7.4. Test sonrası test verilerinin eşleşmesi.....	134
Şekil 7.5. Bulanık çıkarım sistem editörü.....	135
Şekil 7.6. Üyelik fonksiyon editörü	136
Şekil 7.7. Tabaka sayısı için üyelik fonksiyonu	137
Şekil 7.8. Yük tekrar sayısı için üyelik fonksiyonu.....	137
Şekil 7.9. BSK1 tabakası elastisite modülü için üyelik fonksiyonu.....	138
Şekil 7.10. BSK2 tabakası elastisite modülü için üyelik fonksiyonu.....	138
Şekil 7.11. Temel tabakası elastisite modülü için üyelik fonksiyonu	138
Şekil 7.12. Taban zemini elastisite modülü için üyelik fonksiyonu	139
Şekil 7.13. BSK1 tabakası kalınlığı için üyelik fonksiyonu.....	139
Şekil 7.14. BSK2 tabakası kalınlığı için üyelik fonksiyonu.....	139
Şekil 7.15. Temel tabakası kalınlığı için üyelik fonksiyonu	140
Şekil 7.16. Kalan ömür için üyelik fonksiyonu	140
Şekil 7.17. Geliştirilen modelin genel yapısı.....	141
Şekil 7.18. Kural editörü	141
Şekil 7.19. Kural izleyici.....	142
Şekil 7.20. Model – hesaplama sonuçları eşleşme grafiği (Eğitim seti).....	143
Şekil 7.21. Model – Deney sonuçları ilişkisi (Eğitim seti).....	144
Şekil 7.22. Model – hesaplama sonuçları eşleşme grafiği (test seti).....	145
Şekil 7.23. Model – Deney sonuçları ilişkisi (test seti).....	145

Şekil A.1.	KENLAYER programı ana penceresi	155
Şekil A.2.	KENLAYER programı giriş bilgileri (Genel bilgileri)	155
Şekil A.3.	KENLAYER programı giriş bilgileri (Tabaka bilgileri)	156
Şekil A.4.	KENLAYER programı giriş bilgileri (Elastisite modülü bilgileri)	156
Şekil A.5.	KENLAYER programı giriş bilgileri (Yük bilgileri)	157
Şekil A.6.	KENLAYER programı giriş bilgileri, Hasar bilgileri (Yorulmaya göre)	157
Şekil A.7.	KENLAYER programı giriş bilgileri, Hasar bilgileri (Deformasyona göre)	158
Şekil A.8.	KENLAYER programı giriş bilgileri, Hasar bilgileri (yük uygulamaları)	158
Şekil A.9.	KENLAYER programı sonucu (Casa G yeri)	159



ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 1.1. Lineer analiz geri hesaplama programları.....	3
Çizelge 1.2. Lineer olmayan analiz geri hesaplama programları	4
Çizelge 3.1. Esnek üstyapı kalan ömrü, yorulma ve deformasyon Modeli parametreleri	40
Çizelge 4.1. Kaplama durumu değerlendirmesi için tahribatsız test yöntemleri	81
Çizelge 4.2. Ölçüm özellikleri ve kullanım alanlarına göre tahribatsız test yöntemleri.....	82
Çizelge 4.3. Tahribatsız defleksiyon temelli olan aletlerin özellikleri	83
Çizelge 5.1. Sırasıyla FWD'ta sensör aralığı tipi.....	102
Çizelge 5.2. FWD ve HWD için detaylı özellikler.....	103
Çizelge 7.1. KENLAYER de kullanılan parametreleri.....	129
Çizelge 7.2. Eğitim seti için çıktı (tahmin ve hesaplama) değerleri	143
Çizelge 7.3. Test seti için çıktı (tahmin ve hesaplama) değerleri.....	144

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials (Amerikan Ulusal Karayolu ve Ulaştırma Teşkilatı)
ANFIS	Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (Adaptif Sinir Ağına Dayalı Bulanık Çıkarım Sistemi)
ASTM	American Society for Testing and Materials
BSK	Bitümlü sıcak karışım
D	Zarar oranı
DAD	Düşen Ağırlık Deflektometresi
DM	Data Mining
DMI	Distance Measuring Instrument (mesafe ölçüm cihazı)
FPS	Flexible Pavement Systems
FWD	Falling Weight Deflectometer
GA	Genetik Algoritma
GPR	Ground-penetrating radar(Zemin penetrasyon radarı)
GPS	Geographic Positioning System (coğrafik konumlandırma sistemi)
HWD	Yüksek Ağırlık Deflektometresi
IC	Intelligent Compaction(Akıllı kompaktör)
IE	Impact- Echo
KÖ	Kalan Ömrü
LMEM	Linear Mixed Effects Model
LTPP	Long-Term Pavement Performance
LVDT	Linear Variable Displacement Transducer (lineer varyasyonlu yerdeğiştirme transformatörler)
LWD	Hafif Ağırlık Deflektometresi (Light Weight Deflectometer)
NDT	Non-Destructive Testing (tahribatsız test)
NYÖ	Nükleer Elektromanyetik
PCI	Pavement Condition Index (Üstyapı Durum İndeksi)
PCR	Pavement Condition Rating
PE	Pulse Echo
PQI	Nükleer olmayan elektromanyetik
RDD	Rolling Dinamik Deflektometre
RWD	Hareketli ağırlık deflektometresi (Rolling Wheel Deflectometer)
SAS	Statistical Analysis Software
SASW	Spectral Analysis of Surface Waves(Yüzey dalgaların spektral analizi)
UGH	Ultrases Geçiş Hızı
YSA	Yapay Sinir Ağları
YZ	Yapay Zekâ

1. GİRİŞ

1.1. Genel Bakış

Karayollarının ulaştırma görevi göz önüne alındığında bir insan vücudunun kan damarları ile benzer işlevlere sahiptir. Kişinin hayatını devam ettirmesi için gerekli olan kan dolaşımı arterler vasıtasıyla sağlanır ve gerekli kan organlara ulaştırılır. Aynı şekilde, ürün ve insanlar da bir ülkenin sürdürülebilirliğine yardımcı olan karayolları vasıtasıyla bir noktadan diğerine taşınırlar. Günümüzde, bir ülkenin gelişmişlik düzeyi doğrudan ulaşım sistemlerinin kapsam ve fonksiyonelliğı ile ilişkili olduğı düşünülmektedir. Yollarda servis verebilirlik ve emniyet, ülkelerin ulaştırma firmaları ve\veya kurumları tarafından dikkate alınması gereken önemli konulardır. Yapım yöntemlerinde ve kaplama tabakalarında kullanılan malzemeden bağımsız olarak, her karayolu zaman içinde kaplama yapısının bozulmasına neden olan trafik yüküne ve çevresel etkilere maruz kalmaktadır (Şekil 1.1). Yolların emniyetli ve güvenli bir şekilde servis verebilmesi, iyi bir bakım ve rehabilitasyon çalışmasıyla mümkün olabilir. Büyük yatırımlar göz önüne alındığında, her biri bakım ve\veya rehabilitasyon gerektiren kaplamalar için doğru kararlar alınmalıdır (Öcal, 2014).



Şekil 1.1. Esnek üstyapıların bozulması (Öcal, 2014)

Bunun için mevcut bir esnek üstyapının fiziksel durumu hakkında bilgi edinmek ve uygun bakım programını seçmek için mekanik özelliklerin belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Üstyapıların durumlarını belirlemek için, başlangıçta karot numuneler alma, çukur açma ve benzeri tahribatlı testler kullanılırken, son yıllarda çok hassas tahribatsız test aletleri geliştirilmiştir. Örnek olarak defleksiyon temelli olan metotlar, elektromanyetik yöntemler ve gerilme dalga yöntemleridir. Tahribatlı yöntemler yerine tahribatsız yöntemler ile üstyapı kalınlık tahmini, elastisite modülü belirlenmesi, yoğunluk ve nem ölçümleri yapılmaktadır. Bu parametrelerin belirlenmesi için farklı cihazlara ihtiyaç duyulmaktadır (Saltan, 1999).

Esnek yol üstyapılarının performans değerlendirmesi, genel olarak iki amaç için yapılmaktadır. Bunlardan birincisi, mevcut üstyapının fiziki durumu hakkında bilgi vermektir. Böylelikle, uygun bakım ve onarım programı seçilir. İkinci amaç, inşaatı yeni tamamlanmış bir üstyapının kontrolünü gerçekleştirmektir (Ağar vd., 2005).

İlk kez kullanılan tahribatsız test aleti sadece yük uygulanan noktada oluşan maksimum defleksiyon değerini ölçen benkelman kirişi'dir. Uzun yıllar kullanılmış bir alettir. Ancak tek noktadan ölçüm yapması nedeniyle üstyapı durumunu tam olarak yansıtamadığı için çok noktada defleksiyon değeri ölçebilen bir alet geliştirme gereği duyulmuştur. Yük altındaki defleksiyon değerlerinin büyüklüğü daha çok kaplama tabakasının durumunu ortaya çıkarırken daha alt tabakaların yapısal durumu, yükten daha uzak noktalarda ölçülen defleksiyon değerlerinden anlaşılmaktadır. Bu nedenle, daha sonra California traveling deflectometer, deflectograph, road rater, dynaflect ve falling weight deflectometer (FWD) isimli farklı özellikler taşıyan ancak çok noktada ölçüm yapabilen aletler geliştirilmiştir (Saltan, 1999).

Genel olarak tahribatsız deney metotları içerisinde en çok tercih edilen, düşen ağırlık deflektometre DAD (FWD) yöntemidir. Bu yöntem ile yol üzerindeki çok sayıda yerde, uygulanan yük sebebi ile meydana gelen zamana bağlı defleksiyon değerleri kaydedilir. Uygulamada, FWD deneyi ile elde edilen defleksiyon

değerleri ve geri-hesaplama programları kullanılarak, üstyapı tabakalarına ait mekanik özellikler hesaplanır. Fakat bu programlar, parametre tanımlama algoritmaları kullanmakta ve bu da zaman kaybına neden olmaktadır (Ağar vd., 2005). Çizelge 1.1 ve 1.2’de sırasıyla lineer ve lineer olmayan analiz geri hesaplama programları görülmektedir.

Çizelge 1.1 Lineer analiz geri hesaplama programları

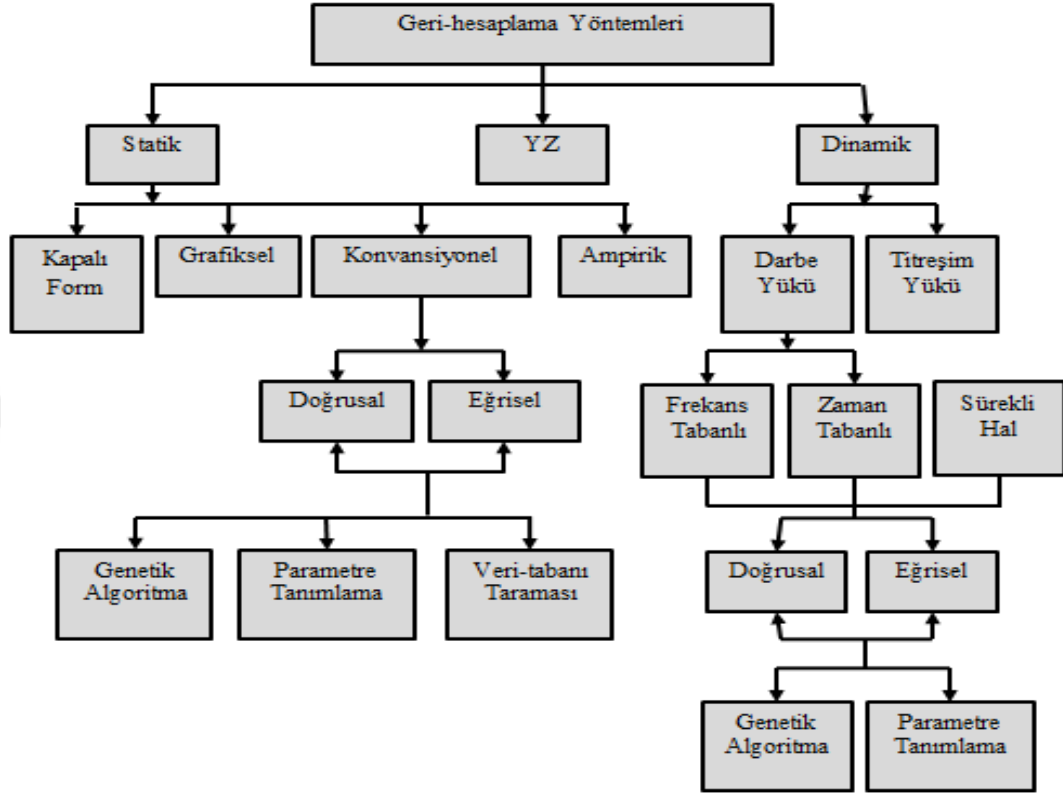
Programın Adı	Geliştirici	Hesaplama Subroutine	Rijit Analizi	Ara yüzü tabaka Analizi	Maksimum tabakalar sayısı	Yakınsama Rutin
BAKFAA	FAA	LEAF	Evet	Değişken	10	Ortalama hata kareler
BISDEF	Mühendisleri ABD Kolordusu - WES	BISAR	Evet	Değişken	3 bilinmeyen için en uygun	Mutlak hata kareleri toplamı
CHEVDEF	Mühendisleri ABD Kolordusu - WES	CHEVRON	Evet	Sabit (pürüzlü)	3 bilinmeyen için en uygun	Mutlak hata kareleri toplamı
ELSDEF	Texas A&M, Mühendisleri ABD Kolordusu	ELSYM5	Evet	Sabit (Pürüzlü)	3 bilinmeyen için en uygun	Mutlak hata kareleri toplamı
MODULUS	Texas Ulaştırma Enstitüsü	WESLEA	Evet Değişken	Sabit	4 bilinmeyen artı sert tabakaya	göreceli kare hata toplamı
WESDEF	Mühendisleri ABD Kolordusu - WES	WESLEA	Evet	Değişken	En fazla 5 tabakalar	Mutlak hata kareleri toplamı
MICHBAK	Michigan Eyaleti	CHEVRON	Evet	Sabit	4 bilinmeyen artı sert tabakaya	göreceli kare hata toplamı

Çizelge 1.2 Lineer olmayan analiz geri hesaplama programları

Programın Adı	Geliştirici	Hesaplama Subroutine	Rijit Analizi	Ara yüzü tabaka Analizi	Maksimum tabakalar sayısı	Yakınsama Rutin
BOUSDEF	Zhou ve ark. Al Oregon Eyalet Üniversitesi	Odemark-Boussinesq	Evet	Sabit (Pürüzlü)	5, En uygun 3 bilinmeyen	Ortalama hata kareler
ELMOD ELCON	P. Ullidtz, Dynatest	Odemark-Boussinesq	Evet Değişken	Sabit (Pürüzlü)	4, rijit tabaka hariç,	5 sensörler de göreceli hata
EMOD	PCS/LAW	CHEVRON	Yok	Sabit (pürüzlü)	3	Göreceli kare hata toplamı
EVERCALC	J. Mahoney, vd.	CHEVRON	Evet	Sabit (Pürüzlü)	3, rijit tabaka hariç,	Mutlak hata kareleri toplamı
FREDDI	W. Uddin	BASINPT	Evet Değişken	Sabit (Pürüzlü)	Bilinmez	Bilinmez
ISSEM4	R. Stubstad	ELSYM5	Yok	Sabit (Pürüzlü)	4	Göreceli defleksiyon hatası
MOD-COMP3	L. Irwin, Szebenyi	CHEVRON	Evet	Sabit (Pürüzlü)	2-5 tabaka En fazla 5 bilinmeyen tabaka.	Sensörler de göreceli defleksiyon hatası
PADAL	S.F. Brown	Bilinmez	Bilinmez	Sabit	Bilinmez	Göreceli kare hata toplamı
RoSy DESIGN	Carl Bro Group	Odemark-Boussinesq	Yok	Sabit (Pürüzlü)	En fazla 4 tabakalar	6 sensörleri de nispi hata

Geri-hesaplama yöntemlerini temel olarak üç kategori altında ele almak mümkündür: (a) statik, (b) dinamik, (c) yapay zekâ (YZ). İsimlerinden de anlaşılacağı gibi, statik ve dinamik yöntemlerde kullanılan yapısal analiz teknikleri ve dolayısı ile ihtiyaç duyulan veri özellikleri farklıdır. Diğer yandan, YZ yöntemlerinde ise, daha önceden statik ya da dinamik analiz yapılarak

oluşturulan bir veritabanı kullanılarak eğitim yapıldığı için bunlar yükleme türünden bağımsızdır. Şekil 1.2’de geri-hesaplama yöntemlerinin tüm kategorileri detaylı bir şekilde verilmektedir (Göktepe vd., 2007).

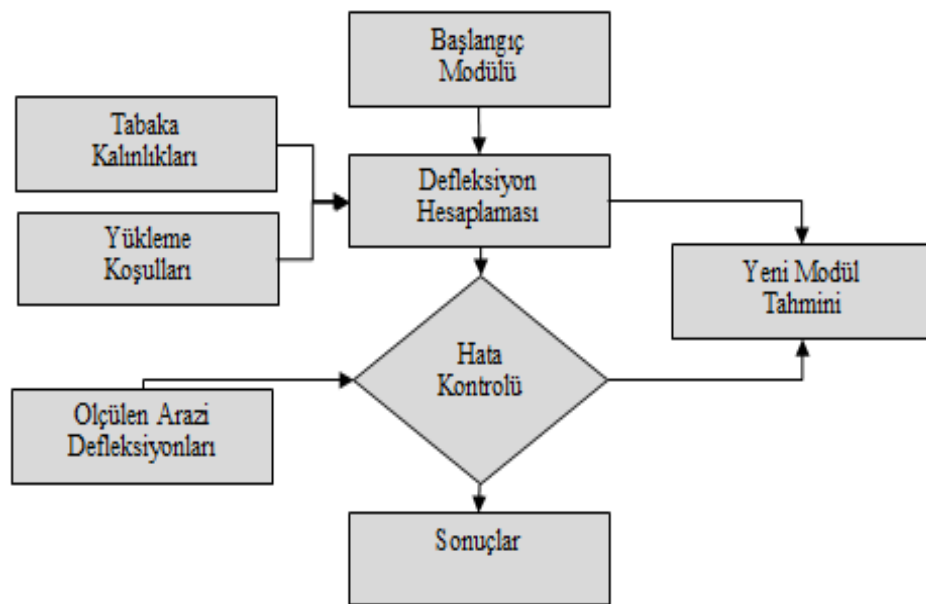


Şekil 1.2. Geri-hesaplama yöntemleri tüm kategorileri detaylı akış diyagramı (Göktepe vd., 2007)

Statik yöntemlerde günümüzde kullanılan teknikler, sonlu elemanlar ya da tabakalı elastik teori esasına dayanmaktadır ve üstyapı modellemedeki gerçekçilikleri düşüktür. Dinamik yöntemler ise, analizlerde kullanılan yük türlerine göre farklılık göstermekle birlikte, trafik etkilerini benzetmede çok daha başarılıdır. Ayrıca statik yöntemler, doğal zemin tabakasının çok derinde olmaması (<15-20m) durumunda dinamik metotlara nazaran hatalı sonuçlar vermektedir. Ayrıca, malzeme davranışının doğrusal olmadığı modellerin hassasiyet derecesi yüksek olmakla birlikte, bu durum, dinamik analizlerde olduğu gibi önemli işlemsel yüklere neden olmaktadır. Bununla birlikte, son yıllarda geliştirilen ve geri hesaplama problemlerine uygulanan spektral eleman yöntemi, hem hassasiyet hem de hız açısından ciddi avantajlara sahiptir (Göktepe vd., 2007).

YZ tabanlı yöntemler ise, son yıllarda üstyapı geri-hesaplama problemlerinde kullanılmaya başlanmıştır. Gerek Yapay Sinir Ağları (YSA), gerek bulanık mantık, gerekse Genetik Algoritma (GA) yöntemleri, çeşitli araştırmacıların çalışmalarına konu olmuştur. Böylece, özellikle gerçek-zamanlı geri-hesaplama yapılması ve hassas sonuçlar elde edilmesi anlamında önemli başarılar yakalanmıştır (Göktepe vd., 2007).

Geri hesaplama işleminin temeli; belli bir üstyapı kesiminde ölçülmüş bir grup defleksiyon değeri ile yine aynı üstyapı kesimi için hesaplanmış olan defleksiyon değerlerini karşılaştırmak ve bu iki defleksiyon grubu arasındaki fark belli bir tolerans değerinin altına düşene dek üstyapı elastisite modüllerinde değişiklikler yapmaktır. Çok sayıda iterasyon işleminden sonra, ölçülmüş ve hesaplanmış defleksiyon değerlerinin oluşturduğu defleksiyon eğrilerinin üst üste çakıştığı andaki üstyapı tabaka elastisite modülü değerleri geri hesaplanmış olur. Eğer yaklaşımın hızlı olması istenirse, her tabaka için modüllerin alabileceği maksimum ve minimum değerler belirlenebilir. Başlangıç elastisite modül değerleri için, prediktif denklemler kullanmak da mümkündür. Ölçülen ve hesaplanan defleksiyonlar arasındaki hata miktarı, izin verilen sınırlar içinde kalana dek işlem tekrarlanır. Bu işleme ait akış diyagramı, Şekil 1.3'te verilmektedir (Saltan, 1999).



Şekil 1.3. Klasik geri-hesaplama akış diyagramı

Geçmiş yıllarda yapılan çalışmalarda, FWD verilerini kullanan geri-hesaplama modelleri için geleneksel optimizasyon algoritmaları ve yapısal analiz yöntemleri tercih edilmekte iken, son yıllarda geliştirilen modellerde, yapay sinir ağları, bulanık mantık ve genetik algoritma gibi yapay zeka teknikleri kullanılmaya başlanmıştır. Bu çalışmada, karayolu esnek üstyapılarının yapısal durumlarını belirlemek (esnek üstyapı kalan ömrü) amacıyla yeni bir yapay zeka yöntemi olan Adaptif Sinir Ağına Dayalı Bulanık Çıkarım Sistemi (ANFIS) kullanılmıştır. Bu modelde tahribatsız ve tahribatlı test aletleriyle önceden elde edilen verileri kullanılmaktadır.

Adaptif sinir ağına dayalı bulanık çıkarım sistemi (ANFIS), sugeno tipindeki bir modele dayalı olarak işlem yapan adaptif ağ yapılı bir bulanık sonuç çıkarım yöntemidir. Yöntemin esası, belirli bir giriş-çıkış veri kümesinden yararlanılarak uygun bulanık kural kümesinin ortaya konulması ve adaptif özellikli bir ağ yapısı vasıtasıyla sistem parametrelerinin sistematik olarak ayarlanmasına dayanır (Kandil, 2013).

1.2. Çalışmanın Amacı ve İzlenen Yol

Dünyada yeni yolların inşa edilmesi, var olanların ise bakım ve onarım çalışmaları için devlet bütçelerinden büyük miktarda kaynaklar ayrılmaktadır. Yapılan yatırımların boyutları göz önünde bulundurulduğunda, rehabilitasyon işlemlerinde yapılacak optimizasyonlar yolların sürdürülebilirliğine ve ülkelerin ekonomisine büyük katkılar sağlayabilmektedir. Yol üstyapılarının sürdürülebilirliğini sağlamak amacıyla uygun bakım stratejilerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu stratejileri yapmak için, üstyapı yapısal analizleri yapabilmek gerekmektedir. Yapısal analizlerin yapılabilmesi için üstyapı hakkında bazı bilgilerin elde edilmesi gerekmektedir. Bu bağlamda, üstyapı durumunu belirleme teknikleri arasında en hızlı, en ekonomik ve güvenilir yöntemler seçmek önemlidir. Üstyapıların değerlendirilmesinde tahribatsız test yöntemleri önemli rol oynamaktadır (Öcal, 2014).

Tez çalışmasında, karayolu esnek üstyapılarının yapısal durumlarını belirlemek (esnek üstyapı kalan ömrü) amacıyla yapay zeka yöntemlerinden birisi olan Adaptif Sinir Ağına Dayalı Bulanık Çıkarım Sistemi (ANFIS) kullanılmıştır. Bu modelde tahribatsız ve tahribatlı test aletleriyle önceden elde edilen verileri, uygulanan yük miktarı, tabaka sayısı, tabaka elastisite modülü, tabaka kalınlığı gibi veriler, ANFIS metoduyla değerlendirilmekte ve üstyapının yapısal durumu hakkında (esnek üstyapı kalan ömrü) bir sonuca varılması amaçlanmaktadır.

Bu çalışmanın Birinci Bölüm'ü giriş, çalışmanın amacı ve izlenen yol içermektedir. İkinci Bölüm'de çalışmanın konusu ile ilgili daha önce yapılan araştırmalara değinilmiştir. Üçüncü Bölüm'de, karayolu hakkında genel bilgiler verilmekte ve esnek üstyapılardan ayrıntılı olarak bahsedilmektedir.

Dördüncü Bölüm'de tahribatsız testler (NDT) hakkında bilgi verilmiş ve çalışma sistemlerine göre 3 kategori olarak sınıflandırılmıştır. Bunlar defleksiyon temelli olan metotlar (Statik yükleme yapan aletler, Sabit-Sarsıcı yükleme yapan aletler, Ani çarpma yükleme yapan aletler), Elektromanyetik yöntemler (Nükleer yoğunluk ölçer, Nükleer olmayan elektromanyetik yoğunluk ölçer,

Zemin penetrasyon radarı (GPR), İnfrared tomografi yöntemi, lazerli profil ölçer, Manyetik görüntüleme teknikleri) ve Gerilme dalga yöntemleridir (Darbeyankı yöntemi (Impact- Echo IE /Pulse Echo PE), Ultrases Geçiş Hızı (UGH), Yüzey dalgaların spektral analizi (SASW).

Beşinci Bölüm’de, Düşen Ağırlık Deflektometresi ve defleksiyonları etkileyen faktörler (yükleme, mevsimsel faktörler, üstyapının mevcut durumu) hakkında genel bilgiler verilmiştir. Altıncı Bölüm’de, Adaptif Sinir Ağına Dayalı Bulanık Çıkarım Sistemi (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System ANFIS) hakkında genel bilgiler verilmiştir. Yedinci Bölüm’de, tahribatsız ve tahribatlı test aletleriyle önceden elde edilmiş veriler ile (tabaka sayısı, yük tekrar sayısı, BSK1 tabakası elastisite modülü, BSK2 tabakası elastisite modülü, temel tabakası elastisite modülü, taban zemini elastisite modülü, BSK1 tabakası kalınlığı, BSK2 tabakası kalınlığı, temel tabakası kalınlığı), tahmini esnek üstyapı kalan ömrü hesaplanmıştır. Aynı veriler yardımıyla kalan ömrü tahmin etmek için ayrıca Adaptif Sinir Ağına Dayalı Bulanık Çıkarım Sistemi (ANFIS) ile bir model geliştirilmiştir. Son olarak, çalışma sonuçlarının bir özeti yapılmıştır. Yapılan çalışmadan elde edilen sonuçlar, kurulan ANFIS modelinin, Esnek üstyapı kalan ömrünün tahmin edilmesinde uygun sonuçlar verdiği görülmüştür.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

2.1. Geri Hesaplama

Yapısal analizleri yapabilmek için üstyapı hakkında bazı bilgilerin elde edilmesi gerekmektedir. Mevcut üstyapı sistemlerinin yapısal olarak değerlendirilmesinde, arazi malzeme özelliklerinin belirlenmesi gerekmektedir. Tahribatsız deney metotları arasında en çok kullanılanlardan birisi ise, Düşen Ağırlık Deflektometresi yöntemidir. Bu yöntem ile kaplama üzerindeki çeşitli noktalarda uygulanan yük sebebi ile meydana gelen zamana bağlı defleksiyon değerleri ölçülmektedir. Elde edilen bu değerler, geri hesaplama programları yardımı ile üstyapıya ait mekanik özelliklerin hesaplanmasında kullanılmaktadır. Böylece, üstyapının mevcut durumunu değerlendirme ve geleceği ile ilgili tahmin yapabilmek mümkün olmaktadır. Geçmiş yıllarda yapılan çalışmalarda, FWD verilerini kullanan geri-hesaplama modelleri için geleneksel optimizasyon algoritmaları ve yapısal analiz yöntemleri tercih edilmekte iken, son yıllarda geliştirilen modellerde, yapay sinir ağları, bulanık mantık ve genetik algoritma gibi yapay zeka teknikleri kullanılmaya başlanmıştır (Göktepe vd., 2007).

2.2. Esnek Üstyapının Kalan Ömrü

Kullanımdaki bir üstyapı kalan ömrünü doğru bir şekilde değerlendirme ihtiyacı, karayolu harcamalarında son zamanlarda yeni bir kaplamanın inşaatından kaplama rehabilitasyonuna kadar uzanan büyük değişimlerin ışığında büyük ölçüde önemi giderek artan bir sorun olmaktadır. Bu nedenle, kaplama yapısının kalan ömrünü doğru bir şekilde tahmin etmek gereklidir. Herhangi bir rehabilitasyon girişiminde bulunulmadan önce, karayolu mühendisleri rehabilitasyonun boyutunu belirlemek için mevcut kaplamanın kalan ömrünü tahmin etmelidirler. Kalan ömür, trafik ve çevresel faktörlere maruz kalan kaplama sisteminin geriye kalan kullanışlı ömrünün bir ölçüsüdür. Kalan ömür yıl bazında ve kalan yük tekerlek sayısı veya tasarım ömür yüzdesi olarak ifade edilebilir (Dennis vd., 2012).

2.3. Adaptif Ağ Yapılı Bulanık Çıkarım Sistemi (ANFIS)

ANFIS, bulanık mantık ve sinir ağları, akıllı sistemlerin geliştirilmesinde birlikte kullanılan tamamlayıcı araçlardır. Yapay sinir ağları, ham verilerle uğraşıldığında iyi sonuçlar veren düşük seviyeli yapılardır. Bulanık mantık ise, uzman görüşü sonucu elde edilen dilsel bilgileri kullanarak daha yüksek seviyeli sonuçlar çıkarmaktadır. Aslında bulanık sistemlerin öğrenme kabiliyeti yoktur ve kendilerini yeni çevreye adapte edemezler. Diğer yandan yapay sinir ağları öğrenme kabiliyetine sahiptir; fakat kullanıcı tarafından anlaşılmazlar. ANFIS yönteminin uygulanabilmesi için elde girdi ve çıktıya dayanan bir veri setine ihtiyaç duyulmaktadır. Seçilen üyelik fonksiyon adedi ve tipine bağlı olarak kurulan model melez öğrenme algoritması kullanılarak eğitilmektedir (Çakıt, 2008).

Bu bölümde çalışmanın konusu (Geri hesaplama, esnek üstyapının kalan ömrü ve Adaptif Ağ Yapılı Bulanık Çıkarım Sistemi) ile ilgili daha önce yapılan araştırmalara değinilmiştir.

Gedafa (2008), esnek kaplamaların kalan ömrünü tahmin etmek için yüzey defleksiyonlarını kullanmıştır. Yüzey defleksiyonlarını bulmak için Hareketli ağırlık deflektometresi (Rolling Wheel Deflectometer RWD) defleksiyon verileri, Temmuz 2006'da Kansas'ın kuzeydoğusunda yer alan eyaletler arası olmayan bir karayolu üzerinde karayolu hızında 8.2 ton eşdeğer dingil yükü altında toplanmıştır. FWD defleksiyon verileri, 1998-2006 yılları arasında KDOT ağı üzerinde bir Dynatest 8000 FWD yardımıyla toplanmıştır. İstatistiksel analiz yazılımında (SAS) bulunan lineer olmayan bir regresyon prosedürü ve Microsoft Excel'de bulunan çözücü bu çalışmada modelleri geliştirmek için kullanılmıştır. Sonuçlar, FWD ve RWD merkezi defleksiyonların ve istatistiksel olarak tekabül eden (etkili yapısal) SN efektif benzer olduğunu göstermiştir. Sonuçlar ayrıca sigmoid ilişkinin RSL ve merkez defleksiyon arasında var olduğunu göstermiştir. Sigmoid RSL modelleri, çok iyi uyuma sahip olup FWD veya RWD yük merkezine dayalı olarak RSL'yi tahmin etmede kullanılabilir.

Balla (2014), kaplamaların ortalama hizmet ömrünü belirlemek ve kalan servis ömrünü tahmin etmek için bu çalışmayı yapmıştır. Kalan servis ömrü, iyileştirme gerekene kadarki öngörülen yıl sayısı olarak tanımlanmaktadır. Kaplama durum puanı (Pavement Condition Rating PCR) şeklindeki kaplama durum verileri, farklı PCR eşiklerine ait Kaplan-Meier için kullanılmıştır. PCR 60, terminal durumu olarak göz önüne alınmış ve kaplama ağının ortalama servis  mr  PCR 60 sağkalım eğrisinin altındaki alan olarak hesaplanmıştır. Sonuçlar, kaplama ağının ortalama servis ömrüne işaret etmekte ve bu çalışmadan her bir kaplama için elde edilen kalan servis ömrü iyileştirmeye karar verme ve b t  e tahsisine yardımcı olmak için kullanılabilecektir.

Dennis vd. (2012), Arkansas şehrinde bulunan esnek kaplamaların yapısal kalan ömrünü tahmin etmek için çeşitli yöntemleri değerlendirmekte, kalibre etmekte ve kaplama sistemlerinin malzeme ve geometrik özelliklerini tahmin etmek için FWD, SASW, DCP ve LWD gibi çeşitli NDT yöntemlerinin yararlılığını karşılaştırmaktadır. İki kaplama performans modeli olan mekanik deneysel kaplama tasarım rehberi ve asfalt enstitüsü tarafından geliştirilen yorgunluk çatlaması ve kalıcı deformasyon, bu çalışma sırasında ölçülen kaplama malzeme özellikleri için laboratuvar değerleriyle birlikte gözlenen kaplama bozulmaları ve trafik uygulamaları kullanılarak değerlendirilmiştir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar, FWD, LWD ve DCP'nin tasarımında kullanılan laboratuvar modül değerlerini iyi bir şekilde tahmin etmek için kullanılabileceğini göstermektedir. Öte yandan, laboratuvar da ölçülen modül değerleri ile SASW testi yoluyla tahmin edilen değerler arasında bir ilişkinin olmadığı görülmüştür. Ayrıca, kalibre edilmemiş (Mechanistic Empirical Pavement Design Guide MEPDG) ve (Asphalt Institute AI) yorulma ve tekerlek izi modelleri, bu çalışma sırasında sahada ölçülenlerden anlamlı olarak farklılık gösteren şekil değiştirmelerini tahmin etmiştir. Bununla birlikte, lokal olarak kalibre edilmiş modeller, istatistiksel olarak belirlenen ölçülmüş değerler ile aslında benzer şekil değiştirmelerini tahmin etmiştir.

Hardwiyono (2012), Boussinesq ve FWD-ELMOD yöntemine eşdeğer bir kalınlıkla profil esnek kaplama sistemlerinde (Flexible Pavement Systems FPS)

her bir tabakanın elastik modülünü belirlemektedir. Testler, Endonezya'nın Soekarno-Hatta Cikampek-Purwakarta-Bandung ve Batı Java karayolları üzerinde gerçekleştirilmiştir. Test sonuçları, Boussinesq testi sonuçlarına göre FWD testinde her bir tabakanın modülü arasında iyi bir korelasyonun olduğunu göstermiştir.

Park ve Kim (2002), kaplama tabakasının durumunu değerlendirmek ve kaplamanın kalan ömrünü tahmin etmek için çoklu-yük seviyesi düşen ağırlık deflectometer (FWD)'yi kullanarak mekanik bir deneysel metot geliştirmişlerdir. Gerilime bağlı bir zemin modelini içeren dinamik sonlu bir elemanlar programı, sentetik defleksiyon veritabanı için geliştirilmiştir. Sonuç, esnek bir kaplamanın temel ve taban zemini malzemelerinin dayanımını belirlemek için defleksiyon bölgesi parametrelerinin ve kritik kaplama tepkilerinin kullanılabileceğine işaret etmektedir. Dahası, tahmin edilen elastik modülü ve asfalt tabakası, E_{AC} ve kritik kaplama tepkileri, ϵ_c ve ϵ_t , asfalt tabakasının mevcut durumunu tahmin etme yeteneğine sahiptir. Bu yüzden, yaş donma bölgelerinde yüksek olan ve hızla artan çatlamaya sahip olan kaplamalar dışında önerilen prosedür kullanılarak yorulma çatlak oluşumu tahmin edilebilir. Bu tahmin algoritmasına iklim faktörleri eklenerek daha iyi bir tahmin yapılabilmiştir. Tekerlek izi oluşumu tahmin etmek için önerilen prosedür gerçek tekerlek izi oluşumunu tahmin etmede başarılı olmuştur.

Yu (2005), çalışmasında kaplamanın kalan ömrü üzerinde söz sahibi olan faktörlerin etkilerini analiz etmek için COX nispi risk modelini geliştirmiş ve her bir kaplama için durum tahmini doğruluğunu geliştirmek üzere lineer karma etkileri tahmin modelini geliştirmiştir. Çalışmada, terminal kaplama durumu olarak kaplama durum puanını (pavement condition rating PCR) 70 alarak, COX nispi risk yöntemi kullanılarak geçmiş PCR verilerine dayanarak geliştirilmiştir. Sonuçlar, COX nispi risk modelinin kaplama ömrü üzerinde hakim olan faktörlerin etkilerini tahmin etmede uygulanabilir olduğunu göstermektedir. Ayrıca, lineer karma etki modelinin (Linear Mixed Effects Model LMEM) sonuçları, özel kaplama durumlarını tahmin etmede belirgin olarak daha iyi derecede doğruluk sunmakta ve lineer karma etki modeli (LMEM) proje

düzeyinde kaplama durumunu tahmin etmek için yararlı olduğunu göstermektedir.

Qın (2010), asfalt beton (AC) kaplaması modeli için düşen ağırlık deflectometer (FWD) defleksiyon verisini kullanarak kaplama tepkisini tahmin etmede bir model sunmaktadır. Everstress 5.0 ve ELMOD 6.0 programları, FWD defleksiyonlarını kullanarak kaplama tabakası modülünün geri hesaplamasını yürütmek üzere seçilmiştir. EVERSTRESS 5.0 programı, geri hesaplanmış tabaka modülünü kullanarak ileri hesaplama yapmak üzere kullanılmıştır. Tahmin edilen kaplama tepkileri (AC tabakasının tabanındaki çekmeye bağlı şekil değiştirmesi), seçilen tahmin modelinin geçerliliğini ve doğruluğunu kontrol etmek için ABD'nin 30 adet karayolunda ölçülen kaplama tepkileri ile karşılaştırılmıştır. Tahmin edilen sonuçlar, ölçülen tepkiler ile iyi bir uyum göstermektedir. FWD ile kamyon yükü durumları arasında da bir karşılaştırma yapılmıştır. Sonuçlar, FWD'nin doğru bir şekilde hareket halindeki tek bir teker yüküne ait büyüklük ve sürenin simüle edilebileceğini göstermektedir.

Saltan vd. (2011), veri madenciliği (Data Mining DM) tabanlı kaplama geri hesaplama araçları, yedi adet eşit uzaklıktaki noktada, düşen ağırlık deflectometer (FWD) defleksiyonlarından sentetik olarak elde edilen asfalt kaplamasının elastik modülünü ve Poisson oranını belirlemek için kullanılmıştır. Önceleri, elastik modülü ve Poisson oranını tahmin ederken veri madenciliği yöntemi, bir geri hesaplama aracı olarak kullanılmamıştır. NDT ile elde edilen deneysel defleksiyon veri grupları, kaplama tabakası kalınlığının geri hesaplanmasında DM yaklaşımlarının yeteneğini göstermek için kullanılmış ve birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Çalışmanın sonuçlarına bakarak, KSTAR yöntemi diğer DM yöntemlerine göre daha iyi sonuçlar vermektedir.

Gopalakrishnan ve Thompson (2004), yapay sinir ağları (YSA) kullanılarak HWD verilerinden lineer olmayan kaplama tabakası modülünün geri hesaplanması için bir araç geliştirilmiştir. Bir hata-geri yayılım algoritmasını kullanan çok katmanlı, ileri beslemeli bir ağ, FWD geri hesaplama işlevini tahmin etmek için geliştirilmiştir. Lineer olmayan kaplama sonlu-eleman

programı olan ILLI-Pave programı kullanılarak üretilen sentetik veritabanı, yapay sinir ağlarını (YSA) geliştirmek için kullanılmıştır. Yapay sinir ağlarını (YSA) kullanarak başarılı AC modüllerini ve taban zemini modüllerini tahmin etmeyi başardık.

Saltan (2002), simülasyonlu defleksiyon eğrisi için bulanık mantık yöntemini içeren simülasyon defleksiyon bölgesi sonlu eleman-tabanlı programlar için bir bulanık mantık yöntemi kullanmıştır. Kaplamanın yapısal taşıma kapasitesinin tayini için, tahribatsız test ekipmanları kullanılmıştır. Bu çalışmada, toplanan veriler analiz edilmiş ve kaplamanın ömrü üzerinde etkili olan her bir tabaka için geri-hesaplamalı elastik modüller için geri hesaplamalı bir prosedür uygulanmıştır. Veri girişi, düşen ağırlık deflektometre (FWD) gibi tahribatsız deney yoluyla elde edilen kaplama yüzeyi defleksiyonu veya kaplama bölgesi ile sınırlandırılmıştır. Sonuçlar, bulanık mantığın esnek kaplama tabakası modüllerinin geri hesaplamasında büyük bir başarı ve doğrulukla hesaplanabildiğini göstermiştir.

Saltan ve Terzi (2009), adaptif ağ tabanlı bulanık mantık çıkarım sistemini (ANFIS), esnek kaplama tabaka kalınlığının ve esnek kaplamanın yüzeyinde ölçülen defleksiyonlardan elde edilen modülün geri hesaplamasında kullanmıştır. İki ANFIS modeli, esnek kaplama tabaka kalınlığı ve modülün tayini için sunulmuştur. Modeller, ANFIS yaklaşımını kullanarak oluşturulmuştur. Sonuçlar, aşınan tabaka kalınlığının ve modellerin esnek kaplama regresyon değerlerine ait modülün son derece kabul edilebilir olduğunu göstermektedir. ANFIS sonuçları ile karşılaştırmak amacıyla, çoklu lineer regresyon modeli (Multiple Linear Regression model MLR) de çalışmada hem tabaka kalınlığını hem de modülleri tahmin etmede kullanılmıştır. Aynı veri seti, iki farklı modelleme tekniği için kullanılmaktadır. Modeller karşılaştırılırsa, MLR modellerinin performansı literatür açısından sınırların altına düşerken, ANFIS modelleri mükemmel performans tahmini vermektedir..

Uzundurukan vd. (2006), bu çalışma kapsamında killi zeminlerin sisme potansiyellerinin tahmin edilmesinde ANFIS yaklaşımının kullanılabilirliği

arastırılmıştır. Bu amaçla, dört farklı doğal killi zemin numunesi üzerinde ödometre serbest sisme deneyleri yapılmış, zeminlerin farklı başlangıç koşulları altındaki sisme yüzdeleri belirlenmiştir. Çalışma sonucunda, kurulan ANFIS modelinin, killi zeminlerin şişme yüzdelerinin tahmin edilmesinde uygun sonuçlar verdiği gösterilmiştir.

Caner ve Akarslan (2009), mermer kesme parametrelerinin enerji tüketimine etkisi, yapay sinir ağları ve ANFIS kullanılarak tahmin edilmiştir. Tahmin metodlarında giriş olarak mermerin sertliği, testere dönüş hızı ve kesme hızı parametreleri kullanılmış ve birim hacim başına harcanan kesme enerjisinin bir ifadesi olan spesifik enerji faktörü çıkış olarak alınmıştır. Sonuç olarak bu çalışmada tahmin edilen verilerin deneysel verilere oldukça yakın olduğu görülmüştür.

Çakıroğlu vd. (2011), değişik formlarda çelik lif katılarak üretilen betonların basınç dayanımlarının tahmini için, tahribatsız deney sonuçları kullanılarak adaptif sinir ağına dayalı bulanık çıkarım sistemi (ANFIS) yöntemiyle bir model geliştirilmiştir. Bu kapsamda, 4 farklı geometrik şekil numune üretilmiştir. Numuneler üzerinde basınç deneyi yapılarak basınç dayanımı değerleri elde edilmiştir. Deneyler sonucunda elde edilen veriler ANFIS yönteminde girdi parametreleri olarak kullanılarak modelleme yapılmıştır. Betonun yaşı, schmidt ve ultrases geçiş hızı modelin girdisi, basınç dayanımı ise modelin çıktısı olarak kullanılmıştır. Sonuç olarak ANFIS, farklı geometrik lif katkılı betonlarda tahribatsız test metodları kullanılarak basınç dayanım tahmininde kullanılabileceği ve bu konuda yapılacak çalışmaların büyük fayda sağlayacağı düşünülmektedir.

Berber ve Boru (2013), sıcaklık tahmini, adaptif ağ yapısına dayalı bulanık çıkarım sistemi (ANFIS) uygulayarak elde edilmiş ve ANFIS'in etkin sonuç verdiği görülmüştür. ANFIS'de kullanılan üyelik fonksiyonun şekli ise parametrelere göre ayarlanmaktadır ve bu çalışmada hava sıcaklığı belirlenmesi için en uygun üyelik fonksiyonu üçgen olarak belirlenmiştir. Bulanık çıkarım

sisteminin oluşturulması için 18260 veri kullanılmıştır. Sonuç olarak; ANFIS'in hava tahmininde iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

Tabatabaei vd. (1997), kaplama durum endeksini (Pavement Condition Index PCI) hesaplamada kullanılan çıkarma değerleri belirlemek için bir ANFIS modelini sunmaktadır. Bu model; girdiler, şekil bozulması üzerindeki şiddet ile yoğunluk ve her bir şekil bozulmasının kaplama kalitesi üzerindeki ağırlık etkisi olmak üzere üç değişkene sahiptir. Her bir şekil bozulması türü için şiddet ve yoğunluk sahada belirlenmektedir. Bu çalışmada, değerlendirilen bazı şekil değişikliği türlerine dayalı olan bir genetik algoritmanın kullanılarak her bir şekil bozulma türüne ait ağırlıkların belirlenmesi önerilmiştir. Model, her bir şiddetteki şekil bozulması türünün çıkarma değerini iyi bir şekilde modelleyebilme gücüne sahiptir.

Kandil (2013), adaptif ağ tabanlı bulanık mantık çıkarım sistemi, karışım derecelemesinin bir fonksiyonu olarak asfalt karışımı stabilitesi ile akışını ve asfalt çimento içeriğini tahmin edebilen modelleri geliştirmek üzere kullanılmıştır. Geliştirilen modeller, Sugeno tipi bulanık çıkarım sistemine, Gauss üyelik fonksiyonlarına ve sabit çıkış fonksiyonlarına dayandırılmıştır. Giriş değişkenleri; 3/4", 1/2", 3/8" nolu, 4 nolu, 8 nolu, 30 nolu, 50 nolu, 100 nolu ve 200 nolu eleklerden geçen yüzdeleri ve bitüm içeriğinin yüzdesini içermektedir. Çıktılar, Marshall stabilitesi ve akışdır. Çıktı sonuçları, ANFIS modellerinin Marshall stabilitesini ve akışını tahmin etmede etkili bir şekilde kullanılabileceğini göstermiştir.

Neshat vd. (2011), beton karışım tasarımının belirlenmesinde ve nihai olarak elde edilen sonuçların karşılaştırmasında ANFIS modelini ve bulanık uzman sistemini tasarlamıştır. ANFIS modeli içine yüklenen veri setleri 552 adet karışım tasarımını içermekte olup ACI karışım tasarımlarına dayandırılmıştır. Ayrıca, bulanık uzman sisteminin saha girdileri; çökme, maksimum agrega büyüklüğü (Dmax), beton basınç dayanımı (CCS) ve incelik modülü (FM) gibi parametreleri içermektedir. Saha çıktıları ise su, çimento, ince agrega (FA) ve kaba agregası (CA) miktarlarıdır. 4 adet ANFIS modeli yapılmıştır. İki sisteme

(FIS ve ANFIS) ait sonuçlar karşılaştırıldığında, bu sistemler tasarlandığında ve test edildiklerinde ANFIS modelinin bulanık uzman sisteminden daha iyi olduğu görülmüştür.



3. KARAYOLU ÜSTYAPISI

3.1. Genel Bakış

İnsan eliyle yapılan en önemli altyapı yatırımlarında olan yollar; insanoğlunun ortak mekânı, toplumların ileriye yolculuğudur. Yolların tarihi ilk insanla başlar; geçmişten geleceğe doğru gelişerek uzar gider. İnsanoğlunun başta diğer insanlara, sonra hayati ihtiyaçlarına, giderek uygarlığa, çağdaşlığa kavuşmasının ilk şartı yol, ülkelerinde can damarıdır. Ülkelerin iktisadi, ticari ve sosyal faaliyetleri, bu can damarına sıkı sıkıya bağlıdır. Bu nedenle yol bir ülkenin kalkınmasına, toplumun sosyo-ekonomik gelişimine temel oluşturan en önemli alt yapıdır. Karayolu ulaşımı, diğer sistemlere göre ekonomik kalkınmaya ve teknolojik gelişmeye daha uygun bir ulaşım sistemidir. Karayolu her türlü taşıt ve yaya ulaşımı için kamunun yararlanmasına açık olan arazi şerhidir. Karayolunu ulaşım amacı ile tek başlarına veya birlikte kullanan motorlu veya motorsuz taşıtlar ile yayaların yol üzerindeki hareketleri ise karayolu trafiğini oluşturur (Gürer, 2012).

Karayolu yapısı, önceden belirlenen geometrik standartlara uygun olarak saptanmış olan bir güzergâh boyunca, doğal zeminin istenilen yükseltilere getirilebilmesi ve üzerinde motorlu taşıtların istenilen hız, güvenlik ve konfor koşullarında hareketlerinin sağlanabilmesi amacıyla inşa edilen yapıların tümü olarak tanımlanabilir. Karayolu; yapısı, görevi, yapım sırası ve özellikleri açısından alt ve üstyapı olarak iki ayrı bölümde incelenebilir (Ayçiçek, 2011).

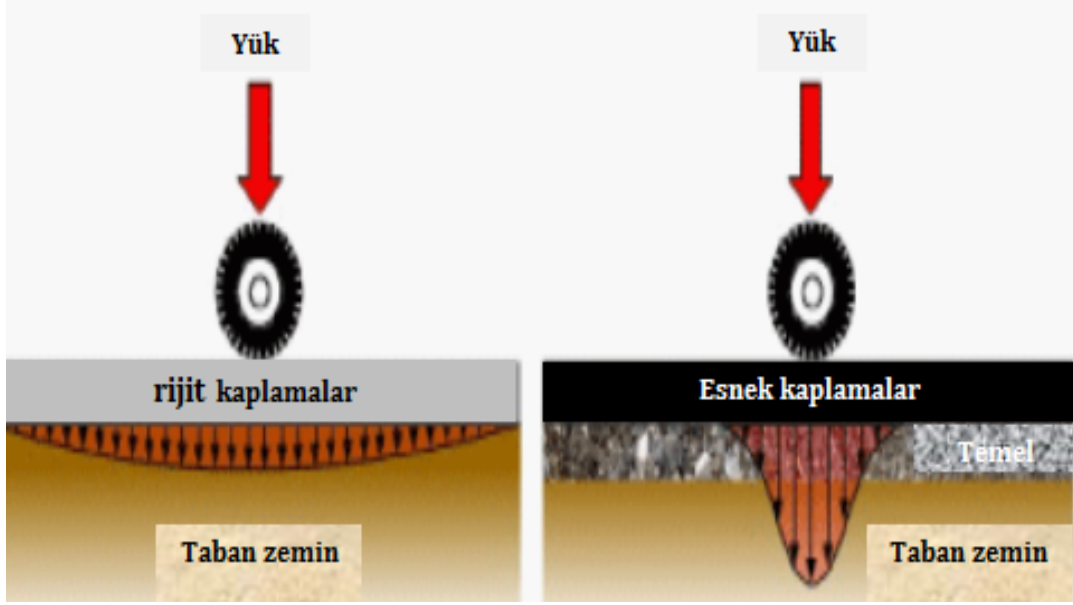
Yapımı tamamlanmış bir karayolunda tesviye yüzeyiyle doğal zemin çizgisi arasındaki bölgeye altyapı adı verilir. Altyapı, yolun dolgu kesimlerinde, dışarıdan getirilen toprakla oluşturulmuş bir toprak gövde, yarma kesimlerindeyse doğal zemindir. Ancak yarma kesimlerinde tesviye yüzeyini oluşturmak amacıyla yapılan dolgu çalışmaları da alt yapıya dâhildir. Ayrıca köprü, viyadük, tünel, menfez ve istinat duvarı gibi yapılar da altyapı elemanı olarak kabul edilir. Altyapının görevleri; istenilen kotta düzgün bir yüzey sağlamak, üstyapı tarafından iletilen yükleri daha geniş bir alana yaymak ve az

da olsa, yolu dış etkenlerden korumaktır. Bu görevleri yerine getirebilmesi için trafik yükleri, don ve su etkilerine karşı dayanıklı olması gerekir. Altyapı oluşturulurken bitkisel toprak, çürük zemin ve sıkıştırmaya elverişli olmayan zeminler kullanılmamalıdır. Bu nedenle altyapıyı oluşturan zemin özelliklerinin çok iyi incelenmesi gerekmektedir (Ayçiçek, 2011).

Karayolu üstyapısı, trafik yüklerini altyapının taşıyabileceği değere indirmek, altyapıyı korumak ve düzgün bir yuvarlanma yüzeyi sağlamak amacıyla altyapı üzerine yerleştirilen alt temel, temel ve kaplamadan oluşan tabakalı yol yapısıdır. Üstyapılar, kaplama tabakasında kullanılan malzemelerin türlerine, özelliklerine ve yapım yöntemlerine göre rijit ve esnek olarak iki ana sınıfa ayrılmaktadırlar. Taban zeminine, trafiğe, çevre koşullarına ve ekonomik koşullara bağlı olarak en uygun üstyapı tipi seçilebilir (Ayçiçek, 2011).

Esnek üstyapılarda asfalt kaplama tabakasına gelen trafik yükü sırasıyla temel ve alttemel tabakalarına yayılarak altyapıya, yani doğal zemine intikal eder. Bu nedenle yükün taşınmasında her tabaka önemlidir. Tabaka kalınlıkları yüke ve zemin özelliklerine bağlı olarak belirlenir. Aynı koşullarda esnek üstyapı toplam kalınlığı rijit üstyapınıninkinden daha fazla olmak zorundadır (Yeğınobalı, 2009).

Rijit üstyapılarda ise beton kaplama tabakası (beton plak) betonun yüksek elastisite modülü ve rijitliği sayesinde yükü büyük ölçüde karşılar. Doğal zemine göreceli olarak çok daha küçük gerilme intikal eder. Zemin özellikleri tabaka kalınlığının belirlenmesinde kritik bir rol oynamaz. Temel tabakası beton plak için düzgün bir taban oluşturulması ve yeterli drenaj sağlanması amacı ile hazırlanır. Esnek ve rijit üstyapılarda trafik yüklerinin üst kaplama tabakasından zemine intikali Şekil 3.1’de görüldüğü gibi birbirinden farklıdır (Yeğınobalı, 2009).



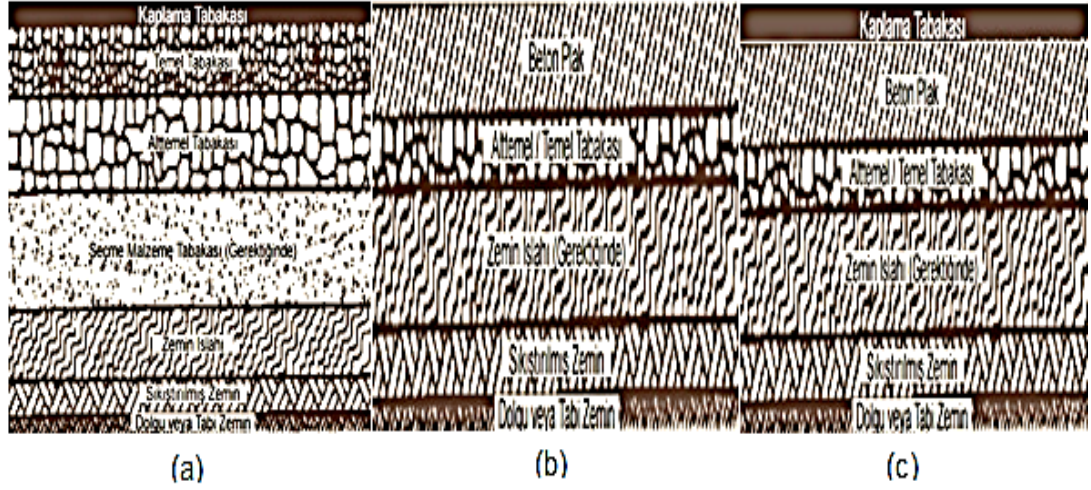
Şekil 3.1. Esnek ve rijit üstyapılarda trafik yüklerinin üst kaplama tabakasından zemine intikali.

3.2. Karayolu Üstyapıları

Karayollarında üstyapı tipi seçimi de önem verilmesi gereken bir konudur. Seçim yapılırken, üstyapı tipleri teknik ve ekonomik bakımdan karşılaştırılmalı ve ülke koşulları da dikkate alınarak, karara varılmalıdır (İlıcılı, 2005).

Yol üstyapıları rijit, esnek ve kompozit olarak üç farklı şekilde yapılabilmektedir. Rijit kaplamalar ağır ve yüksek trafik hacmine sahip yollarda granüler bir alt temel tabakası üzerine yapılan beton plaklardan ibarettir. Esnek kaplamalar çok tabakalı bir yapı olup alt tabakalar dren kabiliyeti yüksek granüler malzemelerle ve üst tabakalar ise yüksek stabilite ve sürüş konforu sağlamak amacıyla asfalt karışımlarla yapılmaktadır. Kompozit kaplamalar zamanla bozulmuş beton kaplamaların üzerine sıcak asfalt karışım takviye tabakası yapılarak veya bazen de bozulmuş esnek kaplamaların üzerine beton kaplama yapılarak elde edilir (Tunç, 2004).

Üstyapı, Şekil 3.2’de görüldüğü gibi kaplamanın tipine göre farklı tabakalardan inşa edilen çok tabakalı bir yapıdır.



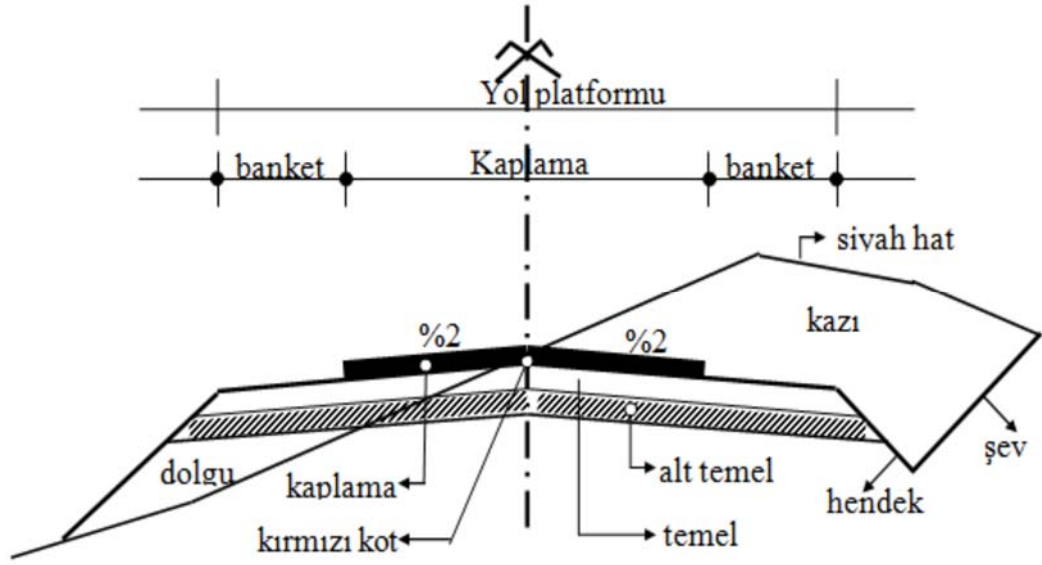
Şekil 3.2. Kaplama tipileri ve tabakaları, a) esnek kaplamalar, b) rijit kaplamalar, c) kompozit kaplamalar

3.3. Karayolu Esnek Üstyapıları

Karayolu esnek üstyapıları, üzerine gelen hareketli ve sabit yükleri, bünyesindeki çeşitli tabakalardan geçirerek, çok iyi yüzeysel temas halinde olduğu taban zemine ileten, alttan üste doğru nitelik ve taşıyıcılık bakımından daha iyi malzemelerden inşa edilen bir üstyapı tipidir. Aynı zamanda bir esnek üstyapı, trafiği güvenli olarak ve ekonomik bir şekilde taşımak zorundadır (Saltan ve Fındık, 2005).

Bir esnek üstyapı, proje ömrü, trafik hacmi, mevcut malzeme durumu ve taban zemini dayanımı gibi kriterler göz önünde bulundurularak tabakalı olarak projelendirilir. Bu tabakalar; kaplama tabakası, temel tabakası, alt temel tabakası ve taban zemini olarak adlandırılır (Saltan ve Fındık, 2005).

Esnek üstyapıların dizaynında platform genişliği, banket genişlikleri, hendek ve şevler oldukça önemli bir yer teşkil etmektedir. Tipik esnek üstyapı enkesiti Şekil 3.3'te gösterilmiştir.



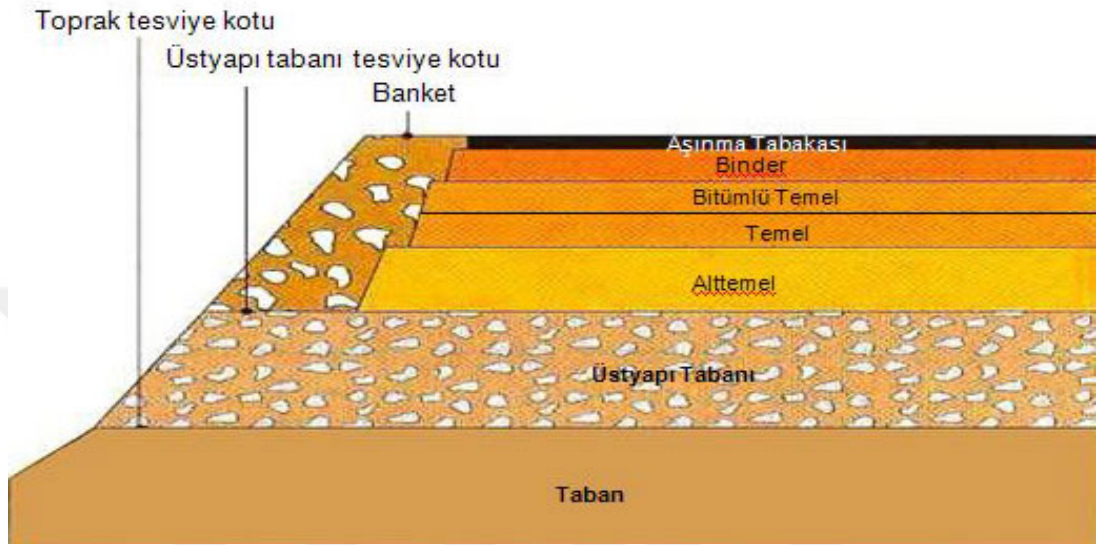
Şekil 3.3. Tipik esnek üstyapı enkesiti (Gürer, 2012)

Esnek üstyapılar, çekme dirençleri fazla olmayan malzemelerden yapılmış alttemel, temel ve kaplama tabakalarından oluşur. Trafik yüklerinin bu tabakalardan geçerek taban zeminine iletilmesi, zemin içindeki klasik yük dağılışı gibidir. Yani tekerlek yükleri altında esnek üstyapı deforme olur ve her tabaka, üzerine gelen yükü bir alttakine biraz daha yayarak iletir. Böylece, taban zeminine ulaşan yük kısmen büyük bir alana yayılmış olur. Esnek üstyapıda oluşan gerilmelerin değeri yolun en üst tabakasından alt tabakalara inildikçe düştüğü için, kullanılacak malzemelerin mekanik özellikleri de bu gerilme dağılışına uygun olarak seçilir. Bitümlü karışımlardan, asfalt betonundan yapılan kaplama tabakası, trafiğin ve iklimin bozucu etkilerine doğrudan doğruya maruz kaldığı için, yüksek elastisite modülü, kaymaya direnç yanında geçirimsizlik özelliğine de sahip bulunmalıdır (Saltan ve Fındık, 2005).

3.3.1. Esnek üstyapıyı oluşturan tabakalar ve görevleri

Asfalt kaplama tabakaları ile oluşturulan üstyapıya “esnek üstyapı” denir. Esnek üstyapı, tesviye yüzeyiyle sıkı bir temas sağlayan ve trafik yüklerini, kaplama, temel ve alttemel tabakaları yoluyla taban zeminine dağıtan bir üstyapı şekli olup stabilizesi, adezyon, tane sürtünmesi ve kohezyon gibi kullanılan agrega ve bitümlü bağlayıcının özelliklerine bağlıdır (Ayçiçek, 2011).

Esnek üstyapı denildiğinde sıkıştırılmış taban zemini üzerine inşa edilen ve dingil yüklerini taban zeminin taşıma gücünü aşmayacak şekilde aktaran aşınma tabakası (asfalt betonu), binder tabakası (asfalt betonu), temel tabakası (asfalt betonu ya da granüler malzeme) ve alttemel tabakalarından (granüler malzeme) oluşan bir üstyapı tipi anlaşılmalıdır (Şekil 3.4) (Ayçiçek, 2011).



Şekil 3.4. Esnek üstyapı tipik tabakaları (Ayçiçek, 2011)

Tabakalı bir sistem olan esnek üstyapının yük taşıma kapasitesi, sistemi oluşturan tabakaların üstyapı direncine katkısı ve yükü yayma özelliklerine dayanır. İyi projelendirilmiş bir üstyapıda tabakalar tarafından yayılan yük, tabana ulaştığında tabanın, büyük deformasyonlara maruz kalmadan taşıyabileceği bir düzeye düşürülmüş olur. Üstyapıdaki tabakaları oluşturan malzemeler değişik özelliklere sahiptir. Alttemel ve temel tabakalarında granüler malzemeler kullanılırken kaplama tabakasında, özellikleri sıcaklığa ve yükleme hızına bağlı olan, viskoelastik davranış gösteren bitümlü karışımlar kullanılmaktadır. Bir üstyapı yapılmadan önce altyapı, üstyapıya istenilen bir destek sağlayacak şekilde şartnamelere uygun olarak hazırlanırlar. Üstyapının performansı taban zemininin fiziksel özellikleri ve durumu ile doğrudan ilgilidir (Ayçiçek, 2011).

3.3.1.1. Taban zemini

Bir esnek üstyapının davranışı taban zemininin taşıma gücü ile doğrudan ilgili olduğundan taban zemininin şartnamelere uygun olarak hazırlanması üstyapı projelendirmesinde çok önemlidir. Taban zeminlerinde yeraltı su seviyesi tesviye yüzeyinin en az 150 cm altında tutulmalı, bunda sağlanması için uygun yer altı drenajı yapılmalıdır. Ayrıca uygun drenaj sistemi ile yüzey suyunun yol gövdesini etkilemesi önlenmelidir. Yol gövdesinin, yapım sırasında ve yolun ömrü boyunca stabil kalabilmesi için, etkili ve kalıcı uygun drenaj sistemleri ile sudan korunması sağlanmalıdır. Yol üstyapıları aşırı don kabarması ve tabanın donma çözülme mevsiminde taşıma gücünün azalması ile zarar görebilir. Don olayının yol üstyapısına olan etkisinin azaltılabilmesi için aşağıdaki faktörlerin incelenmesi gerekir (Ayçiçek, 2011).

- A) taban zeminin dona karşı hassasiyeti.
- B) üstyapının toplam kalınlığı.
- C) donma indeksi.
- D) yeraltı su seviyesinin üstyapı düzeyinden ölçülen derinliği.
- E) güzergâhtaki yarma ve dolgu yükseklikleri.

3.3.1.2. Alttemel tabakası

Alttemel, trafik yüklerinin taban üzerine yayılmasını sağlamak, ince taneli altyapıların temel tabakasına nüfuz etmelerini önlemek, ayrıca su ve don tesirlerine karşı direnim sağlamak, tampon bölge görevi yapmak için tesviye yüzeyi üzerine serilen tabakadır. Alttemel yalnız don bölgesindeki, dona hassas taban zeminleri veya taşıma gücü yeterli olmayan taban zeminleri üzerinde yapılır. Bu durumların söz konusu olmadığı hallerde yapılmayabilir. Alttemel tabakası, taban zemininin taşıma gücünü aşabilecek yüksek gerilmeleri ve tabanda oluşacak don etkisinin üstyapıya yansımaları önleyecek özelliklere sahip olmalıdır (Ayçiçek, 2011).

Alttemel tabakasının üst etkileri taşımaktan başka bir fonksiyonu da; üstyapının drenajına yardım etmek ve aşağı tabakalardan gelecek sızmaları tutmaktır. Daneli alttemel malzemesi dona hassas taban zeminine karşı filtre stabilitesine sahip olmalıdır. Bu nedenle, yeterli miktarda ince ve orta kum içermelidir. Böylece suyun alttan yukarıya doğru yükselmesi halinde ince daneler yüzmez veya trafik etkisi altında, alttemel daneleri arasına girmez (Ayçiçek, 2011).

3.3.1.3. Temel tabakası

Temel tabakası, bağlayıcısız ya da bağlayıcı bir maddeyle işlem görmüş olan belirli granülometrideki malzemeden oluşur. Ana görevi, üstyapının yük taşıma kabiliyetini artırmaktır. Ayrıca, trafik hareketlerinden doğan yüksek kayma gerilmelerine karşı koyabilecek, drenaja yardımcı olabilecek ve don olaylarına karşı da koruma sağlayabilecek özelliklere sahip olmalıdır. Bu bakımdan temel tabakası belirli özellikleri olan, kaliteli malzemeden oluşturulmalıdır. Bu temel tipleri (Ayçiçek, 2011):

(A) Granüler temel tabakası; çakıl, kırılmış çakıl, kırılmış cüruf, kırmataş ve benzeri malzemeden yapılır. İyi derecelendirilmiş gradasyonda olmalıdır. Modifiye proktorda yüzde 98 sağlanmalıdır. Minimum granüler temel kalınlığı 15 cm olmalıdır. (B) Plentmix temel tabakası; kırılmış çakıl, kırılmış cüruf, kırmataş ve ince malzemeden oluşur. Kaba ve ince olmak üzere en az iki dane boyutu vardır. Yüzde 100 modifiye proktoru sağlamalıdır. Plentmiks temel kalınlığı 15 cm olmalıdır. (C) Çimento bağlayıcılı granüler temel tabakası; çakıl, kırılmış cüruf, kırmataş ve ince malzemeden oluşur. Yüzde 98 modifiye proktoru sağlamalıdır. Çimento bağlayıcılı temel kalınlığı 20 cm olmalıdır. (D) Penetrasyon makadam temel tabakası; alt temel üzerine kaba agreganın serilip üzerine AC uygulanması ve ince malzemeyle sıkıştırılmasıdır. (E) Rolled asfalt temel tabakası; asfalt çimentosu, filler, ince ve kaba agreganın karışmasından oluşur. (F) Bitümlü temel; kırılmış ve elenmiş kaba agrega, ince agrega mineral filler ve bitüm ile yapılır. Bitümlü temel kalınlığı ise 8 cm olmalıdır. (G) Bitümlü makadam temel; kırılmış taş ve cürufun ince agrega ve AC ile karıştırılması ile yapılır.

3.3.1.4. Kaplama tabakası

Kaplama, taşıtlara uygun bir yuvarlanma yüzeyi sağlamak, trafiğin aşındırma etkilerine karşı koymak ve yapıya sızan yüzeysel su miktarını ve temel tabakasına iletilen kayma gerilmelerini azaltmak amacıyla temel tabakası üzerine inşa edilen bir tabakadır. Kaplama tabakası üstyapının trafik yüklerine doğrudan maruz kalan en üst tabakadır. Trafik yükleri nedeniyle oluşan basınç ve çekme gerilmelerinin en yüksek düzeyde olması nedeniyle kaplama tabakası, üstyapının diğer tabakalarına göre daha yüksek bir elastikiyete sahip olmalıdır. Kaplama tabakasının, trafiğin aşındırıcı etkisine karşı koymak, düzgün ve emniyetli bir sürüş sağlamak, yolu kalıcı deformasyonlara karşı korumak gibi işlevleri vardır (Ayçiçek, 2011).

Kaplama tabakası genellikle bitüm ve agrega karışımı ile elde edilen malzemeden meydana gelir. Karayolları esnek üstyapılar projelendirme rehberine göre, kaplama tabakası yüzeysel kaplama ya da bitüm betonu kaplama olabilir (Ayçiçek, 2011).

Asfalt tabakaları, aşınma, binder ve bitümlü temel tabakaları olarak üç farklı şekilde yapılabilmektedir (Türkiye Asfalt Mütahitleri Derneği, 2009).

3.3.1.4.1. Aşınma tabakası

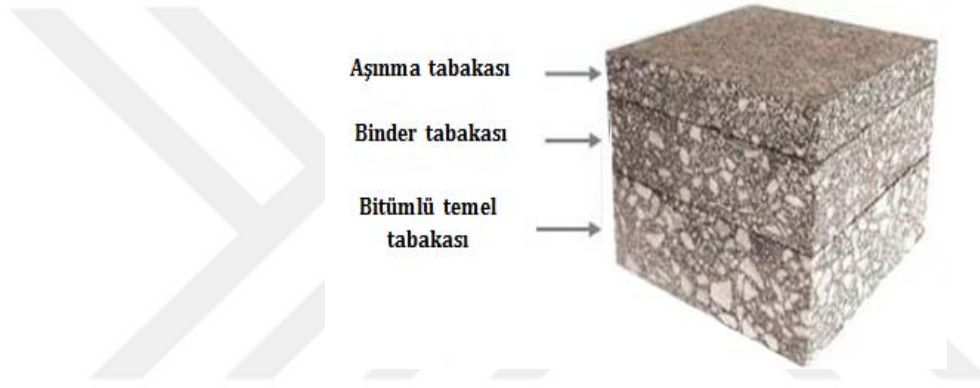
Üstyapının en üst tabakası olan aşınma tabakası, genellikle 5 cm kalınlığında asfalt betonu olarak uygulanmaktadır. Ağır trafikli devlet yollarında ve otoyolların aşınma tabakasında yüksek mukavemetli, kayma direnci yüksek Taş Mastik Asfalt (Stone Mastic Asphalt SMA) gibi bitümlü sıcak karışımlar kullanılmaktadır. Kaplama, aşınma, binder ve bitümlü temel tabakaları tipik kesiti Şekil 3.5'te gösterilmiştir.

3.3.1.4.2. Binder tabakası

Bitümlü temel veya granüler temel üzerine uygulanan binder tabakası, trafiğe bağlı olarak genellikle 6-8 cm kalınlıklarda asfalt betonu ile teşkil edilmektedir.

3.3.1.4.3. Bitümlü temel tabakası

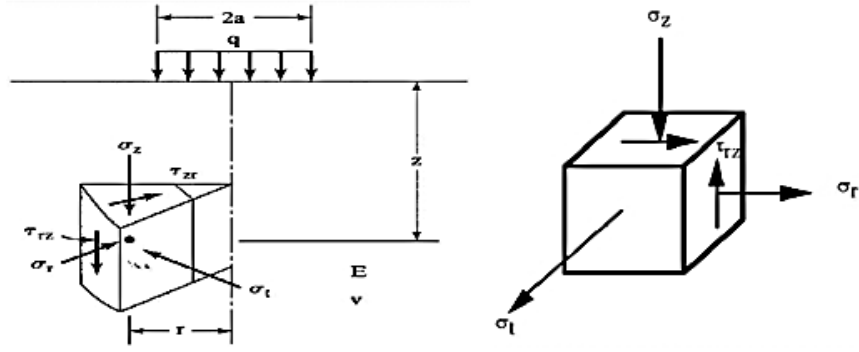
Trafiğe bağlı olarak genellikle 8-18 cm kalınlıklarında uygulanan bitümlü temel tabakası, genellikle bağlayıcısız granüler temel üzerine yoğun gradasyonlu bitümlü sıcak karışımın uygulandığı bir tabakadır.



Şekil 3.5. Tipik kaplama kesiti (Türkiye Asfalt Mütahitleri Derneği, 2009)

3.3.2. Esnek üstyapı tabakalarındaki kritik gerilme ve şekil değiştirmeler

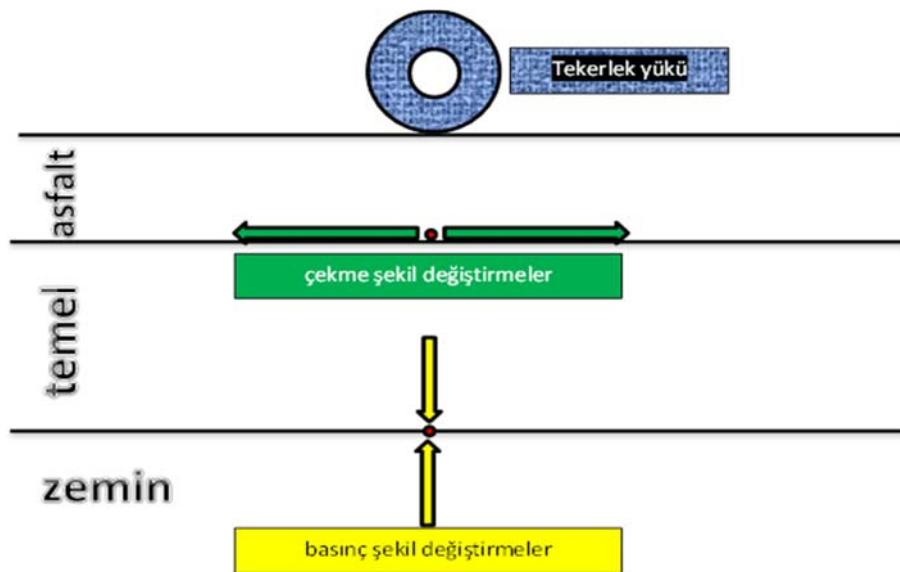
Tekerlek yükü altında yolda meydana gelen tüm eksenle gerilmeler asfalt yüzeyine yakın bölgelerde basınca neden olmaktadır. Bu gerilmeler asfalt yüzeyinde deformasyonlara sebep olmaktadır. Orta bölgelerde düşey gerilme (σ_z) basınç olarak mevcutken, yatay gerilmeler (σ_t , σ_r) basınç durumundan çekme durumuna geçer. Asfalt altında ise yatay gerilmeler (σ_t , σ_r) çekme iken, düşey gerilme (σ_z) basınçtır (Özcanan ve Akpınar, 2014). Gerilmeler Şekil 3.6'da görülmektedir.



Şekil 3.6. Eksenel simetrik yükleme altında oluşan gerilmeler

Eksenel simetri durumuna göre, σ_t , σ_r , σ_z normal gerilmeleri ve τ_{rz} kesme gerilmesi oluşmaktadır. Tek bir dairesel yük uygulandığı zaman, en kritik gerilme, şekil değiştirme ve defleksiyonlar simetri aksında dairesel alanın merkezi altında oluşmaktadır. Bu durumda $\tau_{rz} = 0$ ve $\sigma_t = \sigma_r$ olmaktadır. σ_z , σ_r asal gerilme olmaktadır (Saltan, 1999).

Üstyapıda meydana gelen basınç gerilmeleri yolda tekerlek izine (rutting), asfalt altında meydana gelen çekme gerilmeleri ise yorulma çatlaklarına (fatigue cracking) neden olabilmektedir. Maksimum gerilme direk tekerlek altında meydana gelir (Şekil 3.7). Bu gerilme; derinliğin ve tekerlek yatay mesafesinin artmasına bağlı olarak azalabilmektedir (Özcanan ve Akpınar, 2014).



Şekil 3.7. Asfaltta kritik çekme ve basınç gerilmeleri

Esnek üstyapılar tabakalı sistemlerdir. Tek bir tabaka için plak altında oluşan gerilmeler özel denklemler ile hesaplanabilir (Saltan,1999). Çok tabakalı üstyapılarda ise bu gerilmeleri hesaplayabilmek için bilgisayar teknolojisinden yararlanılabilir. Bu bilgisayar teknolojileri örneğin KENLAYER, ELSYM5, CHEVRON, EVERSTRS, WESLEA, ILLI-PAVE, DAMA, MNPAVE, BISAR gibi yazılımlardır.

3.3.2.1. KENLAYER programı

KENLAYER, sadece esnek üstyapılara uygulanmaktadır. KENLAYER, dairesel yüklenmiş bir alanda çok tabakalı bir sistem için çözüm yapar. Çözümler, nonlinear tabakalara çoklu tekerlekler ile yük uygulamaları için de kullanabilmekte ve visko-elastik tabakalar için düzeltmeler yapılmaktadır. KENLAYER, her bir tabakası farklı davranış gösteren hem lineer elastik, nonlinear elastik hem de visko-elastik davranan tek, dual, dual-tandem ya da dual-tridem tekerlekler altındaki tabakalı sistemlere uygulanabilir. Bozulma analizi, her biri farklı malzeme özellikli her yılı en fazla 12 periyoda bölerek yapılabilir. Her periyot, hem tek hem de çoklu olan en fazla 12 yük grubuna sahip olabilir. Bütün yük gruplarındaki her periyotta yorulma kırılması ya da kalıcı deformasyonun sebep olduğu bozulma, proje ömrünü değerlendirmek için verilmektedir (Saltan, 1999).

Tandem dingil yüklerine bağlı bozulmayı analiz etmek için KENLAYER'da, ilk olarak, dual-tandem tekerlekler altındaki üç noktada çekme ve basınç şekil değiştirmeleri belirlenir ve noktanın maksimum çekme şekil değiştirmesi ve maksimum basınç şekil değiştirmesi değerleri bulunur. Birinci dingil yüküne göre izin verilen yük tekrarlarının sayısını belirlemek için maksimum şekil değiştirmeler kullanılır. Sonra, iki dingilin tam ortasına tekabül eden çekme ve basınç şekil değiştirmeleri belirlenir. İkinci dingil yüküne bağlı olarak bozulma analizi için şekil değiştirme belirlenir. Tridem dingiller için de benzer işlemler uygulanır (Saltan, 1999).

KENLAYER, granüller malzemelerin davranışını ifade etmek için daha önce değinilen $k-\theta$ modelini kullanmaktadır. Çoğu granüller malzemenin hiç çekme gerilmesi almadığı bilinmektedir. Bunlar daha zayıf bir taban zemini üzerinde temel ya da alttemel olarak kullanıldığı zaman, bu malzemelerin en altındaki yatay gerilmeler daha çok çekme durumunda oluşur. Nonlineer analiz için KENLAYER'da iki metot kullanılmıştır. İlk metotta, nonlinear granüller tabaka bir kaç tabakaya bölünür ve her tabakanın orta derinliğindeki gerilmeler modülü belirlemede kullanılır. İkinci metotta, bütün granüller malzemeler, tek bir tabaka olarak düşünülür ve tabakanın üstten $1/4$ ve $1/3$ mesafeler arasındaki uygun bir nokta modülü hesaplamak için seçilir. Nokta tabakanın üst kısmında olduğu için, negatif θ 'nun değişimi nadirdir. Eğer θ (asal gerilmelerin toplamı) negatifin dışına çıkarsa minimum bir modül değeri atanır. Birinci metot daha doğru sonuçlar vermekle birlikte çok fazla işlem süresi gerektirir (Saltan, 1999).

Her iterasyon sırasında, sabit bir modüller grubu, önceki iterasyondan elde edilen gerilmelere dayanarak hesaplanır. Böylece problemin lineer olduğu düşünülür ve çoklu tekerlekler için süperpozisyon prensibi uygulanabilir. Tek ve çoklu tekerleklerle bağlı gerilmeler belirlendikten sonra, nonlinear tabakaların elastisite modülleri yeniden hesaplanır ve yeni bir gerilme grubu belirlenir. İşlem, modüller belirlenen tolerans sınırına gelene dek tekrarlanır. Lineer visko-elastik durum için, visko-elastik tabakalar tanımlanır. Diğer tabakalar ise lineer elastiktir. Her hareketli ya da sabit yüke göre çözümler elde edilebilir. Hareketli yükler için yarım bir sinüs fonksiyonu ve sabit yükler için de tam bir sinüs dalgası kullanılmaktadır. Nonlinear elastik ve lineer visko-elastik kombinasyon durumu için, bazı tabakalar nonlinear elastik; bazıları visko-elastik ve eğer kalan tabaka varsa o da lineer elastiktir. Eğer sadece bir tabaka visko-elasti her tabakadaki gerilmeler zamana bağlı olacaktır. Nonlinear tabakanın modülünü belirlemek için kullanılan gerilmeler, hareketli bir yük altında $t=0$ anındaki pik gerilmelerdir ya da sabit bir yük altında son andaki gerilmelerdir (Saltan, 1999).

3.3.3. Gerilme-deformasyonlara bağı yolda oluşan tipik bozulmalar

Üstyapıdaki bozulmalara, üstyapı tabakalarındaki kritik gerilme ve şekil değıştirmeler sebep olmaktadır. Bitüm karışımli tabakalarının alt kısımlarında oluşan çekme gerilmeleri ve şekil değıştirmeleri önce küçük çatlamalara ardından da gözle görölür kırılmalara sebep olmaktadır. Taban zemini üzerindeki düşey gerilme veya şekil değıştirmeler de kalıcı deformasyonlara neden olmaktadır (Saltan, 1999). Yolda meydana gelen en yaygın tipik bozulmaları; tekerlek izi (rutting) ve yorulma çatlakları (fatigue cracking) olmaktadır.

3.3.3.1. Tekerlek izi bozulmalar

Tekerlek izi bozulmalar; asfalt betonu üzerinde, tekerlek izi boyunca meydana gelen boylamsal çöküntüdür. Bu çöküntü doğal zeminden kaplamaya kadar, bütün yol katmanlarında görölabilir. Genel olarak hareketli kümülatif trafik yükünden dolayı oluşur. Trafik yükü altında kaplamada oluşan kesme gerilmesi, defleksiyon, düşey basınç gerilme deformasyonları ile asfaltın visko-plastik davranışı sonucu oluşan kalıcı hasarlardır. Tekerlek izi nedeniyle asfalt yüzeyinde oluşan su birikintileri, arabada sarsıntı, hâkimiyet kaybı, kayma ve fren mesafesinde kısalma gibi sorunlara neden olabilmektedir. Özellikle kış aylarında yolda, tekerlek izi hasarından dolayı biriken suyun donması, araba hâkimiyeti açısından ciddi problemler doğurur ki buda büyük kazalara sebebiyet verebilir. Gün geçtikçe trafik yoğunluğunun artması, kamyonların yükleme hadlerinin büyümesi ve özellikle tekerlek basınçlarının artması, tekerlek izini yolda daha yaygın bir problem haline getirmektedir (Özcanan ve Akpınar, 2014).

Tekerlek izi bozulmalar özellikle esnek kaplamalı yollarda meydana gelen bozulma tiplerinden biridir. Yukarıda da bahsedildiğı gibi tekerlek altında, yol boyunca oluşan sürekli deformasyonlara bağı oluşan tekerlek izidir. Tekerlek izi hasarı bütün kaplama tabakalarıyla beraber doğal zeminde de meydana gelebilmektedir. Tekerlek yükü yol malzemesinin yanal hareketine ve şişmesine

neden olabilmektedir. Yol malzemesinin yanal hareketi ve şişmesi ise yapım esnasında yol katmanlarının iyi sıkıştırılmamış olması ve sıcak havalarda asfaltın plastik davranışından kaynaklanmaktadır. Tekerlek izi hasarı en az iki nedenden dolayı istenmez; birincisi, eğer asfalt kaplaması geçirimsiz ise yüzeyde biriken sular 5 mm derinliği aştığında özellikle yolcu arabaları açısından oluşan sarsıntılar tehlike oluşturabilmektedir. İkincisi, yine tekerlek izi derinliğine bağlı olarak sürüş ve direksiyon hâkimiyetinde azalmalar meydana gelebilmektedir (Özcanan ve Akpınar, 2014).

3.3.3.2. Yorulma çatlakları

Yorulma çatlakları; stabilize temel tabakası veya kaplama yüzeyinde, kümülatif tekrar eden tekerlek yükü altında meydana gelen ve sürekli ilerleyen çatlaklardır. Yorulma çatlakları; trafik yükünden dolayı, kaplama tabakası altında meydana gelen çekme gerilme deformasyonları sonucu oluşur. İlk çatlaklar kaplama altından başlar ve yüzeye doğru yayılarak devam eder. Nihai olarak bu çatlaklar kaplama yüzeyinde, tekerlek hareket yönü boyunca, timsah sırtı çatlakları (alligator) olarak meydana gelir. Asfalt tabakalarında meydana gelen yorulma çatlakları, asfalt yapısında meydana gelen temel yapısal hasarlardan biridir. Kaplama yüzeyinde meydana gelen bu hasarlardan dolayı yağmur suları, asfalt katmanlarına sızmakta ve asfaltta yapısal bozulmalara neden olabilmektedir. Asfaltta meydana gelen yorulma çatlakları hasarı, metrekaareye düşen çatlak oranı olarak ölçülmektedir (Özcanan ve Akpınar, 2014).

Yorulma çatlağı üstyapı tasarımında ölçüt olarak alınan önemli faktörlerden biridir. Kaplama altında meydana gelen çekme deformasyonu ise; mekanistik tasarım açısından yorulma çatlaklarını tanımlayan ve çözümünü kolaylaştıran bir parametredir. Yolda meydana gelen yorulma çatlaklarının başlıca nedenleri; tekerlek yükü tekrarı nedeniyle oluşan çekme gerilme-deformasyonları ile çevresel faktörlerdir. Üstyapı servis ömrü boyunca tekerlek yüküne maruz kalır. Bunun sonucunda tekerlek tekrar yükü kümülatif olarak artar. Kümülatif artan tekerlek yükü, zamanla yolda deformasyonların oluşumuna sebep olur. Yol

altında meydana gelen çekme deformasyonları ve malzemenin çevresel faktörler nedeniyle yaşlanması sonucunda, asfalt altında çok küçük çatlaklar meydana gelir, zamanla bu çatlaklar yüzeye doğru yayılarak asfalt üstünde geniş çatlakların oluşumuna neden olabilmektedir. Yorulma çatlaklarına neden olan çevresel faktörlerden biri olan sıcaklık ise mevsimsel ve gün içindeki farklılık nedeniyle malzemenin mukavemetini olumsuz etkiler, ayrıca sıcaklık farkından dolayı oluşan genleşme-büzülme gibi faktörler yorulma çatlaklarını tetikleyebilmektedir. Ayrıca yağışlarla beraber artan yeraltı su seviyesi nedeniyle yol katmanlarında oluşan şişme-çökme gibi faktörler, yol katmanlarının kaplamaya sağladığı desteği zayıflatabilmektedir. Buna bağlı olarak tekerlek yükü altında kaplamada oluşan sehim artmakta, buda çatlak oluşumuna neden olabilmektedir (Özcanan ve Akpınar, 2014).

3.3.4. Üstyapıların durumunun belirlenmesi

Üstyapı değerlendirmesinde bir karayolu kesiminin yapısal ve fonksiyonel koşullarını belirlemek amacıyla ya rutin izlemeler ya da planlı doğru aksiyonların gerçekleştirilmesi gerekir. Fonksiyonel durum, ilk olarak üstyapı kesiminin sürüş veya yüzey dokusunun kalitesini belirlemeyi hedefler. Yapısal durumu ise defleksiyon ölçümleri gibi üstyapının yapısal kapasitesi, tabaka kalınlığı ve malzeme özellikleri ile ilgilidir (Özcanan ve Akpınar, 2014).

Esnek yol üstyapılarının durumunu değerlendirmesi, genel olarak iki amaç için yapılmaktadır. Bunlardan birincisi, mevcut üstyapının fiziki durumu hakkında bilgi vermektir. Böylelikle, uygun bakım ve onarım programı seçilir. İkincisi, inşaatı yeni tamamlanmış bir üstyapının kontrolünü gerçekleştirmektir. Üstyapı durumunu belirleme teknikleri arasında en hızlı ve en ekonomik olanını seçmek önemlidir. Bunun için devamlı araştırmalar yapılmaktadır. Çünkü dünyanın her yerinde karayolu üstyapı şebekelerinin bakım ve onarımı için büyük miktarda paralar harcanmaktadır (Saltan, 1999).

Kaplama yapılarının değerlendirmesi, zamanla çevresel koşullara maruz kalan karayolunun gelecekteki trafik yüklerini taşıyıp taşıyamayacağını kontrol etmek

için yapılmaktadır. Kaplamaların başarılı bir değerlendirmesi sonucunda, etkin rehabilitasyon ve bakım stratejileri geliştirilebilir. Bu arada, yapısal bileşenlerdeki kırılma ve bozulmaların nedenleri de ele alınabilmekte ve gerekli işlemler genel yapıyı bozulmalara karşı korumak üzere kullanılmaktadır. Bu amaçla, tabaka özelliklerini inceleyen yerinde testlerin yapılması gereklidir. karot, malzemenin doldurulması gerektiği kaplama bölümlerinde yapılan bir test yaklaşımıdır. Tamir edilse bile, numune almak için yol boyu açılan karot sayıları dikkate alındığında bu tür yıkıcı tekniklerin uygulanması mümkün olmayabilmektedir. Bu yüzden, hızlı ve kolay uygulamaları nedeniyle NDT (Tahribatsız Test Yöntemleri), yapısal bütünlüğü sağlama anlamında karayolu camiasında daha popüler hale gelmektedir (Öcal, 2014).

Kesimlerinin durumunu belirlemede tahribatsız test metotları kullanmanın sayısız faydası bulunmaktadır. Bilgisayar programcılığındaki gelişmeler, üstyapı mühendislerinin tahribatsız test verilerinden yararlanarak üstyapı malzeme özelliklerini belirlemeyi daha kolay hale getirmiştir. Karayolu üstyapı mühendislerince kullanılan en yaygın tahribatsız test (Non Destructive Testing NDT) metodu, defleksiyon testidir. Defleksiyon, bir yük altında üstyapının tepkisinin ölçümüdür. Defleksiyon testleri, üstyapının yük taşıma kapasitesini tahribatsız olarak değerlendirmekte kullanılmaktadır (Saltan, 1999).

Defleksiyon testi kullanılarak çok kısa bir zamanda çok fazla defleksiyon verisi toplanabilir. Bir üstyapı kesiminde istenilen sayıda defleksiyon testi uygulanabilir. Ancak bu verileri toplamak tek başına hiçbir şey ifade etmez. Önemli olan NDT test sonuçlarını yorumlamak ve üstyapı malzeme özelliklerini belirlemede kullanılabilecek bir analiz yapabilmektir. Analizdeki gerçeklik derecesi analizcinin yaptığı kabullere de bağlıdır. Üstyapıda ölçülen defleksiyon, tabaka karakteristiklerini belirlemenin yanında üstyapının o andaki durumu hakkında da bilgi verir. Ölçümlerle elde edilen defleksiyon eğrisinin geometrisinden ve ölçülen değerlerin büyüklüğünden üstyapı hakkında bir fikir elde edilebilir. Bu defleksiyon değerlerinden yararlanarak, üstyapının tabaka elastisite modülleri ya da tabaka sertlik modülleri hesaplanabilir. Tabaka karakteristiklerinin belirlenmesi ise malzeme özellikleri ile üstyapı performansı

arasındaki ilişkinin daha iyi anlaşılmasını sağlar. Bunun yanında üstyapı tabaka elastisite modüllerinin değişimi izlenerek üstyapıda uygulanacak rehabilitasyon çalışmalarına yön verilebilmektedir (Saltan, 1999).

NDT, üstyapı durumunu belirlemede pek çok avantaj sağlar. Temel avantajı, kısa bir sürede bir karayolu üstyapısı üzerinde pek çok noktada veri toplayabilme özelliğidir. Test sonuçlarını yorumlamak günlerce sürmez. Elde edilen veriler birkaç saat içinde değerlendirilip üstyapı durumu hakkında bilgi edinilebilir. Hatta trafiğin az olduğu gece saatlerinde de test uygulamak mümkün olabilmektedir. Belli karayolu üstyapı kesimlerini sürekli olarak gözlemek, tahribatsız test yöntemlerinin faydalarına dahil edilebilir (Saltan, 1999).

3.3.5. Esnek üstyapıların kalan ömrü

Kullanımdaki bir kaplamanın kalan ömrünü doğru bir şekilde değerlendirme ihtiyacı, karayolu harcamalarında son zamanlarda yeni bir kaplamanın inşaatından kaplama rehabilitasyonuna kadar uzanan büyük değişimlerin ışığında büyük ölçüde önemi giderek artan bir sorun olmaktadır. Bu nedenle, kaplama yapısının kalan ömrünü doğru bir şekilde tahmin etmek gereklidir. Herhangi bir rehabilitasyon girişiminde bulunulmadan önce, karayolu mühendisleri rehabilitasyonun boyutunu belirlemek için mevcut kaplamanın kalan ömrünü tahmin etmelidirler. Kalan ömür, trafik ve çevresel faktörlere maruz kalan kaplama sisteminin geriye kalan kullanışlı ömrünün bir ölçüsüdür. Kalan ömür yıl bazında ve kalan yük tekerlek sayısı veya tasarım ömür yüzdesi olarak ifade edilebilir (Dennis vd., 2012).

Kalan ömür, kaplama sisteminin gelecekteki rehabilitasyon ihtiyaçlarının tahmin edilmesinde çok önemli bir rol oynamaktadır. Gelecekteki planlama ve bütçe oluşturma amacıyla, sistemdeki her bir kaplama bölümünün kalan ömrünü tahmin etmek önemlidir. Bu sadece büyük bir rehabilitasyonun zamanlaması için yararlı olmamakta aynı zamanda ağırlı uzun vadeli ihtiyaçlarını tahmin etmede yöneticilere yardımcı olmaktadır (Dennis vd., 2012).

Bir BSK (Bitümlü Sıcak Karışımı) kaplamasının kalan ömrünü tahmin etmek için çeşitli tahribatsız test yöntemlerinden geliştirilmiş malzeme özelliklerini kullanan farklı tahmin modelleri vardır. Kalan ömrün tahmini için mevcut olan yöntemler, tamamen deneyselden gerçekten mekaniğe kadar olan çeşitli kavramlara dayanmaktadır. Bu tahmin modelleri dört genel tipe ayrılabilir: tamamen deneysel, tümüyle mekanik, mekanik-deneysel ve sübjektif. Mekanik modeller, farklı yükleme koşulları altında kaplama sistemindeki gerilme ve şekil değişimini belirlemek için malzeme özelliklerini kullanmaktadır. Ancak, birincil kaplama bozulmaları olan; tekerlek izi ve yorgunluk çatlaması o kadar karmaşıktır ki tek başına bir mekanik model kaplamanın kalan ömrünü tahmin etmede kullanışlı olmamaktadır. Diğer taraftan, deneysel modeller bozulmaların teorik mekanizmalarını kullanmamaktadır. Bu modeller, kullanımdaki kaplama koşullarının geçmişe dönük gözlemlerine dayalı olan bozulmanın gelecekteki seviyelerini tahmin etmekte ve tahminler diğer kaplamaların performans özelliklerine dayalı olabilmektedir. Yani, deneysel modeller deneyim bazından farklı özelliklerle bir kaplamanın kalan servis ömrünü tahmin etmede yararlı olmayabilir. Mekanik-deneysel modeller, daha önce açıklanan iki modelin bir arada bulunduğu modeldir. Malzeme özellikleri, kaplama sistemindeki gerilme ve şekil değişimlerini tahmin etmek için kullanılır ve transfer fonksiyonları denilen deneysel ilişkiler tahmin edilen gerilme ve şekil değişimini kaplama bozulmasıyla karşılaştırmak için kullanılmaktadır. Sübjektif tahmin modelleri, kaplama yapısının ömrünü tahmin etmek için deneyimli kişilerin yargılarına dayanmaktadır. Sübjektif modeller, tahminleri yapan kişilerin bireysel yargılarına bağlı olduğundan çok fazla transfer edilebilir ya da tekrarlanabilir değildir (Dennis vd., 2012).

Kalan ömrün tahmininde önemli parametreler, kaplamanın rijitlik profili, trafik verileri, kaplama bozulma verileri ve kaplama tabakalarının kalınlıklarıdır. Tahribatsız test (NDT) metodu, BSK kaplamalarının kalan ömrünü tahmin etmek amacıyla kaplamanın sertlik profilini elde etmede kullanılabilir. Düşen ağırlık deflectometer (FWD), mevcut kaplamaların rijitlik profilini belirlemek için ulaşım firmaları tarafından yaygın olarak kullanılan birçok NDT araçlarından birisidir. Diğer NDT araçları, trafik hacmi veya bozulma gibi diğer

parametrelerin durumunu değerlendirmek için kullanılabilir. Genel bir kural olarak, rijitlik azaldıkça kalan ömür azalır ve trafik uygulaması arttıkça kalan ömür azalır (Dennis vd., 2012).

Başlangıçta üstyapı bozulmaları yol kullanıcılar tarafından hissedilemez. Yapısal bozulmalar; asfalt bağlayıcılık malzemelerde küçük çatlaklar şeklinde, granüler malzemelerde ise ezilme, agregaların aşınması ya da su girmesinin yol açtığı bozulmalar şeklinde gelişebilir. Sonuçta, yapısal bozulmalar gözle görülebilir hale gelecek ve fonksiyonel bozulmalar halini alacaktır. Yani pürüzlülük, oluklanma ve diğer bozulmalar, sürüş konforunu etkileyecek ve yol kullanıcısı tarafından hissedilecektir. Bu bozulmaların ilerlemesi kullanıcı maliyetlerini, güvenliği ve seyahat süresini etkileyecektir (Saltan, 1999).

Fonksiyonel bozulmaları tabanlı yaklaşımda, kalan ömür kaplamanın hizmet verebilirliği ve sürdürülebilirliği temelinde hesaplanmakta ve yıl/8.2 ton eşdeğer tek dingil yükleri (EASL) gibi ifade edilebilmektedir. Servis verebilirliğin ölçümlerinden biri AASHO yol testi sırasında geliştirilen Mevcut Servis Kabiliyeti İndeksidir, (Present Serviceability Index PSI). Öte yandan, yapısal bozulmalara dayalı bir yaklaşımda temel sorun kaplamanın yapısal kapasitesinin azalmasıdır. Yapısal bozulmalar tabanlı analizler, kalan ömrü tahmin etmek için genellikle yorulma ve tekerlek izi kriterlerini kullanmaktadır (Dennis vd., 2012).

Üstyapıdaki bozulmalara, üstyapı tabakalarındaki kritik gerilme ve şekil değiştirmeler sebep olmaktadır. Asfalt tabakalarındaki çekme gerilmeleri ve şekil değiştirmeleri önce küçük çatlamalara ardından da gözle görülür kırılmalara sebep olacaktır. Granüler tabakalarındaki kesme gerilmeleri de üstyapı yüzeyine kadar yansıyan kalıcı deformasyonlara(oluklanma) sebep olmaktadır. Yüzey defleksiyonları, üstyapılardaki kritik gerilme ve şekil değiştirmelerle doğrudan ilişkili değildir. Yani aralarında çok basit bir ilişki yoktur. Ancak defleksiyonlar tabaka modülleri şeklinde ifade edilirse, bu durumda defleksiyonlar yardımıyla kritik gerilme ve şekil değiştirmeler hesaplanabilmektedir (Saltan, 1999).

3.3.5.1. Mevcut üstyapıların kalan ömrünün hesaplaması

Üstyapı ömrü, geçen yükler sonucu üstyapıda oluşan gerilme ve şekil değiştirmelere bağlı olarak değişir. Üstyapı kalan ömrü dört adımda hesaplanmaktadır. Bunlar; şekil değiştirmelerin hesabı, izin verilen trafik hesabı, mevcut yorulma miktarı ve son olarak da kalan ömür hesabı (Saltan, 1999).

Kalan ömrün hesaplamak için, tabakaların modül değerleri, trafik verileri, tabakaların kalınlıkları parametreler bulunması gerekmektedir. Bitümlü tabakanın en alt kısmındaki maksimum yatay çekme şekil değiştirmesi ve taban zeminindeki maksimum basınç şekil değiştirmesi hesaplanması gerekir. Bunun için bir elastik tabaka programın kullanılabilir. Maksimum basınç şekil değiştirmesi (0.0001 in) temel ve taban zemini tabakasının arayüzü altında hesaplanmalıdır, maksimum yatay çekme şekil değiştirmesi asfalt tabakasının altında hesaplanmalıdır.

Dingil yükü uygulamaları tekrar sayısının izin verilen miktarı, bitümlü tabakadaki yorulma ve taban zemini düşey şekil değiştirme (kalıcı deformasyon) değerine bağlı olarak hesaplanmaktadır. Bunun için iki denklem vardır

Yorulmaya göre:

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

Deformasyona göre ise:

$$N_r = f_4 * (\epsilon_c)^{-f_5} \quad (3.2)$$

Burada: N_f , N_r yorulma ve deformasyon için izin verilen standart yükü tekrar sayısıdır. ϵ_t Bitümlü tabakasının altındaki maksimum yatay çekme şekil değiştirmesidir. E_{ac} Asfalt tabakasının elastisite modülü. ϵ_c Taban zeminindeki tabakasının üstündeki basınç şekil değiştirmesidir. f_1, f_2, f_3, f_4 ve f_5 katsayılarıdır,

genellikle alan performans verileri, yol testleri ve laboratuvar testlerinden tespit edilmiştir. Çizelge 3.1 aşağıda çeşitli kurumlar tarafından geliştirilen katsayılarının değerleri vermektedir (Huang, 1993).

Çizelge 3.1. Esnek üstyapı kalan ömrü, yorulma ve deformasyon modeli parametreleri

Kurumlar	$N_f = f_1 * (\epsilon_t)^{-f_2} * (E_{AC})^{-f_3}$			$N_r = f_4 * (\epsilon_c)^{-f_5}$	
	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5
Asphalt Institute	0.0796	3.291	0.854	1.365 E-9	4.477
Shell	0.0685	5.671	2.363	-	-
Shell(50%Reliability)	-	-	-	6.15E-7	4
Shell(50%Reliability)	-	-	-	1.94E-7	4
Shell(50%Reliability)	-	-	-	1.05E-7	4
Illinois dept. Of Transportation	5E-6	3	-	3	-
Transport And Road Research Laboratory	1.66E-10	4.32	-	4.32	-
U .K Research & Road Research Laboratory (85% Reliability)	-	-	-	6.18E-8	3.95
University Of Nottingham	-	-	-	1.13E-6	3.571
Belgian Road Research Center	4.92E-14	4.76	-	3.05E-7	4.35

N_f , N_r değerlere bağlı olarak Yorulma ömrü ve Deformasyon ömrü yukarıda verilen formüller yardımıyla hesaplanır. Bu ömür değerlerinden kritik olanı, yani küçük olanı üstyapı ömrü olarak kabul edilir.

Zarar oranı hesaplaması, uygulamalı yük ve izin verilen sayısının oranı olarak tanımlanmıştır. Zarar oranını hesaplamak için aşağıda verilen denklem kullanılmaktadır.

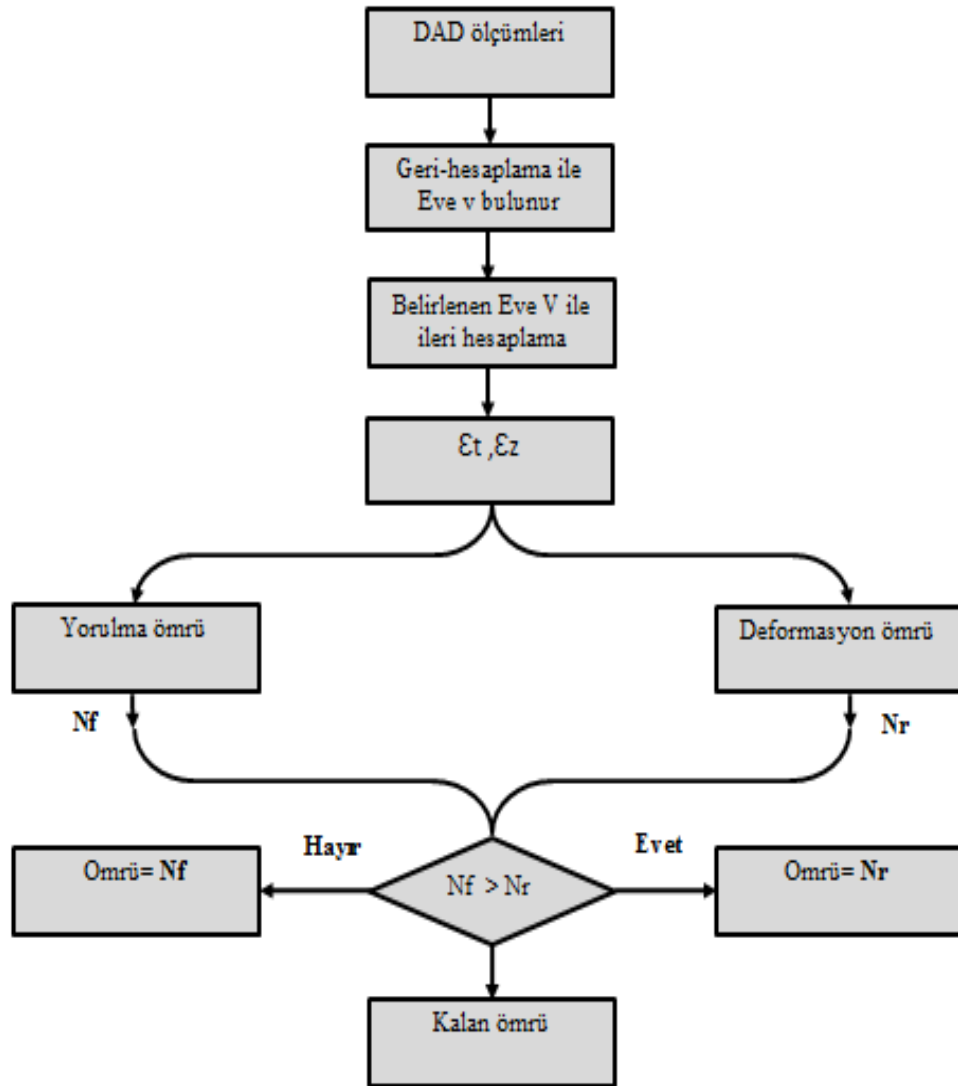
$$D = N/N_{f,r} \quad (3.3)$$

Burada, D üstyapı için zarar oranı. N Fiili yük uygulama değeri ve $N_{f,r}$ yorulma veya deformasyon için izin verilen standart yükün tekrar sayısıdır.

Kalan ömrü hesaplamak için aşağıda verilen denklem kullanılmaktadır:

$$KÖ = (1 - D).Y \quad (3.4)$$

Burada, KÖ kalan ömür, D Zarar oranı, Y Üstyapı tasarım ömrü. Şekil 3.8’de üstyapıların kalan ömrünü hesaplamamanın adımları için bir akış şeması görülmektedir.



Şekil 3.8. Üstyapıların kalan ömrü hesaplamamanın adımları akış diyagramı

4. ÜSTYAPIDA TAHRİBATSIZ YÖNTEMLER

4.1. Genel Bakış

Karayolu ağının büyük çoğunluğunun bakım ve onarıma gereksinimi vardır. Ancak zamanında bakım yapılırsa yolların ömrü uzatılabilir. Yeni yollar yapmak oldukça pahalı bir iştir. Bu nedenle, ana hedef mevcut yolları iyileştirmek olmalıdır. Bu durumda karayolu üstyapılarının yapısal olarak bir incelemeye tabi tutulması artan bir önem kazanmaktadır. Çünkü bakım ve onarım gereksinimlerini belirlemede, harcamaları belirlemede, bakım ve onarım planlamalarında, bakım ve onarım seçenekleri arasında seçim yapmak için ülke karayolu teşkilatı tarafından kullanılacak sonuçlar yapısal analizlerden ortaya çıkar (Grau ve Alexander, 1994).

Rijit ve esnek üstyapının değerlendirme ve tasarım yöntemleri çok hızlı bir şekilde geliştirilmiş, aynı zamanda çeşitli teorikler testler ortaya çıkmıştır. 1926 yılında westergad analizi ile rijit kaplama araştırmaları ve 1947 yılında full-scale analizi ile esnek kaplama araştırmaları gerçek uçakların inişinde havaalanının kaplamasının üzerinde uyguladığı yükü inceleyerek ortaya çıkmıştır (Grau ve Alexander, 1994).

Esnek üstyapıların gerilme, birim deformasyon veya defleksiyon durumlarının tahmini için kullanılan analitik metotlarla ilgili çalışmalar ilk olarak 1940'lı yıllarda başlamıştır. Tahribatsız test yöntemleri kullanılarak ilk olarak 1958 yılında, Amerikan Ulusal Karayolu ve Ulaştırma Teşkilatı (AASHO), tahribatsız test aletleriyle gerçek yollar üzerinde testler yapmışlardır. Daha sonra diğer dünya ülkelerinde de tahribatsız yol testleri artarak kullanılmaya devam etmiştir (AASHTO, 1993).

1950-1960 yılları arasında havaalanı kaplamaları tahribatsız testleri NDT (nondestructive tests) ile yapılmaya başlamıştır. Bunun sebebi ise geleneksel yöntemler ile kaplama dayanım kapasitesini değerlendirebilmek için numune alınması gerekmektedir. Bu numune alma işi hem maliyetli hem de zaman

almaktadır. Aynı zamanda uçakların iniş ve kalkış zamanları ve yolları tekrar programlanmalıdır. Uçak yüklerinin artışı, kaplamanın tasarımsal ömrünü azaltmaktadır. Havaalanı kaplamalarının sürekli ve dikkatli değerlendirilmesi yöneticiler için çok önemlidir. Bu yüzden kaplamaların bakım görmesi gerekmektedir. Bu ihtiyaçları hızlı bir şekilde karşılamak için test cihazları, veri toplama teknikleri ve değerlendirme yöntemleri gerekmektedir. NDT testleri ilk olarak havaalanının kaplamalarının dayanım kapasitesini ölçmek amacıyla uygulanmasına rağmen daha sonra yolların kaplama testlerinde de kullanılmaya başlanmıştır (Grau ve Alexander, 1994).

4.2. Üstyapıda Tahribatsız Test Yöntemleri

Mevcut olan ve kullanılan kaplama özelliklerini ölçen çoğu test yöntemlerinde problem yaşanmaktadır, çoğu zaman zarar verdiği için tamir edilmesi gerekmektedir. Bu durum hem fazla test numunesi hem de fazla işçiliğe ihtiyaç duymakta olup yerinde kaplamanın özelliklerin ölçmemektedir. Dolayısıyla kaplamaya zarar vermeyecek şekilde NDT yöntemleri kullanılmaktadır (Graveen, 2001).

Tahribatsız yöntemleri NDT'nin üstyapının özelliklerini bizzat yerinde belirlemek, alt yapıya herhangi bir zarar vermemek, laboratuvar testlerini ortadan kaldırmak ve bunun sonucunda çok hızlı yapılabilme gibi avantajları vardır. Üstyapıya uygulanan yükler sonucunda oluşan defleksiyon değerleri üstyapı dayanımının bir göstergesi olmakta ve elde edilen defleksiyon verilerine dayanarak üstyapı hakkında bilgiler elde edilebilmektedir. Yani üstyapının durumunu ortaya koyacak rakamlar hesaplanabilmektedir. Belli üstyapı kesimlerinde tekrarlı olarak yapılan defleksiyon ölçümlerinden üstyapının zamanla ne şekilde bozulduğu ortaya çıkarılabilmektedir. Trafik, zaman ve defleksiyon değişimleri arasında geliştirilen ilişkiler, analizlerde bilgisayar programcılığının kullanımını kolaylaştırmaktadır (Saltan, 1999).

Tahribatsız testler genel olarak, mevcut yol üstyapılarının farklı özellikler taşıyan tabakaların elastisite modüllerini geri hesaplamak, üstyapıda çatlak ve

derzler boyunca yük aktarımının etkisini değerlendirmek, kalite kontrolü yapmak ve beton plaklar altındaki boşlukların yerini ve boyutunu belirlemek için kullanılır (Gramajo, 2005).

NDT, tahribatlı deneylere göre iki önemli faydaya sahiptir. Birincisi, tahribatlı deneyler üstyapıya zarar verir veya deney için üstyapı malzemesinin çıkarılmasını gerektirir. Oysa NDT üstyapıya zarar vermeden üstyapının değerlendirilmesini sağlar. İkinci faydası ise, tahribatlı deneylere göre trafiğin daha az kesintiye uğraması ve ucuz olmasıdır. Tahribatsız deneyler (NDT), proje çözümlemesi için değerli bilgileri içerir. NDT donanımlarının birçok tipi mevcuttur. NDT sonuçları, esnek üstyapılarda aşağıdaki bilgileri belirlemede kullanılır (Saltan, 1999):

- yapısal tabakaların her birinin elastiklik modülü,
- üstyapı yapısal yeterliliği,
- takviye tabakası kalınlık tasarımı,
- hem trafiğe açık hem de açık olmayan alanlar için defleksiyon profil,
- kalan yapısal ömür.

Tahribatsız test aletlerinin seçiminde şu ön faktörler dikkate alınmaktadır (Saltan, 1999):

- Uygulamayla ilgili karakteristikler (veri toplama hızı, veri kaydı, trafik gecikmesi, kalibrasyon gerekip gerekmediği, taşınabilirlik),
- Veri kalitesi (tekrarlanabilirlik, uygunluk, doğruluk),
- Maliyet,
- Çok yönlülük (sensörlerin sayısı, hareket kabiliyeti),
- Güvenilirlik,
- Servis süresi

Genellikle esnek üstyapı kalite kontrolü ve değerlendirmesinde yaygın olarak kullanılan tahribatsız test teknikleri hakkında bilgi verilmiştir. Bu teknikler çalışma prensiplerine göre üç kategoride toplanmıştır: Defleksiyon temelli olan metotlar, elektromanyetik metotlar ve gerilme dalga yöntemleri.

1. Defleksiyon temelli olan metotlar

- Statik yükleme yapan aletler
- Sabit-sarsıcı yükleme yapan aletler
- Ani çarpma yüklemesi yapan aletler
- Sürekli Yükleme Defleksiyonlar

2. Elektromanyetik yöntemler

- Nükleer yoğunlukölçer
- Nükleer olmayan elektromanyetik yoğunlukölçer
- Zemin penetrasyon radarı (GPR)
- İnfrared tomografi yöntemi
- Lazerli profil ölçer
- Manyetik görüntüleme teknikleri

3. Gerilme dalga yöntemleri

- Darbe-yankı yöntemi (Impact- Echo IE /Pulse Echo PE)
- Ultrases geçiş hızı (UGH)
- Yüzey dalgaların spektral analizi (SASW)metotlar.

4.2.1. Defleksiyon temelli yöntemler

Bu aletlerin tümü, bir yük uygulamak suretiyle üstyapı yüzeyinde oluşan defleksiyon değerini ölçme temeline dayanır. Üstyapı tepkisi, üstyapının bir ya da daha fazla noktasında ölçülür. Bu aletler arasındaki temel farklar; yük seviyeleri, üstyapıya yük uygulama şekli, defleksiyon ölçülen noktaların sayısı şeklinde sıralanabilir (Saltan, 1999).

4.2.1.1. Statik yüklemeli yöntem

Benkelman kirişi gibi statik yüklemeli defleksiyon araçları yüzey değerlendirmede kullanılan NDT metotlarının ilk uygulamaları arasındadır. Metot düşük maliyetlidir ve kullanımı kolaydır ancak bu metot yavaştır, yoğun emek ister. Ayrıca, statik veya yarı durağan yükleme işi hareket eden bir tekerlek yükünün etkilerini tam olarak temsil etmez (Al-Qadi vd., 2011).

4.2.1.1.1. Benkelman kirişi

1952'de (Western Association of State Highway Organizations WASHO) tarafından geliştirilen benkelman kirişi dünyada defleksiyon ölçümünde kullanılan aletlerden belki de ilki ve de en iyi bilinenidir (Pavement Interactive, 2010).

Temel olarak, uçayak üzerinde taşınan bir ana kirişe bağlanmış bir ölçüm çubuğundan oluşmaktadır (Huang, 1993). Benkelman kirişi aleti Şekil 4.1'de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Benkelman kiriş aleti

Benkelman kirişi, 1950'li yılların ortalarında WASHO yol testlerinde geliştirilmiştir ve günümüze de kullanımı her ne kadar azalsa da yerler hala mevcuttur. Benkelman kirişi, günümüze dek pek çok araştırma projesinde kullanılmaktadır. Fakat tek noktada ölçüm yaptığı için defleksiyon eğrisi oluşturamaz ve üstyapı hakkında tam bir bilgi veremez. Üstyapının tek bir noktasında ölçüm alınırsa, bize üstyapı hakkında yanıltıcı bilgi verebilir. Yük merkezi altında aynı büyüklükte defleksiyon değerleri ölçülmüş olmasına

rağmen, defleksiyonların ölçüldüğü iki üstyapı birbirinden oldukça farklı olabilir (Saltan, 1999).

Kirişin ucundaki defleksiyonu diğer ucunda sabitlenmiş ölçü saati ile ölçmektedir ve kiriş 80 kN' luk yüklü kamyonun arka çift tekerleklerin arasına koyulup kirişin defleksiyonu kamyon yavaş olarak hareket ettikten sonra ölçülmektedir. Kamyonun daha önce belirlenen noktalardan geçtikçe gösterilen defleksiyon değerleri okunmaktadır. Benkelman kirişi uygulaması Şekil 4.2'de gösterilmiştir. Defleksiyon ölçebilmek için karşılıklı yer değiştirme (reciprocal displacement) prensibi kullanılabilmektedir (Huang, 1993).

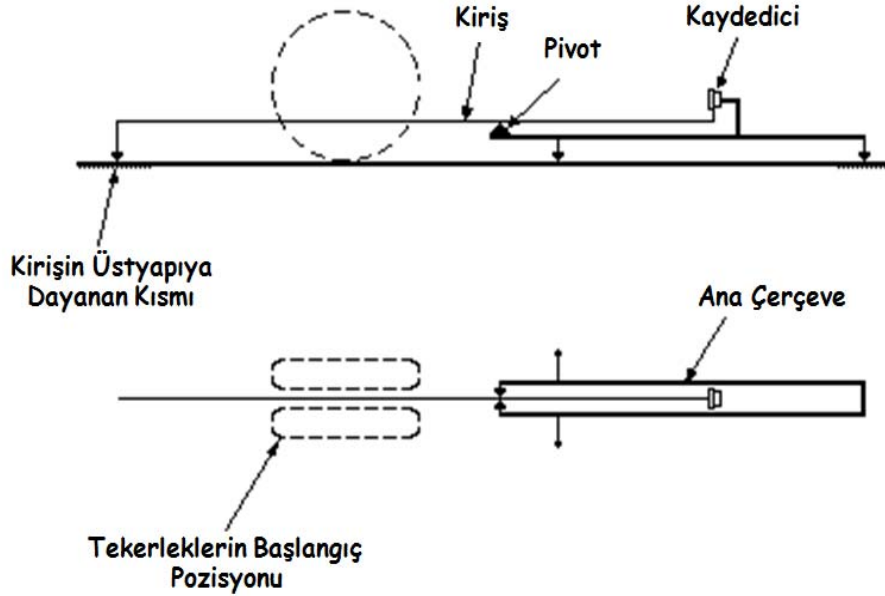


Şekil 4.2. Esnek üstyapılar için benkelman kirişi uygulaması

Defleksiyon ökülümünde çoğu zaman sadece kamyonun arka şasesinin yük miktarı göz önünde bulundurulmaktadır. Yalnız doğru analiz yapılması için tekerleklerin hava basıncı, iki tekerleğin arasındaki mesafe ve tekerleklerin bıraktığı izin genişliği bilinmelidir (Molenaar, 2006). Benkelman kirişi ve temel elemanları Şekil 4.3'te gösterilmiştir.

Aletin avantajları ucuz ve kullanışı basit olmasıdır, dezavantajı ise kamyonun hızı yavaş olduğu için cihazda bir titreşim oluşmakta böylece okunan değerler

açıklanması zor olmaktadır. Ayrıca defleksiyon miktarın geçen diğer araçlar tarafından da etkilenmektedir (Molenaar, 2006).



Şekil 4.3. Benkelman kirişi ve temel elemanları

4.2.1.1.2. Traveling deflectometer ve deflectograph

Traveling deflectometer cihazı, benkelman kirişi cihazı ile aynı prensipte çalışmaktadır ve kaplama yüzeyi defleksiyonunun yanında eğiliminin yarıçapı da ölçülmektedir. Bu eğilim kaplamanın dayanımını belirtilen önemli bir faktördür. Defleksiyon ölçümü statik ve basit bir yük altında uygulanmasına rağmen kamyonun uyguladığı koşullara benzememektedir (Pandey, 2005).

California Karayolların bölünmesi tarafından geliştirilen traveling deflectometer otomatik hale getirilmiş bir benkelman kiriş'idir. 80 kN'luk yük uygulayabilen arka dingile sahip kamyon hareket ederken defleksiyon ölçülmektedir. La Croix Deflectograph ise Fransa'da geliştirilmiş bir alet olup traveling deflectometere çok benzemektedir. Avrupa'da ve dünyanın pek çok yerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Huang, 1993).

La Croix Deflectograph cihazı, benkelman kirişi cihazı aynı prensiple çalışmasına rağmen tek farkı ölçme sistemi kamyonu takılı olup bir sonraki ölçü yerine otomatik olarak taşınmaktadır (Molenaar, 2006).

Her seferinde yeniden monte edilmek suretiyle ölçüm yapar ve 2-4 km/sa'lık hızlarda uygulanabilir. Deplasman transdüserleri iki tanedir. Genelde elektronik transdüserler kullanılır. Ölçüm esnasında iki kirişin çerçeveleri dual tekerleğin ön tarafında yol yüzeyine yerleştirilir. Tekerlekler kirişe yaklaştığında, kiriş döner ve dönme miktarı transdüserlerle ölçülür. Bu ölçüm tekerlek geçene kadar sürer. Kirişler ve çerçeve bir sonraki ölçüm yerine sürüklenerek götürülür. Bu sistem önceleri tek noktada ölçüm alırken, daha sonraları birkaç noktada ölçüm yapar hale getirilmiştir (Saltan, 1999). La Croix Deflectograph uygulaması Şekil 4.4'te gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Esnek üstyapılar için La Croix Deflectograph uygulaması

Benkelman kirişi cihazına göre La Croix deflectograph aynı süreçte daha fazla ölçü alınabilmektedir. Yalnız bu sistem maliyetlidir(testlerin maliyeti FWD testinin maliyetine yakındır, her km için 120 sterlindir) (Molenaar, 2006).

La Croix deflectograph yükleme yapan aletlerle ilgili en önemli problem; defleksiyonların sabit bir referans noktası baz alınarak ölçülmesidir. Ayrıca,

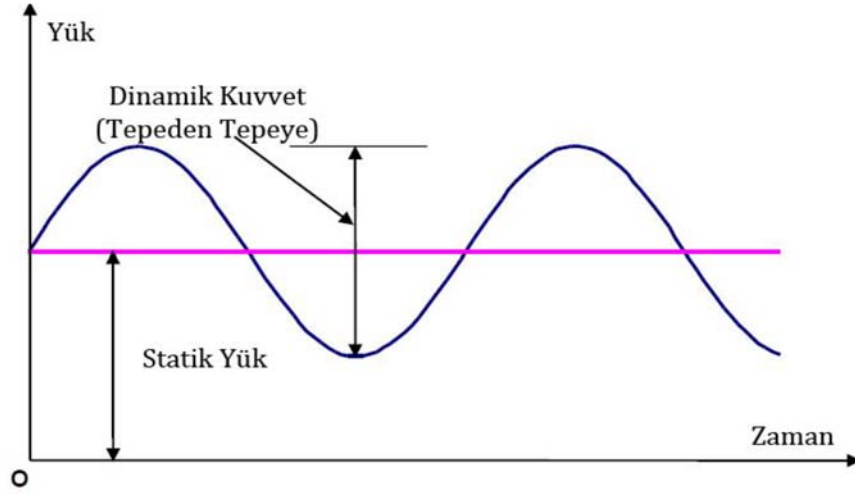
statik ya da yavaş hareket eden yükler, üstyapılar üzerindeki gerçek yükleme sürelerini temsil etmemektedirler. Dolayısıyla bu aletlerden elde edilen verilerin, kabul görmüş ampirik bağıntılar kullanmadan üstyapı projelendirmesinde kullanılması çok doğru olmayacaktır (William vd., 2010).

La Croix Deflectograph yükleme yapan deflectograph ve benkelman kirişi'nin temel dezavantajlarından birisi de, sadece yükün merkezi altındaki defleksiyonu ölçebilir olmalarıdır. Bu durumda, farklı karakteristiklere sahip iki farklı üstyapı kesiminde bu aletlerle test yapıp aynı defleksiyon değeri ölçüldüğü zaman her iki kesim için de aynı değerlendirme yapılacaktır. Bu da beraberinde hatalı bir yorumlama getirecektir (Saltan, 1999).

Son yıllarda yeni bir deflectograph tipi geliştirilmiştir. Buna ikinci jenerasyon deflectograph adı verilmektedir. Ölçüm aleti, özel olarak dizayn edilmiş bir standart kamyonun treylerine monte edilmiştir. Aracın toplam uzunluğu 13.5 m civarındadır. Ancak ölçüm esnasında 4 m. daha uzamaktadır. Ölçüm esnasında aracın hızı ortalama 7 km/sa ve uygulanan yük 5 ton civarındadır. Seksenli yılların başında geliştirilmeye başlamıştır ve 1988 yılında bu gelişme tamamlanmıştır (Saltan, 1999).

4.2.1.2. Sabit-sarsıcı yükleme yapan aletler

Dynafleet ve road rider bu kategori için en iyi bilinen aletlerdir. Temelde, sarsıcı yükleme yapan aletler, dinamik bir kuvvet jeneratörüyle üstyapıya sabit durumda bir harmonin vibrasyon uygularlar. Pikten pike dinamik kuvvetin büyüklüğü statik kuvvetin büyüklüğünün iki katına yakındır. Bu durum Şekil 4.5'te gösterilmiştir. Defleksiyonlar, ivmeölçer ya da hız sensörleriyle ölçülür. Bu sensörler, yükün merkezinde ve merkezden (0.3m)'lik aralıklarla yerleştirilir (Huang, 1993).



Şekil 4.5. Zemine statik bir önyükleme ve sinüs biçimli dalga oluşumu

Statik yük uygulayan aletlerden daha üstün olan bu alet tipinin en önemli avantajı, sabit bir referans noktasına göre ölçüm yapmamasıdır. Dinamik gücün büyüklüğü ile defleksiyon değişimini karşılaştırabilmeyi sağlayabilmektedir. Sabit-sarsıcı yükleme yapan aletlerin dezavantajı, üstyapıya uygulanan yüklerin sabit-sarsıcı durumda olmasıdır. Sabit sarsıcı bir aletin oluşturduğu defleksiyon eğrisi gerçek tekerlek yükünün oluşturduğu defleksiyon eğrisi ile aynı olmamaktadır (Saltan, 1999).

Gerilme durumlarında ve bazı gerilmelere duyarlı üstyapı malzemelerinin rijitlikleri bu önyüklemelerden etkilenebilmektedir. Ayrıca, yüklemenin frekansı defleksiyon sonuçlarını etkilemektedir ve hareket eden araçlarla uyumlu bir yükleme frekansı kurmak zordur. Bu aletlerin ince kaplamada (Örneğin köy yollarında, otoparklar ve diğerler) kullanımı uygundur (Al-Qadi vd., 2011).

4.2.1.2.1. Dynaflect aleti

Dynaflect, sabit-sarsıcı yük uygulayabilen ilk elektro-mekanik alettir. Treylere monte edilmiştir ve standart bir araçla çekilebilir. (8.9 - 9.3 kN) arasında statik bir ağırlık, bir çift çelik tekerlek arasından üstyapıya iletilir. Bir dinamik güç jeneratörü de saniyede 8 devirlik bir frekansla 4.45 kN'luk bir kuvvet üretebilmektedir. Defleksiyonlar tekerleklerin arasından boyuna yönde

yerleştirilmiş beş jeofonla ölçülür, aleti Şekil 4.6'da gösterilmiştir (Huang, 1993).



Şekil 4.6. Dynaflect aleti

Dinamik kuvvet, statik kuvvetin üzerine ilave edilir. Kuvvet, merkezden merkeze 500 mm'lik bir mesafede yerleştirilmiş. 400 mm Çaplı lastikle kaplanmış çelik tekerleklerle üstyapıya uygulanır. Jeofonlar arasında da 0.305 m. Lik mesafeler bulunur (Saltan, 1999).

Dynaflect aleti test alanına getirildikten sonra, yükleme tekerlekleri ve transdüserler üstyapı yüzeyine hidrolik olarak indirilir. Test yapılır ve veriler kaydedilir. Bir sonraki test alanı yakında ise, alet 9.6 km/sa'in üzerindeki hızlarla yükleme tekerleklerinin üzerinde hareket ettirilebilir. Son test tamamlandıktan sonra, yükleme tekerlekleri ve transdüserler hidrolik olarak kaldırılır ve kilitlenir. Sabit hacimli ve tekrarlanan yükü bu cihazın esas belirleyicilerdir (Huang, 1993).

Dynaflect aleti avantajları yüksek güven, bakım azalması ve defleksiyon eğrisi ölçmesidir (O'Donnell, 2011).

Dezavantajı ise maksimum limitinde (pikten pike) güç azalmasıdır. Böylece ince kaplamalar için daha uygun olup otoyollar, havaalanı kaplamaları veya ağır trafik yükü altındaki kaplamalar için kullanılmamaktadır (Wu, 2012).

İki kişilik grubun ideal üretim ortalaması günlük 100-400 test arasındadır (Bay vd., 1998).

4.2.1.2.2 Road Rater aleti

Road Rater'in pek çok modeli bulunmaktadır. 10.7-25.8 kN arasında statik ve 2.2-35.6 kN arasındaki dinamik yükleri uygulayabilmektedir. Yükleme frekansı, saniyede 5-100 arasında değişebilmektedir ve hidrolik olarak titreşim uygulayan bir alettir. İlk modeller, araçlar üzerine monte edilmiş, sonraki versiyonlar ise treylere monte edilmiştir (Huang, 1993).

Üstyapı deplasmanları, birisi yük merkezinde ve diğerleri belli uzaklıklarda olan en az iki sensörle ölçülür. Genelde dört adet hız transdüseri defleksiyonu ölçmekte kullanılır. İlk sensör yüklenmiş alanın merkezine yerleştirilir. Diğer üç sensör ise, bir plak üzerine tutturulur. Sensörler 0 mm (0feet), 305 mm (1feet), 610 mm (2 feet), ve 914 mm (3 feet) lik mesafelere yerleştirilmektedir. Bu aleti Şekil 4.7 de gösterilmiştir (Saltan, 1999).



Şekil 4.7. Road Rater aleti

Uygulamalarda, alet test alanına getirilir ve yükleme plağı ve defleksiyon sensörleri üstyapı yüzeyine indirilir. Seçilen yük büyüklüğü ve frekanslarda test tamamlandıktan sonra, yükleme plağı ve sensörler yüzeyden kaldırılır ve alet bir sonraki test alanına doğru harekete hazır duruma getirilir. Bu alet tipinde, hafif modellerde yük seviyesi çok küçük kalmakta, ağır modellerde ise ağır bir statik yük gerekmektedir (Huang, 1993).

Road Rater aleti en yaygın olarak kullanılan modelleri 400 b modeli, 2000 modeli ve 2008 modelidir. Standart yükleme plakları, 4x7 inch ebadında çelik disk şeklindedir. Dinamik kuvvet jeneratörü, bir servo-kontrollü aktüatör ile aşağı yukarı ivmelendirilen bir çelik kütleyi kullanır. Hem yük büyüklüğü hem de frekans operatör tarafından değiştirilebilir. Model 400 b'de 2225-13350 N, model 2000'de 4450-24475 N ve model 2008'de 5340-35600 N dinamik pik yük üretilebilir. Bu tip aletlerdeki teknik problem, dinamik yükün, statik yükün iki katından daha az olmasıdır. Bu da uygulanacak olan statik yükün büyüklüğüne bir sınırlama getirir. Dinamik yük arttıkça statik yük de artırılmalıdır. Bu ön yükün üstyapının gerilme durumunu değiştirdiği ve üstyapıda farklı tepkilere yol açabileceği dikkate alınmalıdır. Ayrıca dynaflect'in uyguladığı yük nispeten düşük kalmaktadır (Saltan, 1999).

Road Rater cihazı defleksiyon eğrisi ölçebilen ve hızlı veri toplama özellikleri olan bir cihazdır dolayısıyla geniş olarak kullanılmaktadır. En önemli dezavantajı ise bu cihazların bazı türleri güç miktarını azaltmaktadır (O'Donnell, 2011). Bu cihazın günlük üretimi 1 ve ya 2 teknikerden oluşan gruplar için 100-400 test/günlük arasındadır (Bay vd., 1998).

4.2.1.2.3. Rolling dinamik deflektometre

Rolling Dinamik Deflektometre (RDD) cihazı kaplamanın durumunu değerlendiren yeni bir cihazdır ve kesikli noktalarda defleksiyon grafiğı yerine sürekli defleksiyon grafiğı vermektedir. Böylece büyük ve istisnai defleksiyonları hızlı ve basit bir şekilde belirtebilmektedir (Huang, 1993). RDD aleti Şekil 4.8'te gösterilmiştir.

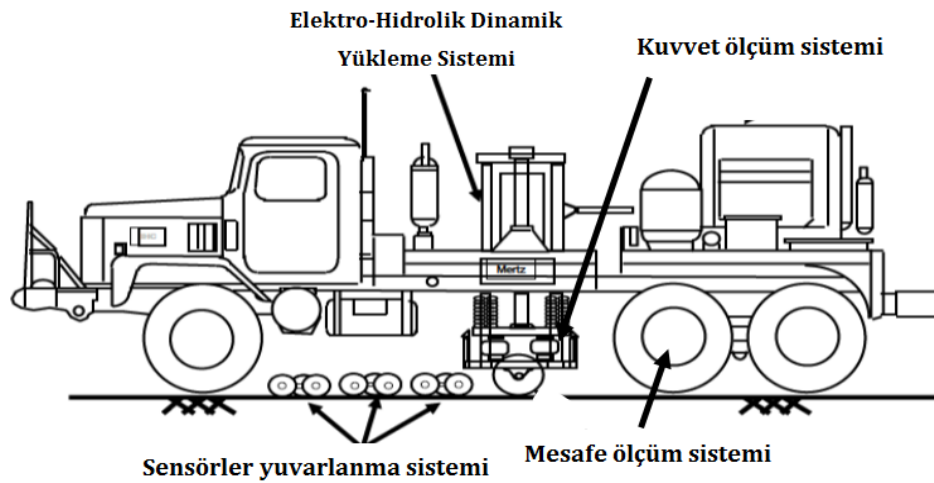


Şekil 4.8. Rolling Dinamik Deflectometer

Bu cihaz kamyonunda taşınabilen bir sistemden ibarettir ve kaplamaya dinamik yük uygulayıp aynı zamanda çeşitli noktalarda kaplamanın reaksiyonun kontrol etmektedir. Bu kamyon sürekli olarak 1.6 km/saat hızıyla hareket etmektedir. Bu cihaz ana bileşenleri şunlardır (Lee ve Stokoe., 2006):

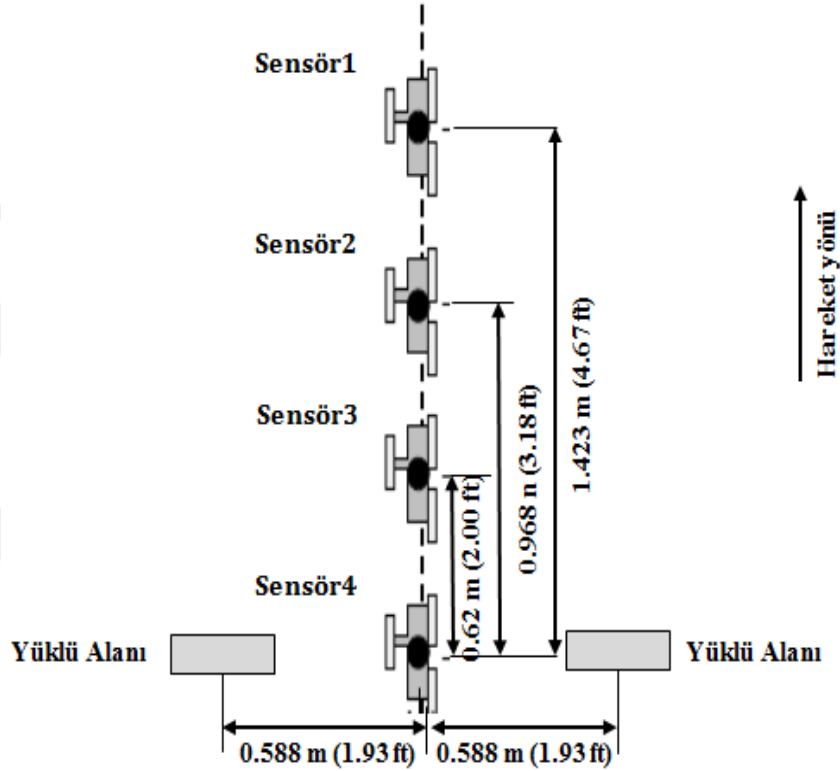
- (1) Bir elektro-hidrolik dinamik yükleme sistemi,
- (2) Bir kuvvet ölçüm sistemi,
- (3) RDD kamyon altında bulunan sensörler yuvarlanma sistemi,
- (4) Mesafe ölçüm sistemi.

Rolling dinamik deflectometer (RDD) ana bileşenleri için şematik gösterim Şekil 4.9'ta sunulmuştur



Şekil 4.9. Rolling Dinamik Deflectometer (RDD) bir şematik gösterimidir

RDD toplam ağırlığı 50 kip(222 kN) dur. Bu cihazdaki hidrolik sistemi, tepeden tepeye 9-310 kN arasında dalgalı dinamik bir kuvvet, 20-100 Hz arasında bir frekans ve aşağı doğru 13-180 kN arasında statik bir kuvvet yaratabilmektedir. Test esnasında kaplama üzerine dinamik ve statik kuvvetleri aynı zamanda uygulanmaktadır, tipik bir yuvarlanma sensör yapılandırması Şekil 4.10'de gösterilmiştir (Lee ve Stokoe, 2006).



Şekil 4.10. RDD'te Tipik bir yuvarlanma sensör

Dinamik ve statik kuvvet poli üretenden yapılan iki yük dönen tekerlekle vasıtasıyla kaplamaya taşımaktadır. Uygulanan kuvvet yükü dönen tekerli ve üst yük plakasının arasındaki 4 yük hücresinin vasıtasıyla ölçülmektedir. Bunun yanında kamyonun altındaki yuvarlak hassas cihazları, dalgalı kuvvetten oluşan dinamik defleksiyonu çeşitli noktalarda ölçmektedir. Bunun sonucunda sürekli defleksiyon grafiği elde edilmektedir (Lee ve Stokoe, 2006).

RDD cihazı rijit kaplamalarda en çok kullanılandır. Aynı zamanda hızlı ve tüm kaplamanın özelliklerini verebilmektedir. Ayrıca teknikerler büyük değerlendirmelerde araçların hızına benzer cihazlarını (55 km/saat) tercih

ettikleri için bu cihazı hızlı olmadığından (1.5 km/saat günümüzde hızı 5 km/saat olacak şekilde geliştirilmiştir) fazla kullanılmamaktadır (Flintsch vd., 2010).

RDD cihazı kaplamalarda kritik bölgelerdeki tahmini yükü temsil etmemekte ve kaplama boyunca uygulanmamaktadır. 1988 yılında Texas Austin Üniversitesi mühendislik fakültesi tarafından bir Vibrolu kamyonu (Vibroseis truck) geliştirilmiştir. Kamyon hareketin esnasında dinamik kuvvet kaplamaya uygulanabilmektedir (Bay vd., 1998).

Rolling dinamik deflectometer cihazından elde edilen sürekli defleksiyon grafiği şöyle kullanır (Phares vd., 2008):

1. Kaplamanın sertliğini değerlendirmektedir;
2. Sertliğin oranı çeşitli bölgelerde ayırmaktadır;
3. Çatlaklar, derzler ve zayıf bölgeleri bilinmektedir;
4. Derzlerin, çatlakların performansı değerlendirmektedir;
5. Ek test yapılması gereken bölgeleri ve çatlaklar bilinmektedir.

4.2.1.3. Ani çarpma yükleme yapan aletler

Bütün tipleri geçmekte olan bir kuvvet etkisini üstyapı yüzeyine iletir. Ağırlık miktarını ve düşüş yüksekliğini değiştirerek farklı ani çarpma kuvvetleri oluşturulabilir. Böyle düşen ağırlık Deflektometre FWD çeşitli olarak, bu kategoride yer almaktadır. Türleri, çalışması, diğer bilgileri FWD cihazları için beşinci bölümde açıklayacağız. FWD cihazlarında, kullanılan tiplere göre 1360-22700 kg arasındaki yüklerin ağırlığını uygulanabilmektedir. Kaplamanın yüzeyine inen asansörlere takılan jeofonlar vasıtasıyla defleksiyonları ölçmektedir (Huang, 1993).

Yük büyüklüğü, yük plakasının merkezinde yer alan bir yük hücresi ile ölçülmektedir. Yük plakasının merkezinde ve yük plakasından çeşitli uzaklıklarda üretilen defleksiyon, 1 μ m çözünürlüğe ve artı eksi yüzde 2 μ m kesinliğe sahip dönüştürücüler ile ölçülmektedir. Yük hücresi ve defleksiyon

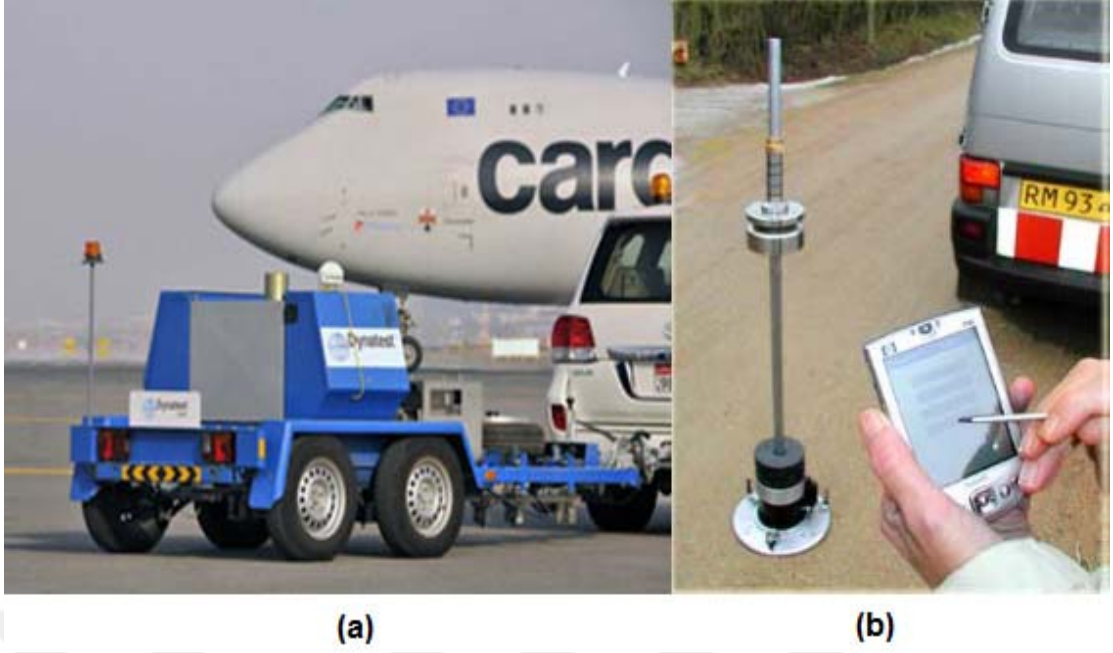
dönüştürücüler ile ölçülen veriler, çekici araç içerisinde bulunan bir bilgisayar tarafından kaydedilmektedir (Hall vd., 2001). Alet Şekil 4.11’de gösterilmiştir.



Şekil 4.11.Düşen Ağırlıklı Deflektometre aleti

Havaalanı kaplamasını değerlendirmek için Yüksek Ağırlık Deflektometresi (High Weight Deflectometer HWD) cihazı kullanılmaktadır, çünkü ağır yüklerin benzeşmesini sağlamaktadır. Bu cihaz, FWD cihazının test prosedürü ve verilerin analiz sistemine benzer olarak kullanılmaktadır. Fakat kaplamanın üzerinde yüksek yükün kapasitesi (30-240 kN arasındadır) uygulanabilmektedir (Al-Qadi vd., 2011).

Hafif Ağırlık Deflektometresi cihazı (Light Weight Deflectometer LWD), FWD cihazlarında en hafif ve taşınabilen modelidir ve genel olarak bağlanmamış kaplama malzemelerini testlerinde kullanılmaktadır ve cihaz hafif olduğu için FWD cihazına göre daha az derinlerde etkilemektedir. Bu yüzden tek tabaka yapısal değerlendirmede idealdir (Al-Qadi vd., 2011). Yüksek Ağırlık Deflektometresi aleti ve Hafif ağırlık deflektometresi cihazı Şekil 4.12’de gösterilmiştir.



Şekil 4.12.a) Yüksek ağırlık deflektometresi cihazı (HWD), b) Hafif ağırlık deflektometresi cihazı (LWD)

Defleksiyon testi, bir proje kapsamındaki kaplama dayanımının değişkenliğini ölçmek, kaplamanın yapısal yeterliliğini değerlendirmek, kaplama tabakalarının her birinde yerinde modülü belirlemek ve esnek kaplamaları için yüklemeye karşı kaplamanın tepkisini karakterize ederek kalan ömrünü belirlemek için kullanılan kaplama NDT yönteminin sık görülen bir türüdür. Rijit kaplamalar, FWD testleri, beton elastik modülü ve taban zemini tepki modülünü (beton plak merkezinde), boşluk tespiti ve çatlak ve derzlerin yük transferi verimliliğini belirlemek için kullanılmaktadır. Tabaka özellikleri, statik yük analitik prosedürleri ve dinamik defleksiyon verilerine uygulanan deneysel performans ilişkileri kullanılarak hesaplanmıştır (Gramajo, 2005).

Ani çarpma yüklemesi yapan aletin temel avantajı, hareket eden bir tekerleğin hem büyüklüğünü hem de yükleme süresini doğru olarak modelleyebilmesi ve statik yükleme kıyaslama yapmaya yardımcı olabilmesidir (Saltan, 1999).

Bu cihaz yüksek üretim verimliliği, gerçek yük seviyeleri, hızlı veri toplaması ve defleksiyon eğrisi ölçebilmektedir. Yalnız geri hesaplaması (Backcalculation)

kullanılabilmektedir. RWD sorunlu zemin kesitlerini belirlemek için uygun bir araçtır. Böylece bir araştırmacı daha detaylı bir analiz için FWD ile yeniden değerlendirme yapabilir (Serin, 2014).

Sürekli defleksiyon ölçüm cihazlarının bir diğer örneği de Teksas'ta geliştirilen dalgalı dinamik deflektometredir (RDD). RDD zemine özel tasarlanmış yük tekerlekleriyle geniş sinusoidal dinamik kuvvetler uygulamaktadır. Ortaya çıkan defleksiyonlar, sert zemin yüzeylerin meydana getirdiği gürültünün etkilerini azaltmak için tasarlanan dalgalı sensörlerle eş zamanlı olarak ölçülmektedir. Mesafe ölçüm ve veri elde etme sistemleri zemine uygulanan yükleri ve ortaya çıkan dinamik verileri belirlemek için tasarlanmıştır. Bu sistemler ayrıca RDD'nin pozisyonunu takip etmektedir. Ancak, RDD araştırmaları yalnızca 2,4 km/s'e kadar olan hızlarda gerçekleştirilebilmektedir (Al-Qadi vd., 2011).

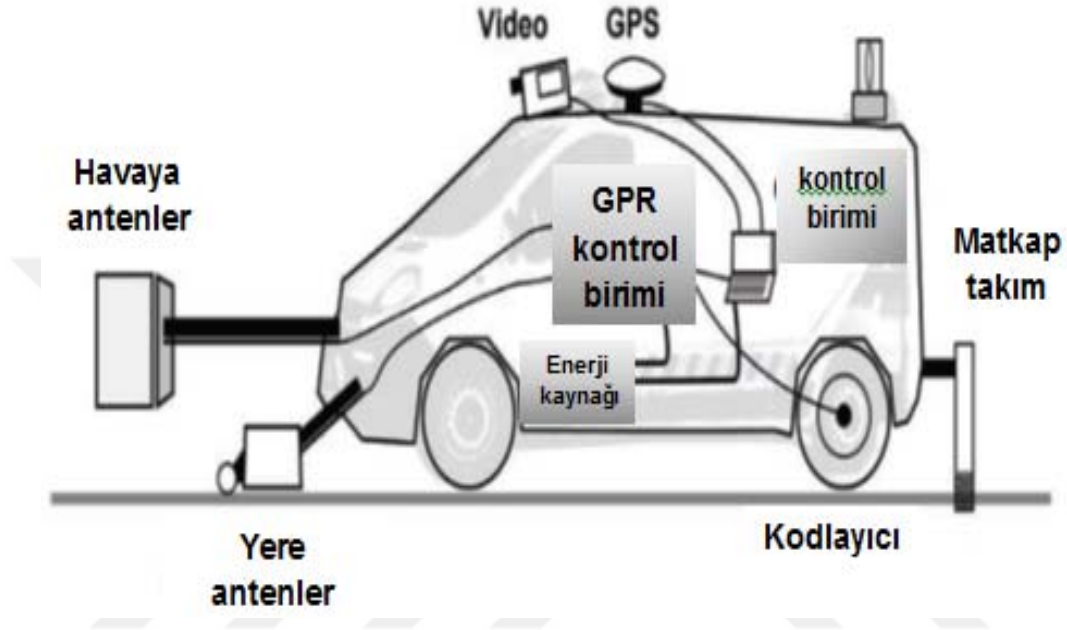
4.2.2. Elektromanyetik yöntemler

Elektromanyetik yöntemler teknolojik açıdan en güvenilir yöntemlerdendir ve üstyapı kalitesini belirlemede yaygın olarak kullanılmaktadır. Elektrikli empedans, elektromanyetik dalgalar, manyetik rezonans ve infrared termograf örnek olarak verilebilir. Ayrıca GPR metodu da bu kategoriye aittir (Al-Qadi vd., 2011).

4.2.2.1. Zemin penetrasyon radarı (GPR)

İlk olarak 1960'larda geliştirilmiş olan GPR, 1970'lerin sonlarından beri karayolu üstyapı değerlendirme deney aleti olarak kullanılmaktadır. Genellikle üstyapı tabaka kalınlıklarının ölçülmesinde (ASTM D4748), üstyapıdaki yapısal değişimlerin ve anormalliklerin yerlerinin belirlenmesinde, beton plaklar altındaki boşlukların bulunmasında, beton üstyapılarda birleşim yerlerindeki öngerme ve tutturmaların yerlerinin belirlenmesinde ve asfalt üstyapılardaki nemin verdiği zararın belirlenmesinde kullanılmaktadır (Serin, 2014).

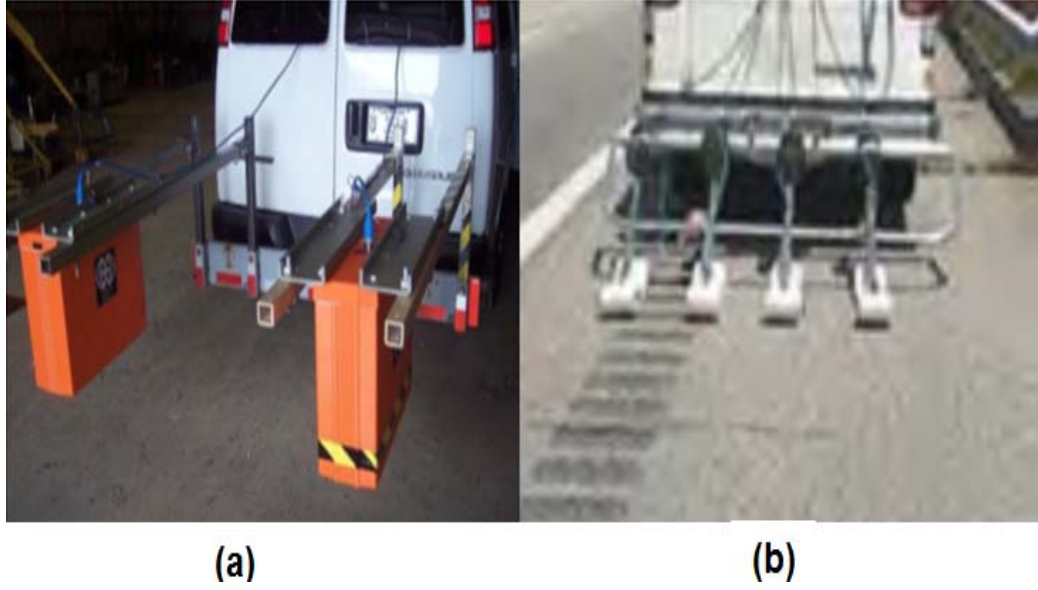
GPR sistemi tipik olarak bir adet anten, bir adet veri dönüşüm sistemi, bir mesafe ölçüm aparatı ve tüm bunların montajı ve inceleme yapılabilmesi için gerekli otomobil ya da her hangi bir araç ve ayrıca bir de opsiyonel GPS'ten oluşmaktadır(Al-Qadi vd., 2011). Zemin penetrasyon radarı temsil eden Şekil 4.14'te görülmektedir.



Şekil 4.14. Arazi aracına monte edilmiş GPR sistemi

GPR cihazı antenlerin dağıtılmasına ve yayılmasına göre 2 grupta sınıflandırılmaktadır. Biri havaya bağlı (serbest) diğeri ise yere bağlıdır. Havaya bağlı olan antenler Şekil 4.15.a'da gösterilmiştir: genel olarak yerden 15-20 cm uzaklıkta koyulmaktadır ve hızlı testler (100 km/saat) yapılmasını sağlamaktadır. Dezavantajı ise dalgaların derinliği azalmaktadır (bu sıkıntıyı 500 MHz frekanslı antenlerle çözülmüştür), ikinci dezavantajı ise em enerjinin bir kısmı kaplama yüzeyinden yansıtılmaktadır (Al-Qadi vd., 2010).

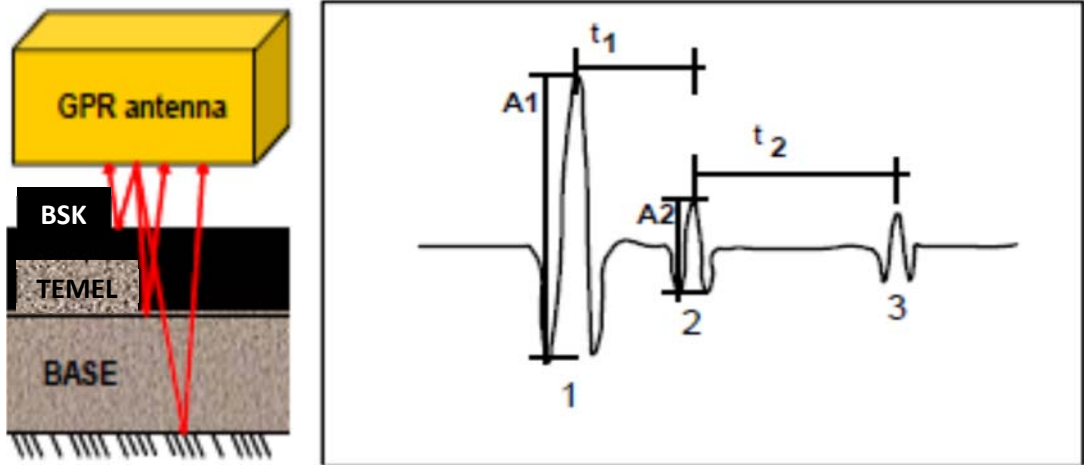
Zemine bağlı olan antenler Şekil 4.15.b'de gösterilmiştir: bu sistem tam olarak yere bağlı olmaktadır, dolayısıyla aynı frekansta daha derin olarak dalgaların girmesini sağlamaktadır. Yalnız tarama hızını düşürmektedir(8 km/saat). Bu nedenle kaplamanın yoğunluğu ve kalınlığını ölçmek için havaya bağlı antenler kullanılmaktadır (Al-Qadi vd., 2010).



Şekil 4.15. Zemin penetrasyon radarı, a) Havaya bağı olan antenler GPR, b)Zemine bağı olan antenler GPR (Al-Qadi vd., 2010)

GPR sisteminin temel bileşeni antenlerdir. Bunlar sinyalleri iletmek, ulaştırmak veya her ikisini de gerçekleştirmek için kullanılabilirler. Aynı anten hem sinyalin aktarımı hem de geri ulaştırılması için de kullanılabilir. Bu şekilde kullanılan GPR sistemler mono statik sistemler olarak adlandırılır. Fakat bir anten sinyalin iletimi diğer anten sinyalinin tekrar geri aktarımı için kullanılıyorsa bunlara bistatik sistemler denilmektedir. Eğer tek bir anten veya çoklu bir grup anten sinyalin aktarımı ve çoklu bir diğer anten grubu da sinyalin geri toplanması için kullanılıyorsa buna da multistatik sistem denilmektedir (Al-Qadi vd., 2011).

Çalışmanın prensibi, yansıyan dalgalar taşınan dalgaların bir kısmıdır, ara yüzeye çarptıktan sonra yüzeye yansımaktadır. Diğer kısımlar ise yansımayıp tabaka sınıra girip malzemelerde yayılmaktadır. Diğer tabaka sınırlara vardığında yeniden bu dalgaların bir kısmı yansımaktadır. Böylece yansıtılan dalgaların antene varması için aldığı süreç malzemelerin sabit veya tamponlu sınırın derinliğini ifade etmektedir (Graveen, 2001). GPR çalışma prensibi Şekil 4.16'da gösterilmiştir.



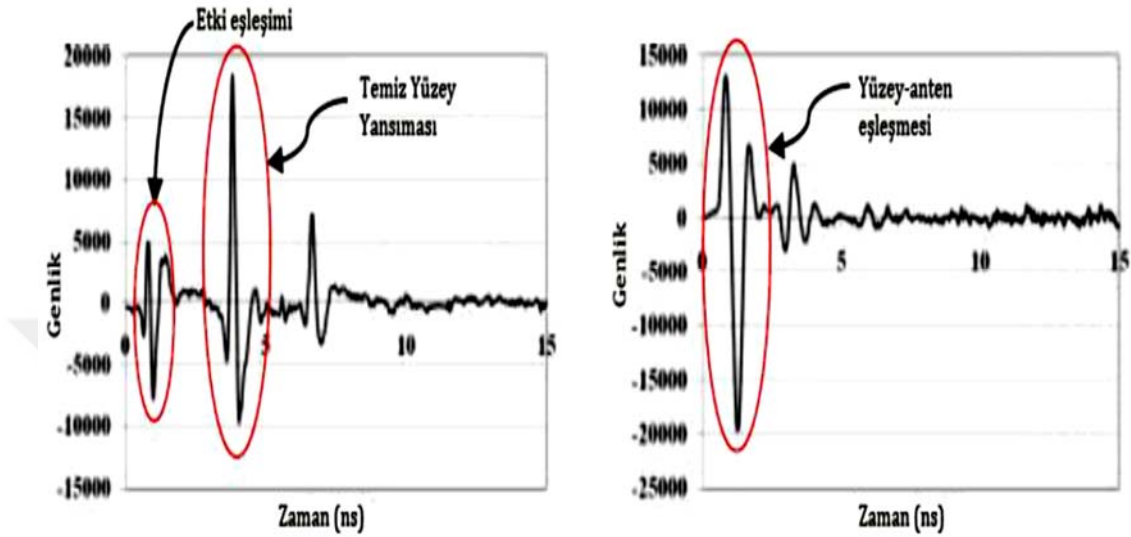
Şekil 4.16. Temel prensip GPR tekniği, t_1 BSK tabakasında taşınma süresi, t_2 temel tabakasında taşınma süresi, A_1 BSK yansıma genliği, A_2 temelden yansıma genliği.

Kaplamanın kalınlığını belirtmesi için iki yöntem kullanılabilmektedir. Birinci yöntem her testin yerinde kaplamanın sabit ve tamponlu oranın hesaplanmasıyla gerçekleşmektedir. Böylece kaplamanın kalınlığı hesaplanıp, taşınma süreci(dalganın kaplamaya girip çıkması için aldığı süredir) ölçülebilmektedir. İkinci yöntem ise kaplamanın kalınlığı ve taşınma sürecinin arasındaki dengeyi belirtilmesidir. Bunu da testinin belirli noktalarda karot ile ölçülmektedir. Ölçülen kalınlık ve taşınma süreci dengenin grafiği çizebilmek için kullanılmaktadır. Bu grafikten kaplama kalınlığı testin her bölgesi için belirlenebilmektedir (Graveen, 2001).

GPR teknolojisinin tercih edilmesindeki en büyük avantaj devam edilen profil boyunca dielektrik katsayılar yardımıyla çok hızlı bir şekilde veri toplayabiliyor olmasıdır. Bu sistem de çifti problemleri vardır ilk olarak, radar nüfuz azalır, çünkü enerjinin büyük bir yüzdesi yerine kaplama içine nüfuz kaplama yüzeyinde yansıtılır. İkinci ise, istenmeyen anten hareketi yüksek hızda veri toplama sırasında yüzey pürüzlülüğü neden olabilir (Al-Qadi vd., 2011).

Zemine bağlı sistemlerde yansıtılan ve gönderilen dalgaların birbirine girmesi bir dezavantajdır; bu olayın adı yüzey eşleştirmedir. Bu eşleştirme tam istenilen zamanı bulmasını zorlaştırır Şekil 4.17’de GPR ölçümleri ile elde edilmiş antenlere ait genlik zaman grafikleri görülmektedir. Bu sistem fiyat ve

performans konusunda etkilidir, yalnız verilerin açıklanması güvenilen sonuçları (derzlerin bozulması ve kaplamanın yapısal değişmelerinin değerlendirilmesi) alabilmek için uzmanlık ister, aynı zamanda nemin kaplamaya dalgaların girmesine çok büyük etki göstermektedir (Wu, 2012).



Şekil 4.17. Antenlere ait genlik zaman grafikleri

4.2.2.2. Nükleer elektromanyetik yöntemler (NYÖ)

Son kırk yıldır nükleer ölçüm teknikleri BSK'ların sıkışma kontrolleri için tercih edilen tahribatsız yöntemlerden biri haline gelmiştir. Birçok müteahhitlik ve yüklenici firma bu yöntemi karot örnekleri ile yoğunluk tayininde olduğu kadar detaylı işleme gerek duymadığı için kullanmayı tercih etmektedir. İlk olarak 1954 yılında California'da bölünmüş yol yapım çalışmaları sırasında nükleer yöntemlerin kullanıldığı bilinmektedir. O dönemde nükleer yöntemler öncelikli olarak zeminin yoğunluğunu ve su muhtevasını tespit etmek için kullanılmıştır. Daha sonraki dönemlerde ise nükleer yöntemler esnek ve beton üstyapıların yoğunluk tespitinde de kullanılmaya başlanmıştır. Nükleer yöntemlerin esnek üstyapılarda kullanıldığına dair ilk kayıtlar ise 1964'lü yıllara dayanmaktadır (Padlo vd., 2005). Nükleer elektromanyetik cihazı Şekil 4.18'te gösterilmiştir.



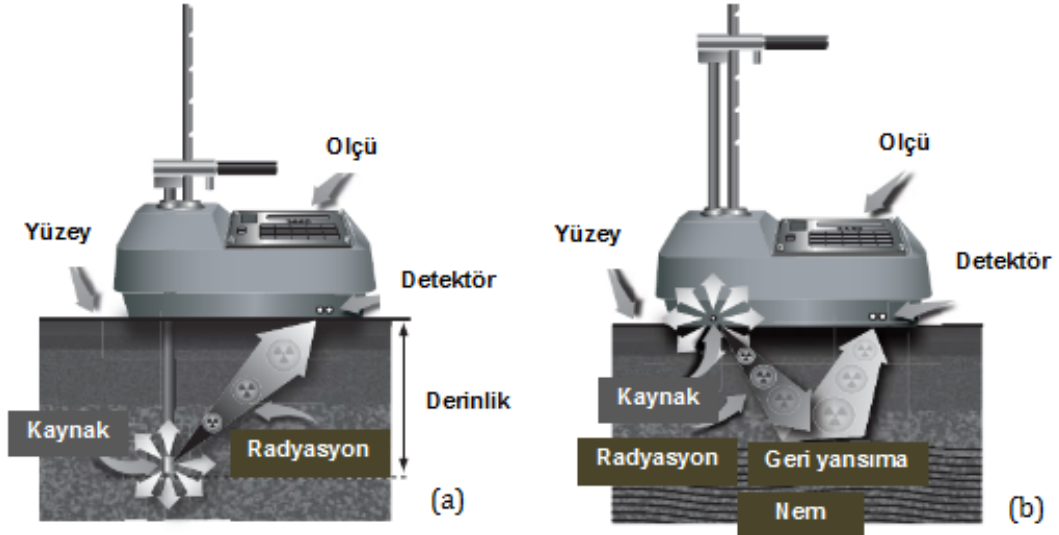
Şekil 4.18. Üstyapıda nükleer yoğunluk ölçümü (Williams, 2008)

Nükleer yöntemler yoğunluk ölçümü için radyoaktif kaynaktan gama ışınları yayarlar. Yayılan ışının sıkıştırılmış malzemeden geçmesi ve diğer değişkenlerle birleştirilen sistemlerin değeri yoğunluğun okunmasında kullanılır. Araştırma gruplarının raporlarında, asfalt kaplamaların nükleer okumalarında ASTM d2950 standardı vb. kullanıldığı belirtilmektedir (Serin, 2014)

Nükleer cihazının malzeme özelliklerini ölçebilmesi için iki tipi vardır. Biri direkt taşıma diğeri ise geri yansıma yöntemidir.

Direkt taşıma geri yansıma yöntemine göre daha doğrudur ve kaplamanın yapısal değerlendirmesinde az hata vermektedir. Yoğunluk ölçmek için tüpe çubuk koyulup daha önce yapılmış bir delikten sokarak kaynak ölçerin tabandaki var olan detektöre dalgaları taşınmaktadır ve kalınlığı detektördeki okunan değerine göre belirtilmektedir (Şekil 4.19. a) (Canada, 2007).

Geri yansıma yönteminde ise deliğe ihtiyaç kalmaz çünkü hem kaynak hem de detektör kaplamanın yüzeyinde durmaktadır. Kaplamaya dalgaları gönderilip bazı dalgaları dağılıp detektöre yüzey malzemeleri ile geri dönmektedir. Bu yöntemle nem içeriği nitronlu kaynak vasıtasıyla ölçüp malzemenin yoğunluğu gama kaynaklarıyla ölçebilmektedir (Şekil 4.19.b) (Canada, 2007).



Şekil 4.19. Nükleer yoğunluk ölçümü, a) Direkt taşıma yöntemi, b) geri yansımaya yöntemi

Nükleer yoğunlukölçerlerin çok iyi kalibre edilmemesi ve ekipmanın çevreden etkilenmesi, malzemelerin iyi belirlenmemiş karışım durumları, yüzey dokusu, agrega tipi, sıcaklık ve su içeriği gibi etmenler BSK'ların yoğunluk değerlerinde hatalı sonuçlar çıkarmamıza sebep olabilmektedir (Padlo vd., 2005).

Nükleer yoğunlukölçerler aynı malzemeyle üretilmiş karot örneklerinin yoğunluk verileri ile kalibre edilmelidir. Genellikle nükleer cihazların kalibrasyonu yoğunluğu bilinen hazır yoğunluk blokları ile ilişki kurularak gerçekleştirilmektedir. Fakat yoğunluk kalibrasyonu birçok etmenden dolayı değişiklik gösterebilmektedir. Bu nedenle bu etmenler göz önünde bulundurulmalıdır (Padlo vd., 2005).

4.2.2.3. Nükleer olmayan elektromanyetik yöntemler (PQI)

Yoğunlukölçerinin ilk tipi 1998 yılında tansık firmasının tarafından geliştirilmiş aynı zamanda (Pavement Quality Indicator) PQI cihazı olarak ilk kez icat edilmiştir. Bu tip cihazda nem içeriği ölçen sistemi içermemektedir. Bu yüzden doğrulukta problem yaratmıştır ve genel olarak bu tip cihazların kullanılması tercih edilmemektedir (Williams, 2008).

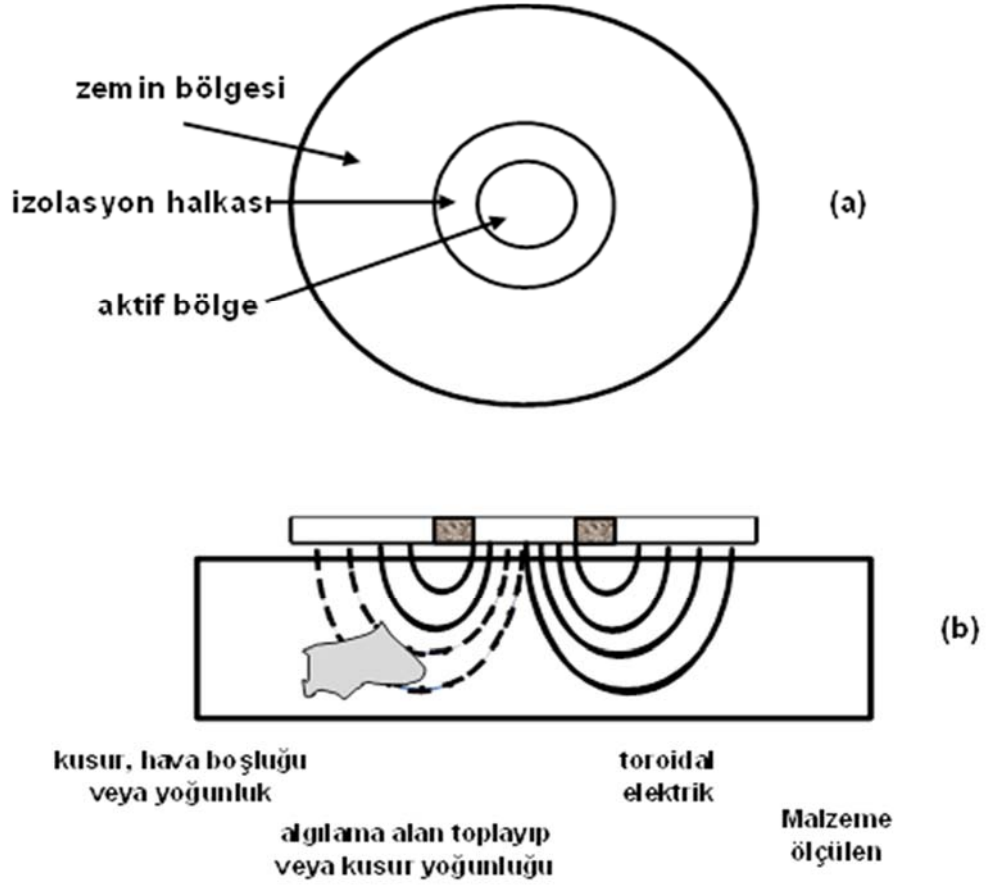
PQI 200 cihazı hem sıcaklık hem de nem ölçebildiği için sonuçları daha doğrudur. PQI cihazlarını iyileştirmek amacıyla PQI 300, PQI 301, PQI 302 ve PQI 303 üretilip tabakanın türünü ve kalınlığını belirtme ayarları eklenmiştir. Aynı zamanda cihazın algoritması güncellenmiştir (Williams, 2008). PQI 301 Şekil 4.20’de görülmektedir.



Şekil 4.20. PQI deney aleti

Bu cihazın esas görevi inşaat esnasında kütle yoğunluğunu ve yoğunluğunun planlanmasını, boylamsal derzlerin yoğunluğunun testi yapıp sıkıştırılmış kaplamada izolasyon miktarını bildirtmesidir (Williams, 2008).

Yoğunluk, PQI cihazıyla elektrik akışı kaplamaya gönderilmesi sonucu elektro mıknatıslı alandaki değişmeler ile ölçülmektedir. Özellikle elektrik akışı gönderenden geçip tomponlu halkası etrafında kaplamanın vasıtasıyla yoğunlaşıp alınan tarafından bulunmaktadır. Elektrik akışının mukavemeti ölçülüp sabit tomponlu belirlenmesinde kullanılmaktadır. Bu yöntemin bir şematik Şekil 4.21’de gösterilmiştir (Williams, 2008).



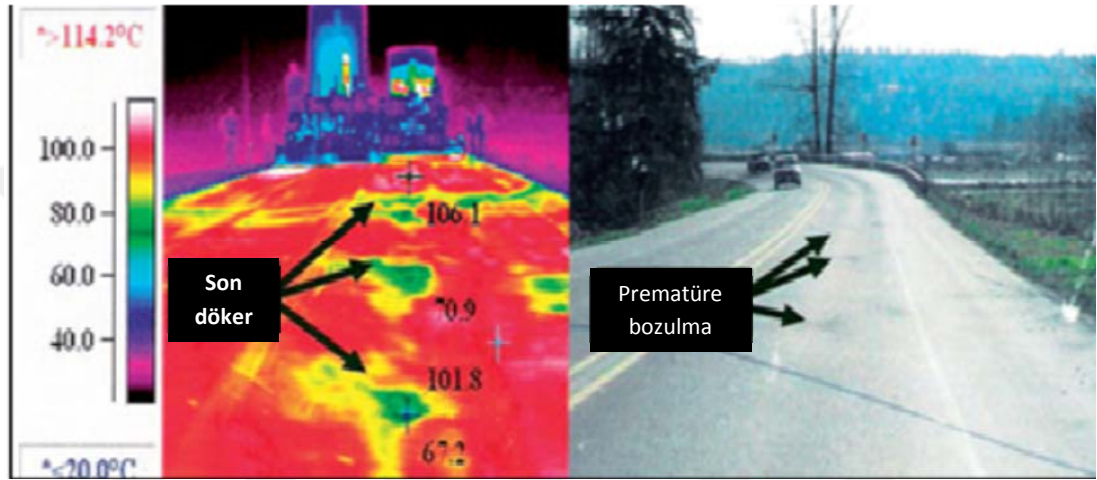
Şekil 4.21. Şematik nükleer olmayan cihazı, a) algılama baş plakası (alttan görünüm), b) algılama baş plakası (yandan görünüm).

PQI nükleer yöntemle alternatif olarak ortaya çıkmıştır. Nükleer olmayan elektromanyetik yoğunlukölçer (pavement quality indicator (PQI)) asfalt kaplamaların hızlı, hassas yoğunluk ölçümleri için geliştirilmiş bir yöntemdir. Nükleer kaynağa sahip olmaması nedeniyle lisans ve güvenlik harcamalarını azaltmakta, kullanıcı ve çevre güvenliğini ön planda tutmaktadır. Üç saniye gibi kısa bir sürede hassas ölçümler üstyapı üzerinde tahribatsız olarak gerçekleştirilebilmektedir. Bu sayede kaplama sıcaklığı ve nem seviye tespiti yapılabilmektedir. Hafif, kompakt ve portatif olması arazi çalışmaları esnasında kolaylıklar sağlamaktadır (Serin, 2014).

4.2.2.4. İnfrared tomografi yöntemi

İnfrared tomografi, bir malzeme yüzeyinin termal konturlarla haritalanmasıyla oluşur. Bu teknolojiye termal renk haritasında sıcak veya soğuk bölgeler olarak

görülen kusur ve süreksizliklerin tanınması (örneğin, bir AC malzemesindeki düşük ya da yüksek yoğunluk alanları) baz alınmıştır. Bu nedenle, bir anormalliğin termografiyle algılanabilmesi için, anormalliğin atipik bir sıcaklık veya nesnenin yüzey sıcaklığında bir farklılık yaratması gerekir. Şekil 4.22’de bir karayolunun bozulmuş ve bozulmamış bir bölümünde termografi görüntülerini göstermektedir. Bu görüntülerde, parlak renk sıcak nesneyi, koyu renk ise soğuk nesneyi göstermektedir (Al-Qadi vd., 2011).



Şekil 4.22. Optik (sağ) ve infrared (sol) olarak alınmış resimler, bozulmamış karayolunun parlak renk ifade dilmektedir, bozulmuş karayolunun ise koyu renk ifade dilmektedir.

Çeşitli saha koşulları bu yöntemin esas dezavantajı sayılmaktadır. Özellikle önemli dezavantaj olarak görülebilen çevre koşullarına; örnek olarak (test zamanı, bulutlu hava, rüzgar, güneş ışığı, nem ve buzların nüfuzu) verilebilir. Bu örneklerin hepsi testlerin sonuçlarını etkileyebilmektedir (Wu, 2012).

4.2.2.5. Lazerli profil yöntemi

Bu yöntem profil kriterleri olarak, havaalanı üstyapısının sertliği, sürüş konforu ve asfalt üstyapıların ısınma ölçüsünün değerlendirilmesi için kullanılır. Profil çıkarma kriterlerinde temaslı ve temassız olmak üzere iki tip olarak kullanılır. Genellikle lazer sensörleri ile uygulanan nispeten yüksek inceleme hızı ile temassız profillemeye türü, temaslı tipe oranla belirgin bir avantaja sahiptir. Boyuna profil ölçümü için, yüksek hızlı lazer cihazları genellikle yol üzerinde

her tekerlek için 50 mm aralıklarla monte edilir. Isınma ölçümü için, en az 11 lazerin 3 m'lik (9 ft) enine profile yerleştirilerek kullanılması önerilmektedir (Al-Qadi vd., 2011). Lazerlerin aracı ve sensörleri Şekil 4.23'te gösterilmiştir.



Şekil 4.23. Lazerlerin aracı ve sensörleri

Bu yöntemin özelliği mekanik değildir ve hızlı sonuç alabilmesidir. Yalnız doğruluk geleneksel ultrasonik dalgalarından daha azdır. Bu yüzden bu yöntem yerli değerlendirmede uygulanmamaktadır (Harold vd., 2008).

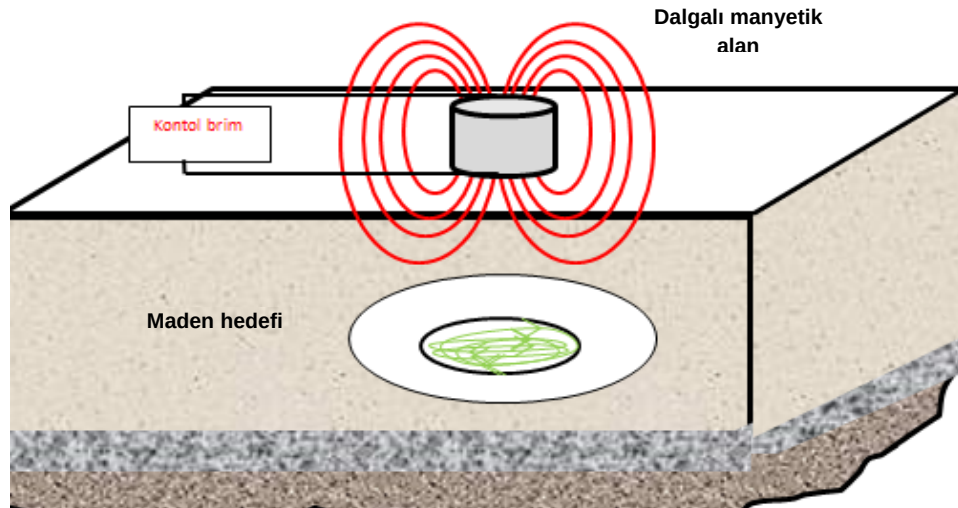
4.2.2.6. Manyetik görüntüleme teknikleri

Manyetik görüntüleme araçları belirli yerde manyetik alanı göndererek ve keşfederek çalışmaktadır. Yani bölgeyi ışıksal taramasıyla manyetik malzemeleri çekebilmektedir. Bu cihaz Avrupa ülkelerinde kullanılmıştır, son yıllarda ABD ülkelerinde de kullanılmıştır. Manyetik görüntüleme teknolojisi ağırlıklı olarak beton yollarda donatının konumunu ve tabaka kalınlığını tespit etmek için kullanılmaktadır. Kaplama kalınlığı hesaplamasında da kullanılmıştır, bunun yanında hem rijit hem de esnek kaplamalar için kullanılabilir(Harold vd.,2008). Manyetik görüntüleme aleti (MIT-SCAN-T türü) Şekil 4.24'te gösterilmiştir.



Şekil 4.24. Manyetik görüntüleme deney aleti

Şekil 4.25'te gösterildiği gibi, cihaza monte edilmiş bobin önceden yerleştirilen metal reflektör yüzeyinde girdap şeklinde akım indükleyen bir manyetik alan darbesi (şoku) oluşturur. Cihazdaki elektro-manyetik sensörler reflektörde oluşan girdap şeklindeki akımın neden olduğu manyetik alan yoğunluğunu (şiddetini) ölçer. Beton elemanlar manyetik alanlar üzerinde hiçbir etkiye sahip olmadığından, bu dairesel akım yaklaşımı beton malzemelerin kalınlığından dolayı oluşan sapmaları ortadan kaldırır (Al-Qadi vd., 2011).



Şekil 4.25. Manyetik görüntüleme deney aleti

Güvenli sonuçları elde etmek için tarama yapılacak bölgenin yüzeyinin kesiti madenli maddeleri içermemelidir. Bu testin standartları Almanya'da

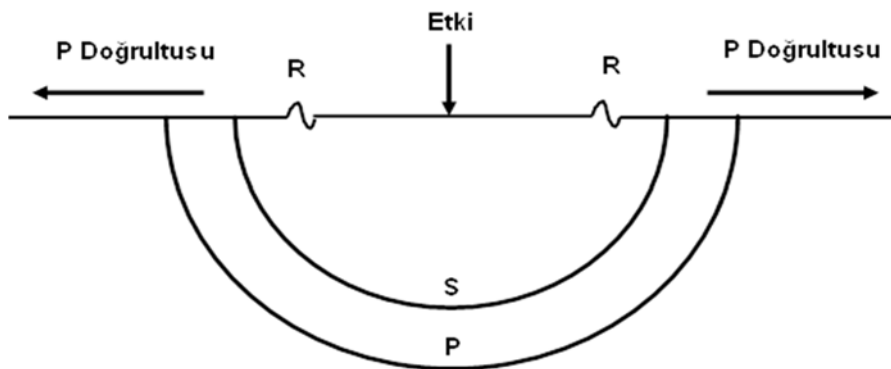
yapılmıştır (specification TPD STB 99), ve cihazının kullanım esnasında belirli koşulları gerekmektedir. Örneğin reflektörlerin arasındaki minimum sınırları olmalıdır (Harold vd., 2008):

- Kenardan kenara mesafesi: 1,6 ft (0.5 m) dir
- Oto korkulukların mesafesi: 3,3 ft (1 m) dir
- Park araçlara mesafesi: 6,6 ft (2 m) dir
- Sıcaklığının ölçülmesi: 23 - 112 °f (-5 - 50 °c) dir

4.2.3. Gerilme dalga yöntemleri

Gerilme dalgaları NDT'nin başka yöntemidir. Kaplamanın yapısal durumunu değerlendirilmesi için kullanılan bir yöntemdir ve gerilme dalgası mekanik dalgadır. Bu dalga esnek veya viskozitesi yüksek olan maddelerde disorderli gerilmeden dolayı yayılmaktadır. Kaplamanın özellikleri (kalınlık, sertlik ve diğer) çeşitli cihazlarından(disorder çekişleri, transformatör vb.) oluşan gerilmenin disordere karşı gösterdiği reaksiyondan oluşmaktadır (Al-Qadi vd., 2011).

Gerilmeler sıkıştırma dalgaları olarak da bilinen genişleme dalgaları halinde (P dalgaları), kayma dalgaları olarak bilinen burulma dalgaları (S dalgaları), ve yüzey dalgaları olarak bilinen rayleigh dalgaları (R dalgaları) halinde yayılır. Şekil 4.26'da gösterildiği gibi, P-dalgası ve S-dalgası malzeme içine doğru giderken R-dalgaları ise yüzey boyunca ilerlemektedir (Graveen, 2001).



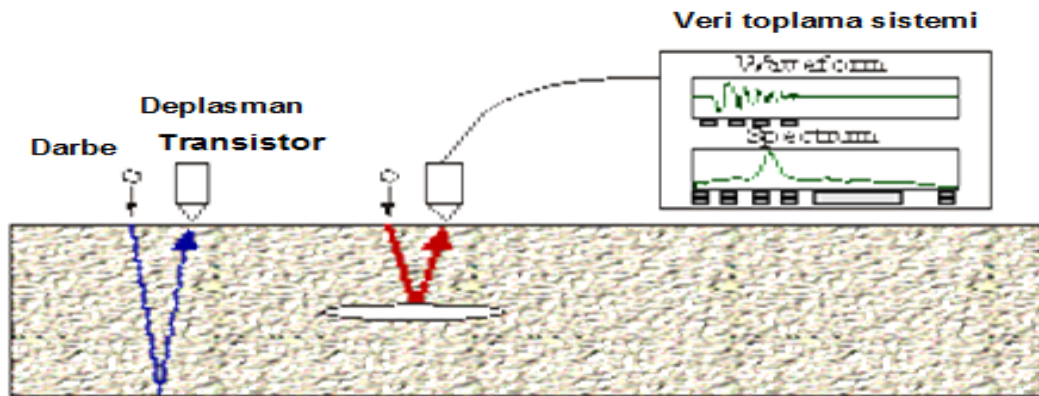
Şekil 4.26. Gerilme dalgaları

P ve S dalgaları üst tabaka ile altındaki zemin arasındaki sınırdan ya da iç boşluklar veya kusurlar arasındaki bir arayüzle karşılaştığında, dalgaların bir bölümü arayüzden yansır ve bir kısmı da kırılır. Yansıyan ve kırılan dalgaların genlikleri, arayüzdeki her iki malzemeye ve geliş açısındaki akustik empedans (dalga hızı ve yoğunluk) farklılıklarına bağlıdır. Ayrıca, gerilme dalgalarının enerjisi, harç-agrega arayüzlerindeki yansıma ve kırılmadan kaynaklı olarak dalgayı emme ve ayrışma nedeniyle zayıflatacağından yol uzunluğu arttıkça azalır. Bu nedenle, dalga ne kadar düşük frekanslı olursa (uzun dalga boyu), dalga enerjisinde o kadar az zayıflama olur (Graveen vd., 2001).

Bu yöntem BSK karışımının adezyon kuvvet, tabaka kalınlığı ve bileşiklerini, esnek kaplamanın çeşitli derinliklerinde nem oluşan zararları, maddelerin ve yapıların esneklik faktörünü ve yorulma nedeniyle maddelerin bozulmasını belirlemede kullanılmaktadır (Harold, 2008).

4.2.3.1. Darbe-yankı yöntemi (Impact- Echo IE /Pulse Echo PE)

Şekil 4.27'de görüldüğü gibi, IE/PE testinde, bir vurma ya da bir ultrasonik darbe ile üstyapı yüzeyinde gerilme dalgaları oluşturulur. Dalgaların üstyapıda yankılanmasıyla katman arayüzü, boşluk ve çatlak gibi homojensizliklerin tam konumları tespit edilir. Yansıyan cisim dalgalarının süre verilerinden frekans spektrumu elde edilir. Frekans verileri için de belirlenen frekans pikleri alıcının mesafesini hesaplamak için kullanılabilir (Hill vd., 2000).



Şekil 4.27. IE testi için tasarım örneği

Bu aletler 1980 yılında Cornell Üniversitesi tarafından geliştirilmiştir. Aletlerin avantajlarından biri; test olacak kaplama tek taraflı olsa bile testi uygulayabildiği gibi yalnız basit geometrik yapılarda var olan kusurun da derinliğini belirleyebilir. Bu yöntem NDT testlerinde beton içyapısının değerlendirilmesinde en çok kullanılan ve başarı göster yöntemdir (Harold, 2008). Darbe-yankı cihazı Şekil 4.28'te gösterilmiştir.



Şekil 4.28. Darbe-yankı cihazı

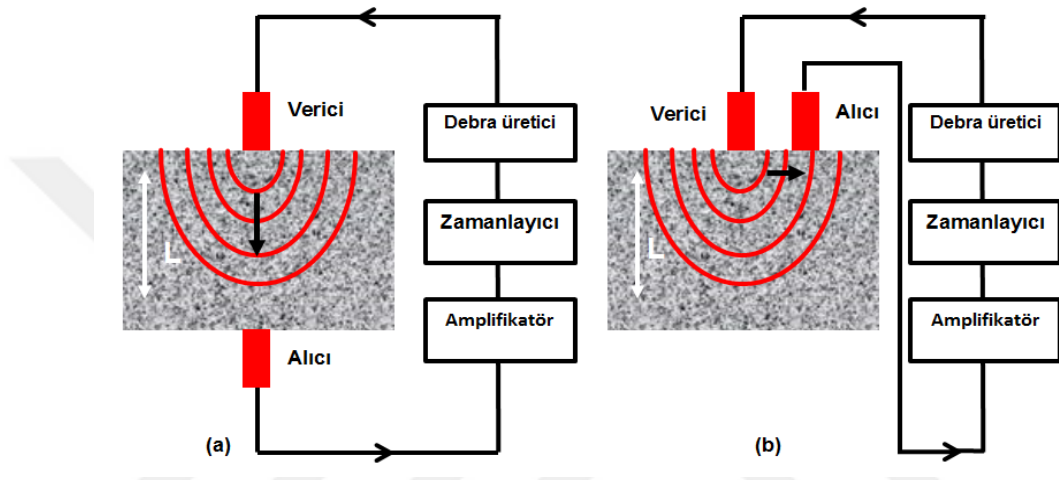
4.2.3.2. Ultrases geçiş hızı cihazı (UGH)

60 yılı aşkın bir süredir Ultrases Geçiş Hızı (UGH) yöntemi beton kalitesini değerlendirmek için başarıyla kullanılmıştır. Son yıllarda yapılan çalışmalar, UGH yöntemiyle asfalt karışımın dinamik elastisite modülünü makul bir doğrulukla hesaplanabileceğini göstermektedir (Al-Qadi vd., 2011). Ultrases geçiş hızı cihazı Şekil 2.29'da gösterilmiştir.



Şekil 4.29. Ultrases geçiş hızı cihazı

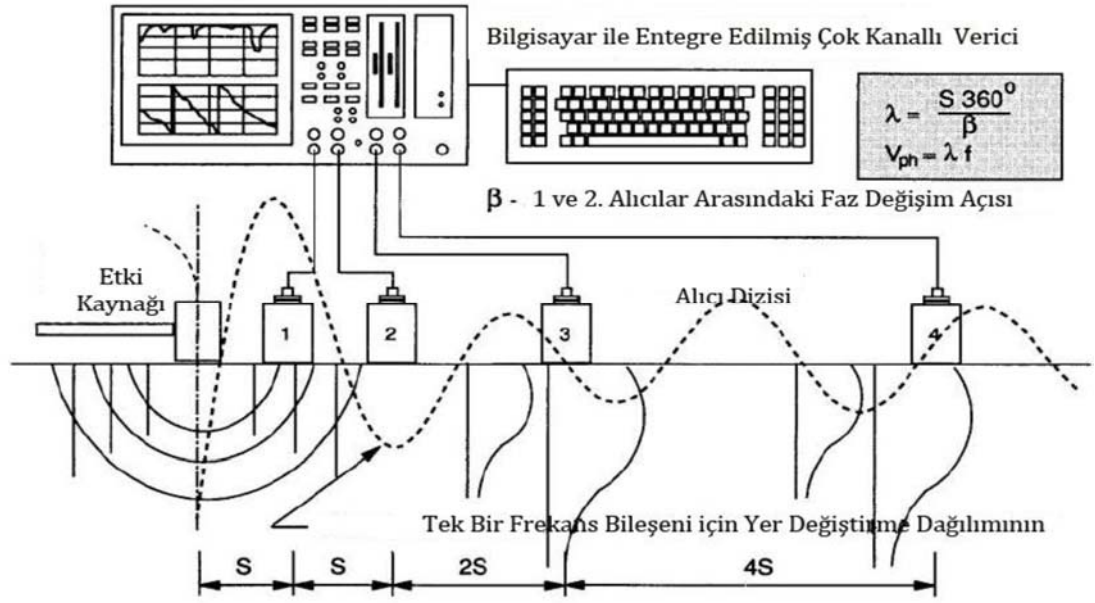
Ultrases denetleme sistemi Şekil 4.30'da gösterildiği üzere darbe-alıcı, transdüser ve görüntüleme ekran ünitelerinden oluşmaktadır. Darbe alıcı transdüsera yüksek frekanslı ultrasonik enerji üretmesini sağlayan yüksek voltajlı elektrik darbesi üretebilen bir elektronik alettir. Ultrasonik dalgalar ses frekanslarını (20 KHz üzerinde) elastik dalgalar olarak tanımlanmaktadır. Dolayısıyla ses enerjisi numune boyunca bir çeşit dalga boyunda iletilmektedir (Serin, 2014).



Şekil 4.30. Ultrases geçiş hızı deney düzeneği, a) direk sensör konfigürasyonu, b) endirekt sensör konfigürasyonu

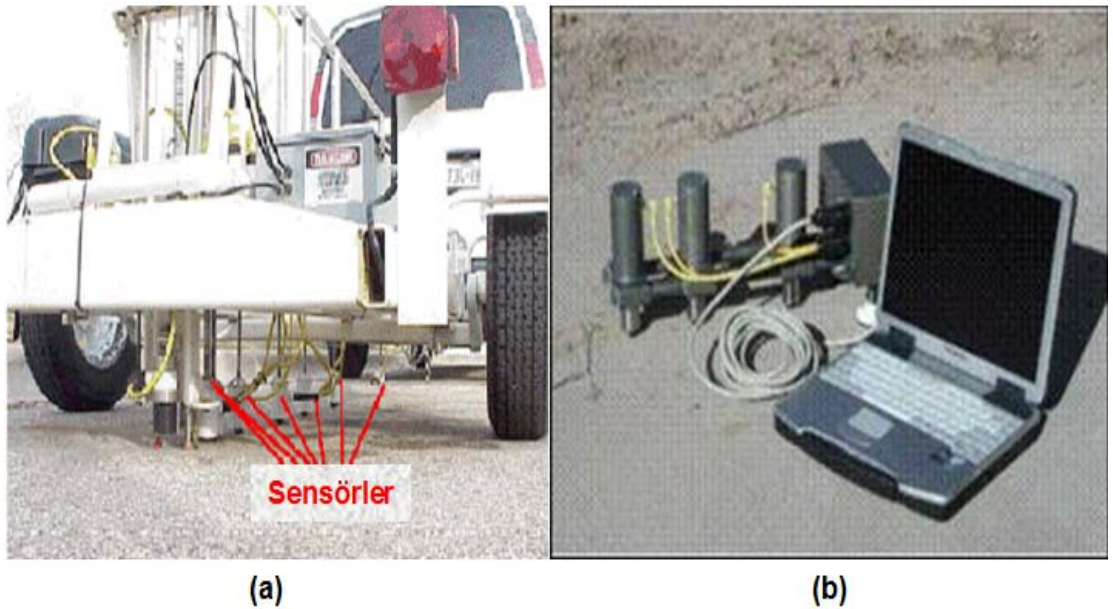
4.2.3.3. Yüzey dalgaların spektral analizi (SASW)

SASW yöntemi bir nesnenin yüzeyine mekanik olarak vurulması ve sonucunda oluşan yüzey dalgalarının nesnenin yüzeyine yerleştirilen iki alıcıya doğru yayılmasının izlenmesi işlemlerini içerir. Yüzey dalgaları, farklı dalga boylarının frekans aralıkları ya da bileşenlerinden oluşur. Yüksek frekanslı (kısa dalga boylu) bileşenler üst tabakanın içerisinde yayılır ve yayılım hızı üst tabakanın özellikleri tarafından belirlenir. Düşük frekanslı (uzun dalga boylu) bileşenler ise daha derin tabakaların içine nüfuz eder ve yayılma hızları alttaki tabakaların özelliklerinden etkilenir. Her frekans bileşeninin iki alıcıya ulaşana kadar geçen süresi kaydedilir ve faz hızları belirlenir. Faz hızı-dalga boyu etkileşimi, dispersiyon eğrisi denilen, grafik elde edilir, SASW deneyi için şematik gösterim Şekil 4.31'de sunulmuştur (Graveen vd., 2001).



Şekil 4.31. SASW deneyi için şematik gösterim

Genel olarak kaplama tabakası modülü belirlemek için kullanılır SASW yöntemine göre iki cihaz geliştirilmiştir: (a) Sismik kaldırım analizörü SPA (b) Taşınabilir sismik kaldırım analizörü (PSPA) iki cihaz Şekil 4.32’de gösterdiği gibi.



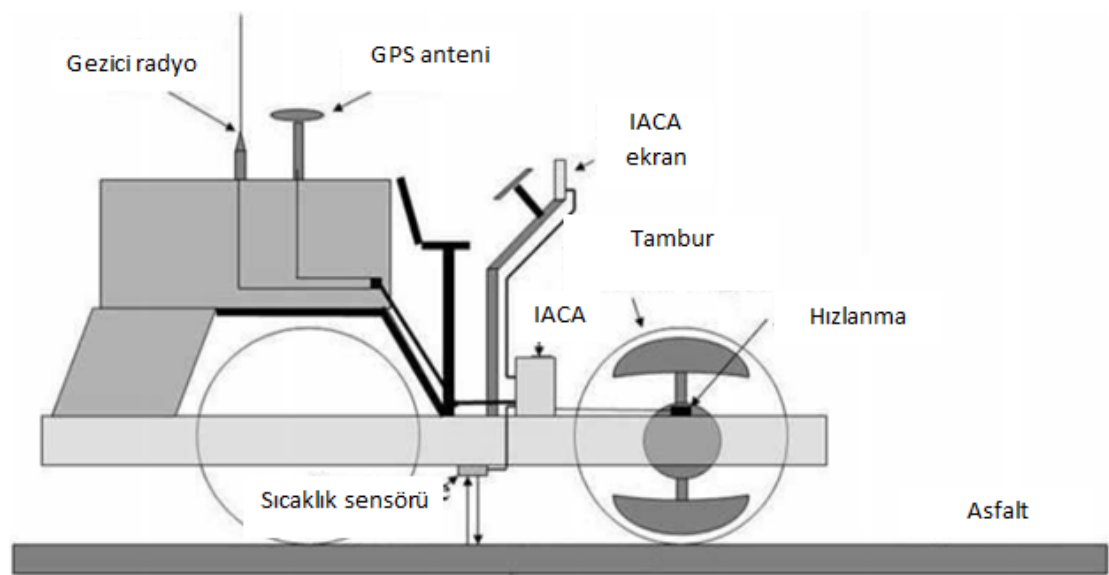
Şekil 4.32. Yüzey dalgaların spektral analizi aleti, a) Sismik kaldırım analizörü SPA, b) Taşınabilir sismik kaldırım analizörü (PSPA).

4.2.4. Diğer tahribatsız değerlendirme teknikleri

Yukarıdaki kategorilerden hiçbirine ait olmayan kaplama değerlendirmesinde kullanılan diğer bazı NDT araçları da vardır. Bu bölümde, bu araçlardan ikisinin uygulamalarını, akıllı kompaktör ve yüzey sürtünmesi ölçüm ekipmanı ele alınacaktır.

4.2.4.1. Akıllı kompaktör

Akıllı kompaktör (Intelligent Compaction IC) silindirleri, yüklenicinin ilerlemesine hiçbir olumsuz etkisi olmayan gerçek zamanlı kaplama kalite ölçümünü sunmak için tasarlanmıştır. Şekil 4.33'te gösterildiği gibi, bu silindirler silindir operatörü için gerçek zamanlı veri işleyen bir dokümantasyon ve geri besleme kontrol sistemine beslenen cihazlarla donatılmıştır (Al-Qadi vd., 2011).



Şekil 4.33. Akıllı kompaktör şematik, IACA, Akıllı Asfalt kompaktör Analiz (Intelligent Asphalt Compaction Analyzer)

Sıkıştırma ölçer veya ivmeölçer, sıkıştırılan malzemenin uygulamalı sıkıştırma verimini, sıklığını ve tepkisini izlemek için tambur etrafına monte edilmiştir. Ölçüm cihazlarından alınan veriler sıkıştırma işleminin etkinliğini belirlemektedir. Ancak, malzemenin sıkıştırmaya verdiği tepkiyi hesaplama

metodolojisi genellikle özeldir. Asfalt IC silindirleri için ilave ısı cihazları, asfalt kaplama malzemesinin yüzey sıcaklığını izlemek için kullanılmaktadır. Belirli sıcaklık aralıklarındaki titreşimli sıkıştırma olumsuz etkilere sahip olabildiğinden bu cihazlar kritik öneme sahiptirler. Bu silindir monteli sistemler, bir kontrol açısından bir yükleniciye kanıtlanabilir şekilde faydalı olmalarına rağmen, tasarım modülü değerlerinin kabul ve onayı için kullanılmamışlardır. Asfalt kaplama malzemelerini sıkıştırma işlemi, sıcaklık, yükleme hızı ve temel tabakalarının rijitliğini etkileyen ilave karmaşık bir modülü içermektedir. Bu nedenle, rijitlikte ölçülen bir artışın yoğunluktaki bir artıştan mı yoksa sıcaklıktaki bir azalmadan mı meydana geldiği bilinmemektedir (Al-Qadi vd., 2011).

4.2.4.2. Yüzey sürtünmesi ölçüm cihazları

Sürüş güvenliği için kritik öneme sahip olan yüzey sürtünmesi, kaplamanın işlevsel bir özelliğidir. Çeşitli NDE cihazları yol sürtünmesini ölçmek için kullanılmıştır. Ölçüm prensibi bu cihazlar arasında farklılık göstermektedir, ancak prensipte hepsi beş farklı türde değerlendirilmektedir: yavaşlama cihazları, kilit-lastikli cihazlar, yan-kuvvet cihazları, sabit-kayma cihazları ve değişken-kayma cihazları (Al-Qadi vd., 2011). Çeşitli Sürtünme Ölçüm Cihazları Şekil 4.34'te görülmektedir.



Şekil 4.34. Çeşitli Sürtünme Ölçüm Cihazları

Yavaşlama cihazlar, tam frenleme esnasında aracın yavaşlamasını ölçmektedir. Bu prensibi kullanan bilindik cihazlardan biri de Coralba metredir olup sadece tercihen kilitlenme önleyici frenlerle donatılmış bir araca konulmaktadır. Coralba metre, ani ve şiddetli fren sonrasında aracın yavaşlamasını ölçmektedir. Yavaşlama cihazına biraz benzeyen başka bir yöntem ise durma-mesafesi yöntemidir (ASTM E445). Kilit-lastikli römork, çoğu ABD eyaletinde sürtünme katsayısının 100 katı olarak tanımlanan patinaj sayısını ölçmek için kullanılmaktadır (ASTM E274). Test lastiği 64 km/saat (40 mil) bir hızda ölçüm yapan aracın arkasından çekilen römorka takılır. Su, test lastiğinin önüne serpilir, bir fren sistemi lastiğin kilitlenmesi için zorlanır ve direnç kuvveti ölçülür. Yan-kuvvet cihazları, dönme düzlemine dik olarak yan kuvveti ölçmek için hareketin yönüne doğru bir açıda bir düzlemde test lastiğini tutmaktadır (Al-Qadi vd., 2011).

20°'de bir lastik sapma açısına sahip ince İngiliz bezi, bu türün en çok kullanılan cihazıdır. Birçok ABD eyaleti tarafından kullanılan bir başka sistem ise rotadan sapmış iki lastik tarafından geliştirilen yan kuvveti ölçen mumetredir. Mu-metre prosedürü, ASTM E670 olarak gösterilmektedir. Sabit-kayma cihazları genellikle % 10 ile % 20 kayma aralığında çalışmaktadır. Bu prensip ile çalıştığı bilinen bazı cihazlar FAA sürtünme test cihazı, SAAB sürtünme test cihazı ve kavrama test cihazıdır. Değişken-kayma cihazları lastik ve yol yüzeyi arasındaki kayma fonksiyonu olarak sürtünmeyi ölçmektedir. Bu cihazlar, lastik ve yol yüzeyinin sürtünme özellikleri hakkında en fazla bilgiyi vermektedirler. Bilinen iki değişken-kayma cihazı Fransız IMAG ve Norveç Norsemeter Runar ve Gürültü Sistemleridir (Al-Qadi vd., 2011).

Çizelge 4.1,4.2 ve 4.3'te sırasıyla kaplama durumu değerlendirmesi için tahribatsız test yöntemleri özeti, ölçüm özellikleri, kullanım alanlarına göre tahribatsız test yöntemlerinin özeti ve tahribatsız defleksiyon temelli olan aletlerinin özellikleri gösterilmektedir

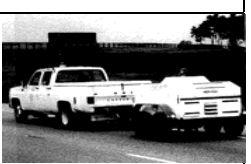
Çizelge 4.1. Kaplama durumu değerlendirmesi için tahribatsız test yöntemleri

Kategori	Yöntem	Ölçüm özellikleri tipi		
		Hacimsel	Yapısal	Fonksiyonel
Defleksiyon temelli yöntemler	Statik yükleme yapan aletler		√	
	Sabit-sarsıcı yükleme yapan aletler		√	
	Ani çarpma yükleme yapan aletler		√	
	Sürekli Yükleme Defleksiyonlar		√	
Gerilme dalga yöntemler	Darbe-yankı yöntemi		√	
	Ultrases geçiş hızı		√	
	Yüzey dalgaların spektral analizi		√	
Elektromanyetik yöntemler	Nükleer Nükleer olmayan elektromanyetik yoğunlukölçer	√		
	Zemin penetrasyon radarı	√	√	
	İnfrared tomografi	√		
	Lazerli profil ölçer			√
Diğer yöntemler	Akıllı kompaktör	√	√	
	Yüzey Sürtünmesi Ölçüm Cihazları			√

Çizelge 4.2. Ölçüm özellikleri ve kullanım alanlarına göre tahribatsız test yöntemleri.

Özellikler ve Kullanım Amacı		Tahribatsız Test Yöntemleri	
Özellikler	Kullanım Amacı	BSK tabakaları	Sınırsız Agregat Temeller ve Toprak Tabakalar
Hacimsel	Yoğunluk	➤ GPR ➤ Nükleer olmayan PQI ➤ Pave Tracker	➤ GPR ➤ Nükleer Olmayan ölçüm cihazları; EDG, TDR
	Hava Boşluğu veya Sıkışma Yüzdesi	➤ GPR ➤ İnfrared Tomografi ➤ Akustik Emilsyon ➤ Sıkıştırılmalı yoğunluk cihazları	➤ GPR ➤ Sıkıştırılmalı yoğunluk cihazları
	Nem İçeriği	➤ GPR ➤ Nükleer olmayan PQI ➤ NYÖ	➤ GPR ➤ Nükleer Olmayan ölçüm cihazları; EDG, TDR
	Gradasyon; Segregasyon	➤ GPR ➤ İnfrared Tomografi ➤ ROSAN	Yok
	Agrega içeriğindeki boşluk (VMA)	➤ GPR	Yok
Yapısal	Kalınlık	➤ GPR ➤ Ultrasonik; Etki-Tepki, SPA, SASW ➤ Manyetik Tomografi	➤ GPR ➤ Ultrasonik; SASW, SPA
	Dinamik ve Resilant (esneklik) Modüller	➤ Ultrasonik; PSPA, SASW ➤ Defleksiyon temelli; FWD, LWD ➤ Sıkıştırılmalı yoğunluk cihazları ➤ Sistemler; Asfalt Yönetici	➤ DCP, Clegg Çekici ➤ Ultrasonik; DSPA, SASW, SPA ➤ Defleksiyon temelli; FWD, LWD ➤ Denge durum vibrasyonu; Geogauge ➤ Sıkıştırılmalı yoğunluk
	Tabaka Sınırları ve tabakalar arası Adezyon	➤ Ultrasonik; SASW, etki tepki, ➤ İnfrared Tomografi	Yok
Fonksiyonel	Profil; IRI	➤ Profilometre, ➤ Profilograph,	Yok
	Gürültü	➤ Gürültü ölçüm aracı	Yok
	Kırılma	➤ CT ölçer, ROSAN	Yok

Çizelge 4.3. Tahribatsız defleksiyon temelli olan aletlerin özellikleri

Alet İsmi	Çalışma Biçimi	Yükleme Prensibi	Yükleme Sistemi	Yük taşınır ile in(cm)	Yük Aralığı lb- (kN)	Defleksiyon Ölçüm Aleti	Sensörler Sayısı	Sensör Aralığı in(cm)	Veri Kaydetme Şekli	Yük İletme Şekli	Resim
Benkelman Kirişi	Elle İşlem	Tekerlek Yüğü	Yüklü Kamyon	Yüklü Kamyon	Bağımlı araç	Dial Geyç	1	Yok	Elle	Kamyon Tekerleğiyle	
La Croix Deflectograph	Otomatik	Tekerlek Yüğü	Hareketli Kamyon	Yüklü Kamyon	Bağımlı araç	Transdüser	1	Yok	Elle, yazıcı ile Ya da otomatik	Kamyon Tekerleğiyle	
Plak yükleme	Elle İşlem	Hidrolik Jack	Yüklü Kamyon	Yüklü Kamyon	Bağımlı araç	Jeofonlar	1	Yok	Elle, yazıcı ile Ya da otomatik	Dairesel Plaklarla	
Dynalect	Treylere Monte edilmiş	Vibrasyon	Dönen Kütleler	15(240) Çap Çelik Tekerlek	1,000 -(5)	Jeofonlar	4	Variable 0 – 48 (0 -120)	Elle, yazıcı ile Ya da otomatik	Çelik Tekerleklerle	
Road Rater 400 B	Treylere Monte edilmiş	Vibrasyon	Hidrolik çalışan Kütleler	18 (45) Çap plakası	5000-8,000 (2 - 35)	Jeofonlar	4-7	Variable 0 - 48 (0 - 120)	Elle, yazıcı ile Ya da otomatik	Lastik Pedlerle	
Road Rater 2000	Treylere Monte edilmiş	Vibrasyon	Hidrolik çalışan Kütleler	18 (45) Çap plakası	5000-8,000 (2 - 35)	Jeofonlar	4-7	Variable 0 - 48 (0 - 120)	Elle, yazıcı ile Ya da otomatik	Dairesel Plaklarla	

Road Rater 2008	Treylere Monte edilmiş	Vibrasyon	Hidrolik çalışan Kütleler	18 (45) Çap plakası	5000-8,000 (2 - 35)	Jeofonlar	4-7	Variable 0 - 48 (0 - 120)	Elle, yazıcı ile Ya da otomatik	Dairesel Plaklarla	
WES Heavy Vibrator	Treylere Monte edilmiş	Vibrasyon	Düşen Kütle Sistemi	12 -18 (30-45) Çap plakası	500 - 30000 (2-130)	Jeofonlar	5	Variable 0 - 60 (0 - 120)	Elle, yazıcı ile Ya da otomatik	Dairesel Plaklarla	
KUAB FWD	Treylere Monte edilmiş	Çarpma Yüğü	Düşen Kütle Sistemi	12 -18 (30-45) Çap plakası	1,500 - 27,000 (7-240)	Sismometre	7	Variable 0 - 96 (0 - 240)	Elle, yazıcı ile Ya da otomatik	Dairesel Plaklarla	
KUAB HWD	Treylere Monte edilmiş	Çarpma Yüğü	Düşen Kütle Sistemi	12 -18 (30-45) Çap plakası	6,000 - 54,000 (13 - 294)	Sismometre	7	Variable 0 - 96 (0 - 240)	Elle, yazıcı ile Ya da otomatik	Dairesel Plaklarla	
Dynatest FWD	Treylere Monte edilmiş	Çarpma Yüğü	Düşen Kütle Sistemi	12 -18 (30-45) Çap plakası	1,500 - 27,000 (7-240)	Jeofonlar	7-9	Variable 0 - 90 (0 - 120)	Elle, yazıcı ile Ya da otomatik	Dairesel Plaklarla	
Dynatest HWD	Treylere Monte edilmiş	Çarpma Yüğü	Düşen Kütle Sistemi	12 -18 (30-45) Çap plakası	6,000 - 54,000 (27- 240)	Jeofonlar	7-9	Variable 0 - 90 (0 - 120)	Elle, yazıcı ile Ya da otomatik	Dairesel Plaklarla	

Phoenix ML 10000 FWD	Treylere Monte edilmiş	Çarpma Yükü	Düşen Kütle Sistemi	12 -18 (30- 45) Çap plakası	1,500 - 27,000 (7-240)	Jeofonlar	9-12	Variable 0 – 100 (0 - 250)	Elle, yazıcı ile Ya da otomatik	Dairesel Plaklarla	
JILS FWD	Treylere- Van Monte edilmiş	Çarpma Yükü	Düşen Kütle Sistemi	12 -18 (30- 45) Çap plakası	1,500 - 27,000 (7-240)	Transdüser	7	Variable 0 - 96 (0 - 240)	Elle, yazıcı ile Ya da otomatik	Dairesel Plaklarla	
JILS HWD	Treylere- Van Monte edilmiş	Çarpma Yükü	Düşen Kütle Sistemi	12 -18 (30- 45) Çap plakası	6,000 - 54,000 (27- 240)	Transdüser	7	Variable 0 - 96 (0 - 240)	Elle, yazıcı ile Ya da otomatik	Dairesel Plaklarla	
Carl Bro FWD	Treylere- Van Monte edilmiş	Çarpma Yükü	Düşen Kütle Sistemi	12 -18 (30- 45) Çap plakası	1,500 - 27,000 (7-240)	Jeofonlar	9-12	Variable 0 – 100 (0 - 250)	Elle, yazıcı ile Ya da otomatik	Dairesel Plaklarla	
Carl Bro HWD	Treylere- Van Monte edilmiş	Çarpma Yükü	Düşen Kütle Sistemi	12 -18 (30- 45) Çap plakası	1,500 - 27,000 (7-240)	Jeofonlar	9-12	Variable 0 – 100 (0 - 250)	Elle, yazıcı ile Ya da otomatik	Dairesel Plaklarla	
Carl Bro LWD	Treylere- Van Monte edilmiş	Çarpma Yükü	Düşen Kütle Sistemi	12 -18 (30- 45) Çap plakası	200 - 3,000 (1-15)	Jeofonlar	3	Variable 0 – 40 (0 - 100)	Elle, yazıcı ile Ya da otomatik	Dairesel Plaklarla	

5. DÜŞEN AĞIRLIKLI DEFLEKTOMETRE ALETİ (FWD)

5.1.Genel Bakış

Yolların yapısal durumunu belirlemek amacıyla etkili ve güvenilir yöntemler kullanılması büyük önem taşımaktadır. Yol üstyapısı kapasitesinin belirlenmesinde kullanılan, Düşen Ağırlık Deflektometresi (FWD) en çok uygulanan hasarsız test yöntemlerinin başında gelmektedir. Bu yöntem aracılığıyla yol yüzeyine uygulanan eşdeğer taşıt yüküne karşılık, oluşan düşey deplasmanlar bir dizi sensör aracılığıyla ölçülebilmektedir. FWD testleri sonucunda elde edilen deplasmanlar kullanılarak üstyapı katmanlarının mekanik özelliklerinin (Elastisite modülü, kalınlık vb.) Belirlenmesi işlemine geri-hesaplama adı verilmektedir. Bu işlemde üstyapı, ileri hesaplama modeli olarak adlandırılan matematiksel bir yöntemle modellenerek, simule edilen FWD testi sonucunda oluşacak deplasmanlar tekrarlı olarak hesaplanmaktadır. Her bir iterasyon sonucunda hesaplanan deplasmanlar ve FWD ölçümleri karşılaştırılmakta, kullanılacak bir optimizasyon yöntemi aracılığıyla arazideki değerlere en yakın deplasmanları oluşturacak üstyapı mekanik özellikleri belirlenmektedir. Sonuç olarak geri-hesaplama ile elde edilen değerler, yapının mevcut durumu hakkında önemli bilgiler vermekte; bakım, rehabilitasyon ve kalan servis ömrünün belirlenmesinde gerekli girdi değerlerini oluşturmaktadır (Öcal, 2014).

Normal ve ağır olmak üzere iki Deflektometre kategorisi vardır. Normal deflektometre, 7 ila 120 kN aralığındaki yükleri uygulama yeteneğine sahiptir. Bunlar birçok havalimanı kaplamaları da dahil her türlü yolda test yapmaya uygundur. Genel olarak, herhangi bir kalınlıktaki esnek kaplamalar ve yaklaşık 15 santim kalınlığa kadar rijit ve kompozit kaplamalar, normal deflektometre ile test edilebilir. Daha büyük kalınlıklardaki rijit ve kompozit kaplamalar için 30 ila 240 kN aralığındaki yükleri uygulayabilme yeteneğine sahip olan ağır deflektometre gerekmektedir. Hem hafif hem de ağır deflektometre, biri 30 cm ve diğeri 45 cm çapında olan iki yükleme plakası ile donatılmıştır. Küçük yük plakası, karayolu kaplaması ile çoğu havaalanı kaplamasının test edilmesinde

kullanılmaktadır. Büyük yük plakası, büyük dişli düzeneklerine sahip olan uçak yüklerinin simülasyonunu yapmak için bazı havalimanı kaplama testlerinde kullanılmaktadır. Büyük yük plakası, aynı zamanda bazen taban zemini veya temel tabakası üzerindeki doğrudan defleksiyon testlerini yapmak için de kullanılmaktadır (Hall vd., 2001).

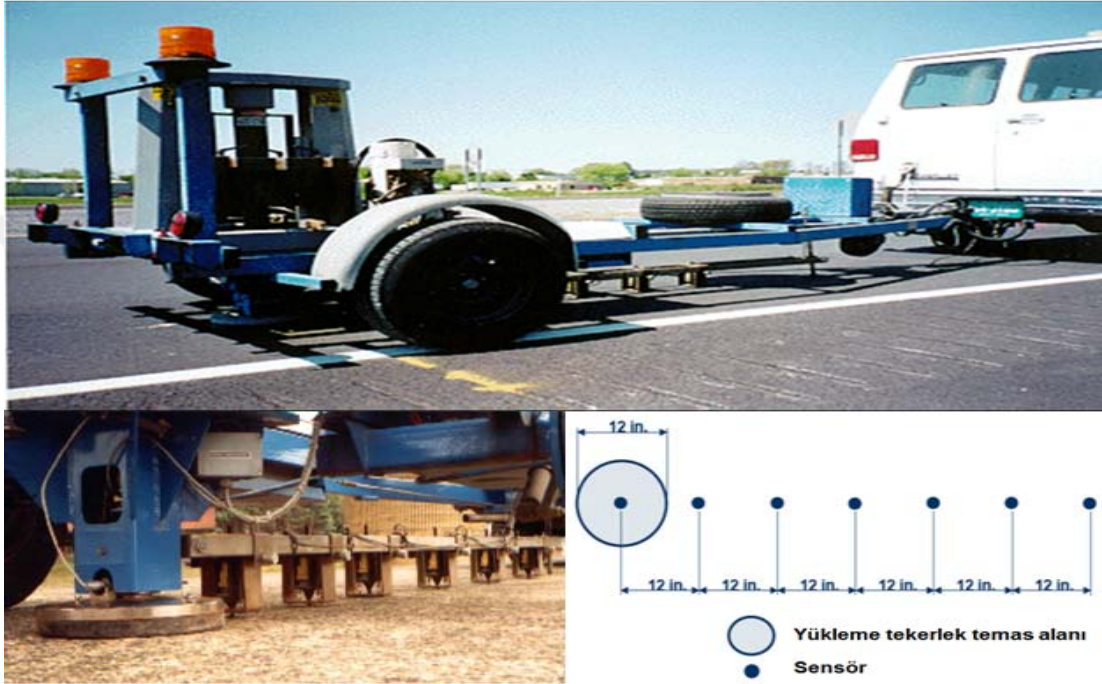
5.2. Düşen Ağırlık Deflektometre Cihazı

Bir FWD sisteminin ana bileşenleri kontrol sistemi, hidrolik sistem, yükleme ağırlığı ve plaka, yük hücresi ve defleksiyon sensörlerini içerir (Qin, 2010).

Düşen Ağırlık Deflektometre 'nin bütün tipleri geçmekte olan bir kuvvet etkisini üstyapı yüzeyine iletir. Kuvvet; belli bir yükseklikten üstyapı yüzeyine yerleştirilmiş bir plak üzerine düşürülen bir kütle ile oluşturulur. Düşen kütlelerin alt kısmına lastik tamponlar bağlanmıştır. Ağırlık miktarını ve düşüş yüksekliğini değiştirerek farklı ani çarpma kuvvetleri oluşturulabilir. Normal uygulamalarda; test yerine treylere monte edilmiş alet götürülür, yükleme plağı ve transdüserler üstyapı yüzeyine hidrolik olarak indirilir. Seçilen bir yükseklik için ağırlık düşürülerek test adımı tamamlanır. Yükleme plağı ve sensörleri kaldırılır ve alet diğer test alanına götürülür. Ani çarpma yüklemesi yapan aletin temel avantajı, hareket eden bir tekerleğin hem büyüklüğünü hem de yükleme süresini doğru olarak modelleyebilmesi ve statik yükleme kıyaslama yapmaya yardımcı olabilmesidir (Saltan, 1999).

Her bir deneme lokasyonundaki yola 11,8 in. (300 mm) çapındaki yük plakaları temas eder ve etki yaratır. Yük plakasının üzerindeki bir yük kolonu bir ağırlık kümesi taşır Bu ağırlık tıpkı kamyon lastiği setiyle ayrıldığı gibi bir yükü zeminden ayırmak için bırakılır. 12 in'lik bir artıdaki yük tabakalarından ayrı yerleştirilen yedi jeofon bir "defleksiyon haznesi" oluşturarak yüzey defleksiyonunu ölçer. Ölçümler genellikle üst tabakanın sağ teker izinden elde edilir (Lenz., 2011).

Yüklemenin yapıldığı yerden belirli uzaklıklardaki defleksiyonlar, bir kiriş üzerinde bulunan jeofonlar (genellikle yedi adet) yardımı ile ölçülür. Yükleme belirli bir frekansta ve zaman aralığında yapılır. Yükleme, sinüzoidal bir biçimde uygulanır ve frekansı 0,025-1 sn. ile 0,030-1 sn. arasında değişir (Molenaar, 2006). Düşen Ağırlık Deflektometre aleti ve jeofonlar sistemi Şekil 5.1’de gösterilmiştir.



Şekil 5.1. Düşen ağırlık deflektometre ve jeofonlar sistemi

5.3. Düşen Ağırlık Deflektometre Aleti Çalışması

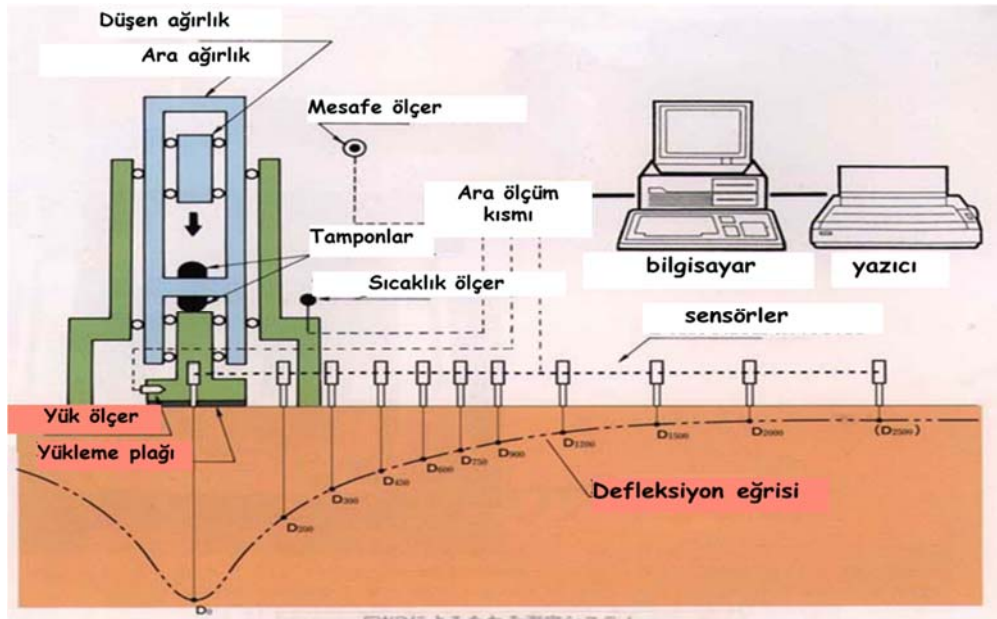
FWD aleti şöyle çalışır: Bilinen büyüklükteki bir ağırlık farklı seviyelerde çarpma yükleri oluşturan farklı yüksekliklerden düşürülür. Yükler, yaylar ve lastik pedlerle üstyapı yüzeyine iletilir. Test yükü, lastik pedli dairesel plak ile yüzey üzerine yayılır. Üstyapı, yük altında merkezden dışa doğru yayılan dinamik bir defleksiyonlar dalgası ile tepki gösterir. Bu defleksiyon dalgasının pikleri, jeofon denilen sensörlerle pek çok noktada ölçülür. Sensörlerden birisi, diskteki bir çukura erişebilecek şekilde merkezde yerleştirilir ve diğerleri diskin dışına doğru farklı mesafelerde yerleştirilir. Bütün sensörler, ölçme yeniden başladığı zaman ve her testten sonra taşımak için kaldırılabilir FWD test

yüküyle ölçülmüş defleksiyonlar bir defleksiyon eğrisini oluşturur. Bu defleksiyonlar, tekerlek temas basıncının yayılım alanı ve geçen bir tekerlek altında meydana gelebilir. Ölçümler hızlı, etkili, doğrudur ve veriler hemen kaydedilir ve işleme konabilir. Genel olarak test başladıktan sonra sırayla şu aşamalar uygulanır (Saltan, 1999):

- A- Yükleme plakası ve transdüserleri taşıyan alt birim indirilir.
- B- Belirlenmiş düşüş yüksekliğine kadar ağırlık yukarı doğru kaldırılır.
- C- Ağırlık düşürülür.
- D- İlk düşüş için defleksiyonlar ve yük kaydedilir.
- E- Eğer farklı düşüş yükseklikleri belirlenmiş ise c ve d aşamaları tekrarlanır.
- F- Alt birimler tekrar konumuna getirilir.

5.4. Düşen Ağırlık Deflektometre Test Sistemi

Temel olarak, bir Düşen Ağırlık Deflektometre sisteminin üç temel birimi vardır: Treylere monte edilmiş FWD, bir sistem işlemcisi ve bir bilgisayar. Ağırlık uygulaması hidrolik bir üniteyle kontrol edilir. FWD'nin temel prensibi, dairesel bir plaka üzerine bir kütlenin düşürülmesidir. Düşen Ağırlık Deflektometre sistemi Şekil 5,2'de gösterilmiştir.



Şekil 5.2. Düşen ağırlık deflektometre sistemi (Saltan, 1999)

Düşen ağırlığın kuvveti potansiyel enerjiden hesaplanabilir.

$$F = \sqrt{2Mghk} \quad (5.1)$$

Burada, M düşen ağırlığın kütlesini, g yerçekimi ivmesini, h düşüş yüksekliğini ve k yay sabitini göstermektedir.

Kuvvet büyüklüğü üç büyüklüğe bağlıdır: düşen ağırlığın kütlesi, düşüş yüksekliği ve yay sabiti. Düşen ağırlığın kütlesi 50-300 kg arasında değişebilir. Ortalama olarak 100-200 kg kullanılır. Düşüş yüksekliği 50-450 mm arasında değişebilir. Kuvvet büyüklüğü ise yükleme plağına monte edilmiş bir "load cell (yük hücresi)" ile ölçülür. Temas basıncı, yükleme plakasının alanı, yük ile bölünerek bulunur. Yükleme plakaları 300 mm ya da 450 mm çaplı olabilir. 300 mm çaplı yükleme plağı daha düşük sertliğe sahip olan taban zemini ya da granüler tabakalar için kullanılır. Sistem işlemcisi, FWD işlemini kontrol eden bir elektronik mikro-işlemcidir. Bilgisayarın komutlarını algılayıp FWD'ye ulaştırır. Uygulamaya başlamadan önce FWD'nin durumunu ve yedi transdüserin konumunu belirler. Bir bilgisayar, test anındaki tüm işlemleri görüntüler, yazdırmayı sağlar ve bir diskte saklar (Saltan, 1999).

5.5. Düşen Ağırlıklı Deflektometresinde Veri Toplama

Düşen Ağırlıklı Deflektometre ölçümleri yükten bilinen belli mesafelerdeki her radyal sensör için bir yüzey defleksiyon ölçümünü ifade etmektedir. Oluşan defleksiyon eğrisi, üstyapının her tabakası için esnek elastisite modülü hesaplamakta kullanılır. Ölçülmüş olan yüzey defleksiyonu verileri ve uygulanan yüke ilaveten hava sıcaklığı, üstyapı sıcaklığı, test noktası özellikleri, tabaka kalınlıkları, tabaka malzeme tipi, yüzey şartları, yerel topoğrafik özellikler ve drenaj koşulları gibi diğer bilgiler modüllerin geri-hesaplanması işleminde kullanılmak üzere kaydedilmektedir. Bu bilgilerden bazıları ise işlemler sonucunda ortaya çıkan modül değerlerini yorumlamakta kullanılmaktadır (Saltan, 1999).

FWD ile, aynı noktada en az iki test yapmak gerçekleştirilmeli ve sonuçların karşılaştırılması için kalibrasyon yapılmalıdır. Eğer her bir transdüser için %5'den daha büyük fark çıkarsa ölçüm işlemi tekrarlanmalıdır. Tahribatsız test aleti ile üstyapının boyuna mesafesi boyunca en az beş defleksiyon ölçümü elde edilmelidir. Bunlardan birisi, yüklenmiş alanın merkezindeki maksimum defleksiyondur. Diğer, yüklenmiş alanın ucuna mümkün olduğunca yakın olmalıdır. En az defleksiyonu veren en dıştaki ölçüm; taban zemini reaksiyonlarının alınmasını kolaylaştırmak için yükten yeterince uzak olmalıdır. Defleksiyonlar; hız transdüserleri, ivmeölçerler ve jeofonlar yardımıyla ölçülebilmektedir (Saltan, 1999).

5.6. Defleksiyon Ölçümünün Aralığı, Zamanı ve Lokasyonu

Karayolu kaplamaları için tipik test aralıkları 30-150m (sırasıyla, mil başına yaklaşık 50 ila 10 nokta) arasındadır. Asfalt kaplamalarındaki ve bir dereceye kadar beton kaplamalarındaki defleksiyonlar, zamanla daha değişken olma eğilimindedirler. Bu durumda, daha uzun bir test aralığı daha genç kaplamalar için daha kısa test aralığı ise eski kaplamalar için daha uygundur (Hall vd., 2001).

Dış trafik şeridi kamyon trafiğinin çoğunu taşıdığından, çok şeritli karayolu kaplamalarındaki testler genellikle sadece dış trafik şeridinde yapılır ve bu yüzden dış şeritler genellikle iç şeride göre daha fazla yük ile ilişkili bozulmalara maruz kalmaktadır. Buna ek olarak, defleksiyon testini yapmak için dış şeridi kapatmak iç şeridi kapatmaktan daha güvenli olarak kabul edilir, çünkü sürücüler dış şeridin kapatılmasına daha alışkınlırlar ve tepkileri daha makuldür. İç şeridin defleksiyon testi genellikle sadece diğer nedenlerle (örneğin, onarım veya köprü çalışmaları) iç şeridin kapalı olması halinde yapılmaktadır. Asfalt karayolu kaplamaları, yorulma bozulma boyutunu değerlendirmek için şeridin kenarından sadece 30 - 60 cm mesafede olan dış trafik şeridi üzerinde dış tekerlek yolunda test edilmelidir (Hall vd., 2001).

Güvenlik nedenlerinden dolayı, karayolu kaplamalarında geceleyin test yapılması tavsiye edilmez, ancak (a) gündüz trafik yoğunluğunun test yapmaya izin vermeyecek kadar çok yüksek olması, (b) test yapılacak gündüz sıcaklığı değişimlerinin aşırı yüksek olması halleri hariçtir. Karayolu testlerinin sis, yağmur veya çiseleme koşullarında yapılmasından kaçınılmalıdır (Hall vd., 2001).

30 milisaniyelik yükleme süresi, yaklaşık 30 km/sa ile hareket eden bir araç tekerleğini simule etmektedir. Yedinin üzerindeki transdüser, yük uygulamalarından sonuçlanan yüzey defleksiyonunu ölçmektedir. Bir iş gününde FWD ile 200-300 civarında test yapılabilir. Bu sayı, test edilecek noktalar arasındaki mesafeye bağlıdır. Proje büyüklüğüne bağlı olarak, test mesafesi 7.5-100 m arasında değişebilir. Kaplamanın durumu hakkında bilgi edinmek amacıyla uygulanan testler ise her 30-100 m'de ve tekerlek izinde uygulanmaktadır. Detaylı analizler için ise 7.5-10 m'de bir test uygulamak yeterli olmaktadır. Ortalama bir test süresi 90 saniye civarındadır. Saatte 30-50 noktada defleksiyon ölçümü yapılabilir. Ölçülen defleksiyon değerleri bir bilgisayarın hafızasında saklanır (Saltan, 1999).

5.7. Düşen Ağırlıklı Deflektometrenin Faydaları

Görsel muayeneler sonucu belirlenen noktalarda, tahribatsız test aletleriyle ölçülen defleksiyon değerleri yardımıyla üstyapıların performansı tayin edilebilmekte, yapısal durumu ortaya çıkmakta ve bunun yanında defleksiyon ile üstyapı ömrü arasında bir ilişki tanımlamak mümkün olabilmektedir. Aynı yol kesimi için tekrarlı olarak defleksiyon ölçümü yapmak suretiyle üstyapının bozulma derecesi ortaya konabilmektedir.

Düşen Ağırlıklı Deflektometre (FWD)'nin temel faydaları şöyle özetlenebilir (Saltan, 1999):

1. En büyük avantaj; tahribatsız olarak deney yapabilesidir.
2. Bir iş gününde 200-300 deney uygulayabilecek kadar basit ve hızlıdır.

3. Esnek ve rijit üstyapılar için kullanılabilmektedir.
4. Yükün uygulandığı noktadaki maksimum defleksiyonla birlikte farklı mesafelerdeki defleksiyonları da elde etmek mümkündür.
5. FWD; yük büyüklüğünü ve ağır araçların yükleme sürelerini simule edebilecek şekilde dizayn edilmiştir.
6. Sadece bir kişiyle bile deney uygulanabilir.
7. Ağır yükler uygulanabilir.
8. Üstyapının aynı kesimine pek çok kez FWD deneyi uygulanarak zamanla durumunun gelişmesi hakkında doğru bilgi elde edilebilir.
9. Bir üstyapının malzeme özellikleri hakkında bilgi edinilebilir.

Düşen Ağırlıklı Deflektometre test aletleriyle ölçülmüş olan defleksiyon değerlerinden şu bilgiler alınabilmektedir (Saltan, 1999):

1. Yol üstyapıların defleksiyon karakteristikleri,
2. Trafik yükü altında bir üstyapının kalan ömrü,
3. Kaplama optimum ömrü,
4. Üstyapı ömrünü uzatmak için gereken takviye tabakası kalınlığı,
5. Kısmi ya da tamamen yeniden yapım ihtiyacı için bozulmuş yol uzunluğu.

5.8. Düşen Ağırlıklı Deflektometre Modelleri

Bretonniere tarafından yapılan "Deflektometre a boulet" Düşen Ağırlıklı Deflektometrenin temelini teşkil etmektedir. Alet başlangıçta Fransa'da geliştirilmiştir. Daha sonra, Danimarka ve İsveç'te farklı Düşen Ağırlıklı Deflektometre üretilmiştir: Dynatest, KUAB, Phoenix ve JILS altı. Bu aletlerin hepsi de yükten farklı radyal mesafelerde jeofonlar yardımıyla defleksiyon değerlerini ölçerek defleksiyon eğrisini oluştururlar (Saltan, 1999).

5.8.1. Dynatest düşen ağırlıklı deflektometre

1976 yılında FWD cihazların ilk modeli Danimarka da yapılmıştır, ve 1981 yılında Amerika'ya gönderilmiştir, FWD 8000 ve HWD 8081 olarak iki şekilde üretilmektedir, Bu iki tip Şekil 5.3'te görülmektedir (Hall vd., 2001).

ABD'de en yaygın kullanımı olan Dynatest 8000 Düşen Ağırlıklı Deflektometre serisidir. Ani çarpma kuvveti, 20-380 mm'Lik (0.8 - 15 in) bir yükseklikten 50, 100, 200 ya da 300 kg'lık (110, 220, 440 ya da 660 lb) bir ağırlık düşürülerek oluşturulur (Huang, 1993).

Düşüş yüksekliğini ve ağırlığını değiştirerek 6.7-100 kN arasında değişen bir kuvvet uygulanabilir. Yük, üstyapıya bir yükleme plağıyla iletilir. Yükleme plağının yarıçapı 300 mm'dir (11.8 in) ve 25-30 milisaniyelik bir süre boyunca yarım-sinüs dalgası şeklinde bir çarpma yükü oluşturulur. Yük büyüklüğü bir "load cell" ile ölçülür (Huang, 1993).



(a)



(b)

Şekil 5.3. Dynatest düşen ağırlıklı deflektometre, a) Dynatest FWD 8000 modeli
b) Dynatest (HWD) 8000 modeli

5.8.2. KUAB düşen ağırlıklı deflektometre

Yük plakasına dengeli bir şekilde kuvveti dağıtmak amacıyla yağ ile dolu hidrolik sistemi kullanılmaktadır (Bay, 1985).

Ani çarpma kuvveti, farklı yükseklikten iki ağırlıklı bir yük seti düşürülerek oluşturulur. Düşüş yüksekliği ve ağırlıklar değiştirilerek, 12-156 kN arasında değişen bir çarpma kuvveti oluşturulabilir. Yük, çapı 300 mm olan bir yükleme plakası ile aktarılır. İki kütleli düşen ağırlık sistemi; hem sert hem de yumuşak taban zeminleri olan üstyapılarda kuvvet vuruşunun daha yavaş artmasını sağlamak için kullanılır. Defleksiyonlar beş transdüser ile ölçülür (Huang, 1993).

Bu cihazda yükleme merkezine bir adet jeofon koyulup diğerleri ise yükün arkası ve önüne farklı aralıklarda yerdeğiştirmeleri ölçmek amacıyla koyulmaktadır. Her jeofon (sensör) lineer varyasyonlu yerdeğiştirme transdüserleri (Linear Variable Displacement Transducer LVDT) içermektedir. Bu transdüserler, defleksiyon değerlerini voltluk veriler değiştirip bilgi bütünleşme sistemine göndermektedir. Aynı zamanda her jeofona her yıl kalibrasyon gereklidir (White ve Gieselman, 2009). KUAB Düşen Ağırlıklı Deflektometre Şekil 5.4'te görölmektedir.



Şekil 5.4. KUAB Düşen Ağırlıklı Deflektometre

5.8.3. Phoenix düşen ağırlıklı deflektometre

Phoenix FWD, Avrupa ve ABD'de en yaygın kullanılan deflektometrelerden birisidir. Ani çarpma yükünü, 10 kN'dan 50 kN'a getirmek için tek bir ağırlık farklı yüksekliklerden düşürülür. Yük, üstyapıya 300 mm çaplı bir plaka yardımıyla iletilir. Defleksiyonlar, birisi yükleme plağının merkezinde ve diğerleri merkezden 300 ve 750 mm uzaklıkta olan üç transdüser ile ölçülür (Huang, 1993).

Bu jeofonlar kaplamanın yüzeyi ve titreşim kütesinin işareti ile arasındaki mesafeleri LVDT sistemiyle ölçmektedir. Bu jeofonlar biri yük plakasının ortasında koyulup diğeri ise rastgele olarak yük plakasından 20-25 cm uzaklıkta koyulmaktadır (Bay vd., 1998). Phoenix Düşen Ağırlıklı Deflektometre Şekil 5.5'te görülmektedir.



Şekil 5.5. Phoenix Düşen Ağırlıklı Deflektometre

5.8.4. Diğer düşen ağırlıklı deflektometre modeller

Ticari olarak mevcut FWD modelleri yanında, bir kaç gelişmiş FWD modeller de mevcuttur. Bu modellerin detayları aşağıda verilmiştir.

5.8.4.1. JILS düşen ağırlıklı deflektometre

JILS FWD, bir panelvan ya da pick-up tarafından çekilebilen iki dingilli bir römorka monte edilir. Yükleme kapasitesi 9 kN ila 120 kN arasında değişmektedir. Kullanılan yükleme plakası, uygulanan yükün homojen dağılımını sağlamak için kendisine bağlı olan 8 mm kalınlığında ağır hizmet, neopren ped ile 300 mm çapındaki sert çelik bir diskten. En fazla on defleksiyon sensörü desteklenmektedir (Kumar vd., 2012).

Sensör çubuk, yük plakasının arkasına doğru uzanmaktadır ve test noktaları arasında taşıma sırasında yukarı doğru katlanmaktadır. Sensörler, 0 ile 60 in (0-153 cm) arasında değişen oranlarda yük plakasının arkasına doğru ve 12 in (30 cm) oranında öne doğru çubuk boyunca yer alan sabitlenmiş konumlara doğru hareket ettirilebilmektedir. Jeofonlar, sensör çubuğunun üzerine yerleştirilen sehpa üzerine monte edilir ve her biri tek bir büyük yay tarafından yerinde tutulmaktadır (Sanati, 2004).

Yük büyüklüğü, süresi ve yükselme zamanı, kütle, kütle iniş yüksekliği ve durdurma yayı özelliklerine bağlıdır (O'Donnell, 2011).

JILS, her biri 9, 12 ve 16 kip (40, 53 ve 71 kN) yükünde olan 3-inişi dizisinden tekini yaklaşık 24 saniyede tamamlayabilmektedir. Bir kuvvete karşı kaldırma süresi ilişkisine dayalı olarak iniş yüksekliklerini belirleme yöntemi test yapılan günün başında geliştirilir. İstenilen yük düzeylerine göre, JILS yazılımı istenilen yükleri elde etmek için kütleyi kaldırmaya gerekli olan süreyi belirlemektedir. JILS FWD, kabin içindeki bir dizüstü bilgisayar aracılığıyla çalıştırılır. Veri toplama programı Windows tabanlı olup operatöre hem tam zamanlı geçmiş verileri hem de sadece pik yüklerini ve defleksiyonları kaydetmeye izin vermektedir. Analog verinin dijital veriye dönüşümü bir PCMCIA veri toplama kartı üzerinden yapıldığından ayrı bir sistem kalibrasyon modülü yoktur. JILS, hava ve kaplama yüzeyi termometreler, bir mesafe ölçüm cihazı (Distance Measuring Instrument (DMI), coğrafik konumlandırma sistemi (Geographic Positioning System GPS) gibi çevresel cihazlar ve test sırasında yük plakasının

görüntülenmesini sağlamayan bir video ve monitör sistemini sunmaktadır. JILS, jeofonların göreceli kalibrasyonunu gerçekleştirmek için bir kuleye sahiptir ve hem yük hücresi hem de defleksiyon dönüştürücüleri SHRP kalibrasyon protokolü ile uyumludur (Sanati, 2004).

Yedi hız dönüştürücü, tipik dinamik tepkiyi ölçmek için kullanılır (O'Donnell, 2011). JILS Düşen Ağırlıklı Deflektometre Şekil 5.6'da görülmektedir.



Şekil 5.6. JILS Düşen ağırlıklı deflektometre

5.8.4.2. IITKGP düşen ağırlıklı deflektometre

Hindistan'daki ilk FWD modeli, Hindistan'ın Kharagpur kentinde bulunan İnşaat Mühendisliği Bölümünün Ulaştırma Mühendisliği Kısmı ile Hindistan Teknoloji Enstitüsü tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu model, bir araç yardımıyla çekilebilen bir römorka monte edilir. Bu model ile yaklaşık 20 ila 30 mili-saniye yükleme süresi ile 20 kN ila 65 kN arasında değişen büyüklüğe sahip olan bir yük uygulamak mümkündür. Bu yükleme süresi, 50 ila 60 km/sa arasında hareket eden bir aracın ürettiği yük süresiyle aynıdır. Uygun sertlikteki lastik tampon, bu yükleme sürelerini elde etmek için yay sistemi olarak kullanılmıştır. Altı yüzey defleksiyonu, jeofonlar yardımıyla 0, 300, 600, 900, 1200 ve 1500 mm radyal mesafelerde ölçülebilir. Bir zincir ve makara düzeneği kütleyi kaldırmak ve indirmek için kullanılmaktadır. Kavrama düzeneği ise istenilen yükseklikte

kütlenin tutulması için kullanılmaktadır. Yük ve defleksiyon sinyalleri, bir veri toplama sistemi yardımı ile bilgisayara kaydedilmektedir (Kumar vd., 2012). IITKGP Düşen Ağırlıklı Deflektometre Şekil 5.7’de görülmektedir.



Şekil 5.7.IITKGP düşen ağırlıklı deflektometre

Kapsamlı alan çalışmaları bu ekipmanın kullanılmasıyla yürütülmüştür ve alan araştırmaları sırasında toplanan veriler kaplama tabakası modülünün geri hesaplaması için kullanılmıştır. Bu düşük maliyetli ekipman, Hindistan gibi gelişmekte olan ülkeler için oldukça uygundur. Bu modelin eksikliklerinden bazıları şunlardır: örneğin kütlenin kaldırılması zincirinin çekilmesi, kaplama yüzeyine jeofonların yerleştirilmesi ve kütleyi serbest bırakmak gibi işlemlerin birçoğunun elle yapılması ve dolayısıyla daha uzun bir veri toplama zamanı gerektirmesidir. Ayrıca, Hindistan'daki iki yönlü iki şeritli yüksek trafik hacmine sahip karayollarında ekipman manevrasının oldukça zor olduğu belirtilmiştir (Pandey, 2005).

5.8.4.3. CARL BRO GROUP düşen ağırlıklı deflektometre

Carl Bro, 56.000 lb (250 kN)'a kadar dinamik yük üreten bir FWD ve bir HWD cihazını üretmektedir. Ayrıca, Carl Bro yerinde ölçüm yapmak ve toplanan verileri analiz etmek için taşınabilir FWD (LWD) - PRIMA 100 cihazını üretmektedir. Tüm ekipman çeşitleri modül olarak tasarlanmıştır. PRIMA modelleri ile ölçüm ekipmanını bir römork kasasından bir panelvan içine taşımayı ve 7-150 kN ila 7-250 kN arasındaki yüklere yükseltmeyi mümkün kılmaktadır. PRIMA 100 modeline, gerçekleştirilecek olan işe bağlı olarak bir veya iki ilave jeofon ile GPS cihazı bağlanabilmektedir (O'Donnell, 2011).

En son FWD modeli modüler bir tasarım olan PRIMA 2100 modeli olup yükleme kapasitesi ve sensör yapılandırması, ihtiyaca göre değiştirilebilir. Ekipman, römork ve araca monte modeller olarak mevcuttur (Pandey, 2005). Carl Bro Group Düşen Ağırlıklı Deflektometre Şekil 5.8'te görülmektedir.



Şekil 5.8. Carl Bro Group düşen ağırlıklı deflektometre

5.8.4.4. Geotran düşen ağırlıklı deflektometre

Bu model, olarak Roorkee kentinde(Hindistan'da) geliştirilmiştir. Geotran Düşen Ağırlık Deflektometre modeli GTFWD-V, Araç-Monteli Düşen Ağırlık Deflektometresidir. Model, kendinden Tata 207 aracı üzerine monte edilmektedir. Altı deflektör sensörünü desteklemektedir (Kumar vd., 2012). Geotran Düşen Ağırlıklı Deflektometre Şekil 5.9'da gösterilmiştir.



Şekil 5,9. Geotran düşen ağırlıklı deflektometre

Model otomatik olup tüm operasyonu yürütmek için bir kişiye ihtiyaç duymaktadır. Tüm operasyon, DS4000S veri kontrol sistemi aracılığıyla PC üzerinden kontrol edilmektedir. DS4000S sistemi, bir kaplama yapısının E-modülünü almada kullanıcıya olanak sağlayan gerekli tüm verileri yakalayan çok hassas ve yüksek hızlı kontrol sistemidir. Bu bilgiler, daha ileri yapısal analiz yapmak, taşıma kapasitesini belirlemek, kalan ömrü tahmin etmek ve kaplama ihtiyacını hesaplamak için kullanılabilir.

5.8.4.5. Nagaoka düşen ağırlıklı deflektometre.

Model, Japonya'nın Nagaoka şehrinde yer alan yerel karayolların değerlendirilmesi için Himeno vd. (1989) tarafından geliştirilen modifiye bir KUAB FWD modeli-50 cihazıdır. Bu model, bir metal muhafaza ile kapalı olan ve bir kamyon tarafından çekilen bir römork modelidir. Darbe yükünün büyüklüğü, yükleme plakası üzerine yerleştirilmiş olan bir manometre tarafından algılanmaktadır. Defleksiyonlar, referans çerçeve üzerine monte edilen LVDT kullanılarak ölçülmektedir. Kaplamanın ve kat edilen mesafenin yüzey sıcaklığı da kaydedilmektedir. FWD'nin çalıştırılması için kullanılan yazılım üç modülden oluşmaktadır; sistem, ölçme ve veri kalibrasyon. Sistem modülü, kaplamanın iyileştirilmesi ve FWD kalibrasyonu için kullanılmaktadır. Ölçme modülü, defleksiyonları izlemek ve veri kalibrasyon modülü ise bir alt program olarak Elastik Tabaka Sistemi Analizi (Elastic Layer System Analysis ELSA)'ni kullanan Tabaka Modülü Geri Hesaplama Sistemi (Layer Moduli Backcalculation System LMBS) yazılımını kullanarak verilerin işlenmesi içindir (Pandey,2005). Çizelge 5.1 ve 5.2'de sırasıyla FWD'ta sensör aralığı tipi ve FWD ve HWD için detaylı özellikleri göstermektedir.

Çizelge 5.1. Sırasıyla FWD'ta sensör aralığı tipi

Sensör yerler	Inch	0	8	12	18	24	36	48	60	72	-12
	mm	0	203	305	457	610	914	1219	1524	1829	-305
Üniforma		✓		✓		✓	✓	✓	✓	✓	
7 Sensör		✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓		
9 Sensör		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓

Çizelge 5.2. FWD ve HWD için Detaylı Özellikler

Özellikleri	Dynatest	JILS	KUAB	Carl Bro Group
Yük Aralığı lb (kN)	1,500 - 54,000 (7 - 240)	1,500 - 54,000 (7 - 240)	1,500 - 66,000 (7 - 300)	1,500 - 56,000 (7 - 250)
Yük Süresi milisaniye ms	25 - 30	Seçilebilir	56	25 - 30
Yük Yükselme Süresi ms	Değişken	Seçilebilir	28	12 - 15
Yük Jeneratör	Tek kütle	İki kütle	Tek kütle	Tek kütle
Yük plaka Tipi	Lastik ped Veya bölünmüş plaka ile rijit	Lastik ped ile rijit	Lastik ped ile Bölünmüş veya bölünmemiş	Lastik ped ile 4 Bölünmüş plaka
Yük plaka çapı in (cm)	12 ve 18 (30 ve 45)	12 ve 18 (30 ve 45)	12 ve 18 (30 ve 45)	12 ve 18 (30 ve 45)
Defleksyon Sensörleri Türü	jeofonlar	jeofonlar	Sismometre	Jeofonlar
Defleksiyon sensör yeri in (cm)	0 - 90 (0 - 225)	0 - 96 (0 - 240)	0 - 72 (0 - 180)	0 - 96 (0 - 250)
Sensör sayısı	7 - 9	7	7	9-12
Defleksiyon sensör aralığı mils (mm)	80 veya 100 (2 veya 2.5)	80 (2)	200 (5)	90 (2.2)
Defleksiyon Sensörleri Bağlı Doğruluk	2 μ m $\pm$ 2%	2 μ m $\pm$ 2%	2 μ m $\pm$ 2%	2 μ m $\pm$ 2%
Test için gerekli süre (san)	25	30	35	20
Bilgisayar tipi	Kişisel bilgisayar	Kişisel bilgisayar	Kişisel bilgisayar	Kişisel bilgisayar

5.9. Defleksiyonları Etkileyen Faktörler

Bir üstyapı yüzeyindeki düşey defleksiyon, üstyapının her tabakasındaki ve taban zeminindeki bütün düşey şekil değiştirmelerin toplamıdır.

$$dz = \sum (\epsilon_z \delta h)_i \quad (5.2)$$

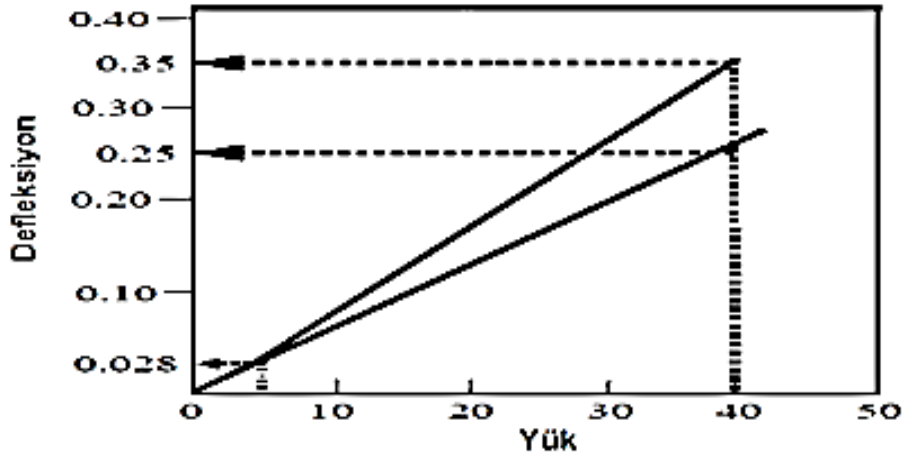
Burada, d_z yüzeydeki defleksiyon, ϵ_z i tabakası için düşey şekil değiştirme ve δh_i tabakasının kalınlığıdır (Saltan, 1999).

Birçok faktör ölçülen kaplama defleksiyonlarını etkilemektedir. Bu faktörler, özellikle de en büyük etkinin tasarlanan bindirme kalınlığı üzerine olabildiği durumlarda, defleksiyon sonuçlarının yorumlanmasını zorlaştırmaktadır. Bu bölümde, kaplamanın defleksiyonunu etkileyen dört ana faktör ele alınmıştır: yük, kaplama, defleksiyon eğrisi ve mevsim (Peshkin vd., 1998).

5.9.1. Yükleme faktörleri

İdeal olarak ölçülen defleksiyonun, tasarım yük koşulları (örneğin 40 kN tekerlek yükü) altında oluşan defleksiyonu simüle etmesi gerekmektedir. Yükün türü ve büyüklüğü, kaplamanın defleksiyon tepkisini etkilemektedir. Yük arttıkça, kaplama defleksiyonu da artacaktır (Peshkin vd., 1998).

Ancak bu genellikle doğrusal bir ilişki olmayacaktır, pek çok kaplama malzemesi lineer olmayan veya gerilmeye hassas olduğu için defleksiyonlar yükle orantılı olmayabilir. Hesaplamalarda hafif yükler için elde edilen test sonuçlarından, ağır yükler için ortaya çıkabilecek değerlerin bulunması gerekmektedir. Ekstrapolasyon bu durumda hata verebileceği için, tahribatsız test aletinin kullanımında yaklaşık olarak ağır kamyon yükleri temsil edilmektedir. Şekil 5.10'da görüleceği gibi, 4.4 kN'luk bir yüke göre 40 kN yükündeki tahmini defleksiyon, 40 kN'luk bir yük kullanılarak elde edilen defleksiyondan önemli ölçüde daha azdır (Peshkin vd., 1998).

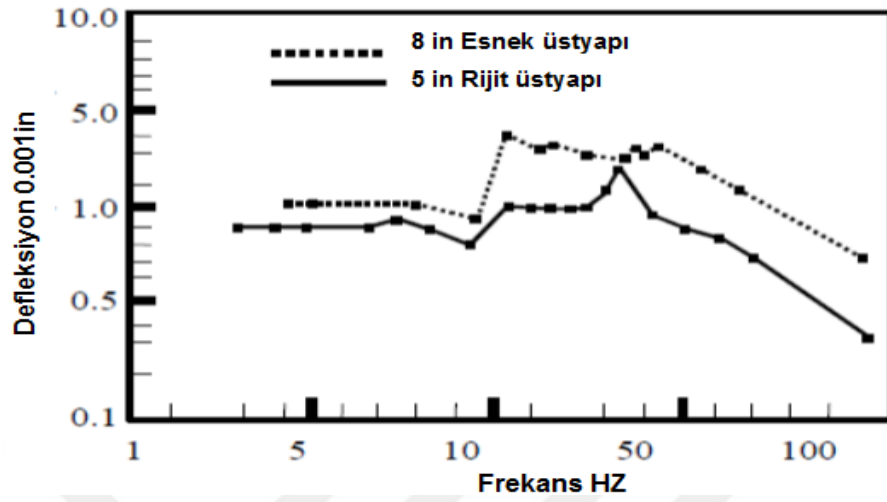


Şekil 5.10. Dinamik yükün bir fonksiyonu olarak üstyapı defleksiyonu

Yükleme büyüklüğü ve süresi üstyapıda oluşacak defleksiyon üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Tahribatsız test aletinin üstyapıya gerçek proje yüküne benzer bir yük uygulaması beklenir. Oysa mevcut test aletlerinin FWD haricinde hemen hemen tamamı gerçek proje yükünü simule edemez. Bazıları proje yükünün büyüklüğünü simule edebilir, fakat yükleme süresini ve frekansı simule edemez. FWD 'nin; gerçek hareketli yüklerin büyüklüğünü ve süresini simule eden, şimdiye kadar geliştirilmiş en iyi tahribatsız test aleti olduğu kabul edilmektedir. Hafif ve ağır yük altında oluşan defleksiyonlar arasında yük büyüklüğüne bağlı olarak korelasyon ve regresyon denklemi geliştirilmeye çalışılmış, ancak büyük hataların olabileceği ortaya çıkmıştır. Örneğin, bir üstyapı kesimi için geliştirilen ilişkiler başka bir kesime uymayabilmektedir. Hatta aynı kesim için bile, farklı kişiler farklı sonuçlar veren ilişkiler bulmuşlardır (Saltan, 1999).

Birkaç farklı türdeki cihazlar tarafından uygulanan yük büyüklüğü eşit olduğunda bile, yük türleri arasındaki doğal farklılıklar farklı kaplama tepkilerini üretme eğiliminde olacağından, defleksiyon tepkisi farklı olabilir. Bir NDT cihazı ile ilişkili olan yükleme süresi, daha düşük yük darbesi (hızlı araç) daha küçük defleksiyonlar olacak şekilde defleksiyonların değişmesine neden olmaktadır. Örneğin, statik yük cihazları, hareketli tekerlek yükleri ile üretilen defleksiyonlardan anlamlı düzeyde daha fazla defleksiyon üretme eğilimindedirler. Şekil 5.11'de gösterildiği gibi, kararlı durum dinamik defleksiyon cihazları, yükleme sıklığı ile değişmektedir. Darbe yükü defleksiyon

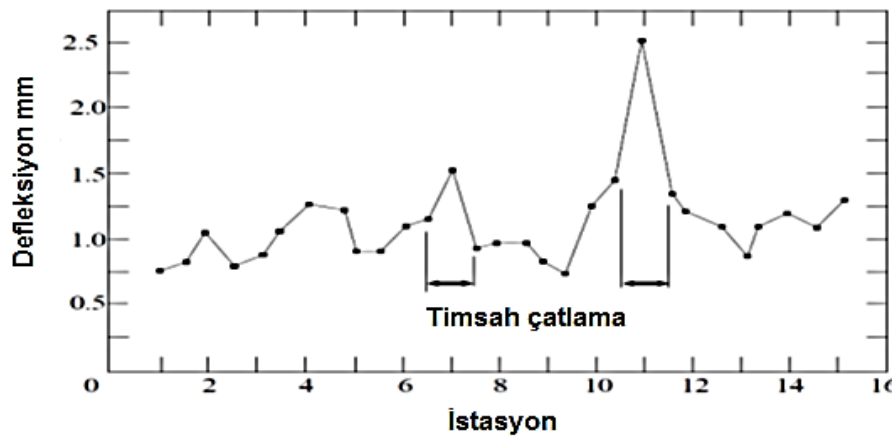
cihazları, hareketli tekerlek yükü tarafından üretilen defleksiyonları daha yakın simüle eden yüzey defleksiyonları üretmektedirler (Peshkin vd., 1998).



Şekil 5.11.Yükleme frekansının defleksiyonla değişimi

5.9.2. Üstyapı durumu

Üstyapı durumu, ölçülen defleksiyonlar üzerinde büyük etkilere sahiptir. Esnek üstyapılarda, çatlaklı ve tekerlek izi olan kısımlardan elde edilen defleksiyonlar, bozulmamış yerlerden elde edilenlere göre normal olarak daha yüksektir (Saltan, 1999). Örnek olarak timsah sırtı çatlak etkisi Şekil 5.12’de görülmektedir.



Şekil 5.12. Esnek üstyapında (40 kN yük) olarak defleksiyona timsah sırtı çatlak etkisi.

Rijit üstyapılarda, beton plakların altındaki boşluklar defleksiyonların artışına sebep olacaktır ve bu durum köşeleri ve derzlerde büyük defleksiyon farkları oluşturur (Saltan, 1999).

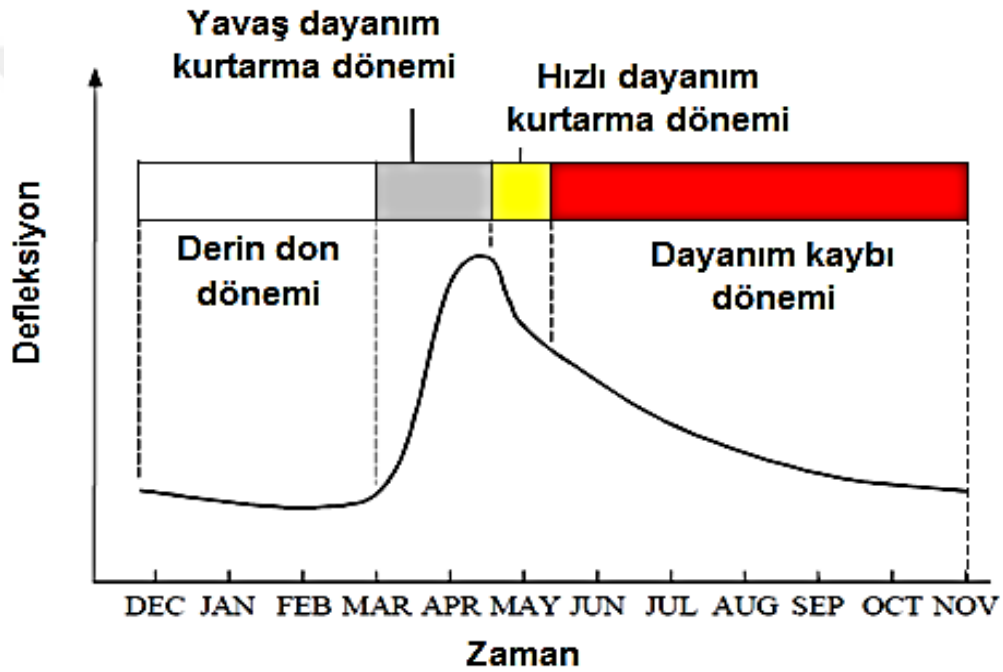
- Kesilen kısımlar, eğim kısımları, dolgu kısımları, alttaki sert (kaya) tabakalarının (özellikle esnek kaplamalar) varlığını işaret eden anlamlı defleksiyonları etkileyebildiğini göstermektedir (Peshkin vd., 1998).
- Sıkıştırma, malzeme özellikleri ve su miktarı gibi faktörlerdeki değişmelerin neden olduğu kaplama rijitliğindeki/dayanımındaki rasgele değişimler, tipik bir proje boyunca yakın aralıklarda (örneğin, 3 m) dahi defleksiyonda yüksek değişmeler ile sonuçlanacaktır. Bir proje boyunca defleksiyon ölçümleri için değişim katsayısı, tipik olarak en az yüzde 20 ila 30 arasındadır (Peshkin vd., 1998).

Üstyapının taban zeminindeki problemler de üstyapının taşıma gücü üzerinde etkili olmaktadır. Taban zeminini dayanımındaki önemli bir azalma bütün üstyapının taşıma dayanımını azaltacak ve böylece üstyapıda bozulmalar olacaktır. Bu durumda üstyapının taban zeminini tehlikeli durumlardan, özellikle su ve nemden korumak gereklidir (Saltan, 1999).

5.9.3. Mevsimsel etkiler

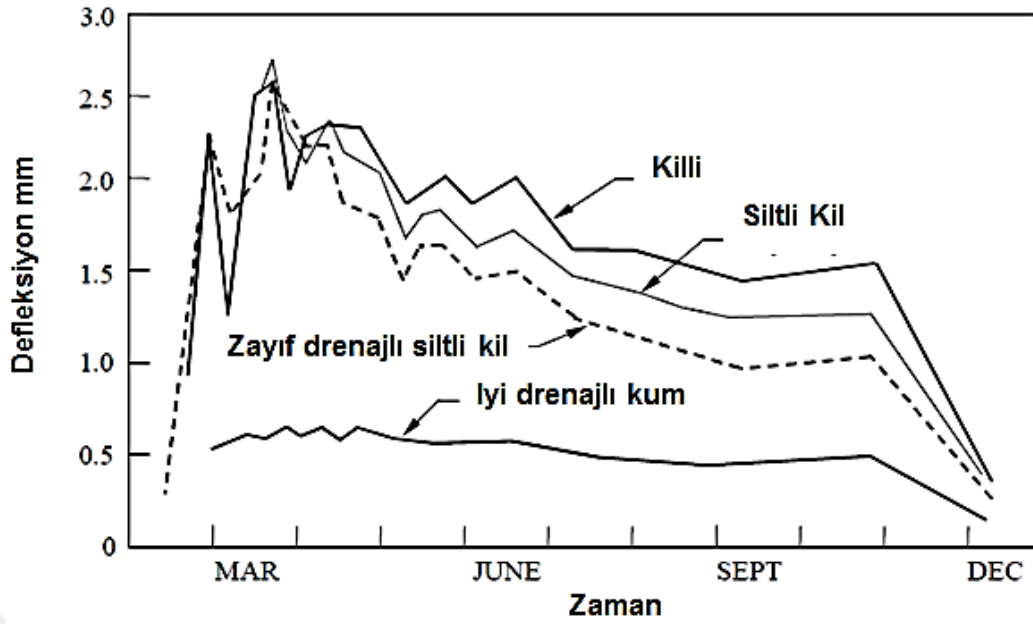
Bir üstyapının yük taşıma kabiliyeti, donma, sıcaklık, nem ve diğer çevresel değişiklikler gibi değişik etkilere göre yıl boyunca değişim gösterir. Üstyapıların yük taşıma kapasitesinde gözlenen değişim, temel olarak sıcaklık ve nemden bir fonksiyonudur. Üstyapı elastisite modülleri mevsimsel değişimlere maruzdur. Genel olarak mevsimsel etkilerin her biri üstyapının yapısal kapasitesini azaltır ve ya artırır. Karayolu üstyapılarının ekonomik olarak projelendirilmesi ve bakım çalışmaları için, sıcaklık ve nem gibi çevresel etkilerdeki değişimleri anlamak üstyapı performansını anlamak için önem kazanmaktadır (Saltan, 1999).

Sıcaklık ve nem değişimleri sırasıyla kıvrılmaya ve yamulmaya neden olmaktadır ve rijit kaplamanın derz ve çatlakları yakınında defleksiyon ölçümleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olmaktadır. Asfalt tabakasının alt tabakaya göre daha soğuk olduğu gece veya sabahın erken saatlerinde alınan ölçümler, asfalt tabakasının alt tabakaya göre daha sıcak olduğu öğlen saatlerinde alınan ölçümlere göre daha yüksek köşe ve kenar defleksiyonlarına neden olmaktadır. Şekil 5.13'te gösterildiği gibi, mevsimlerin bazı iklimsel bölgelerde esnek kaplama defleksiyonları üzerinde büyük bir etkisi vardır (Peshkin vd., 1998).



Şekil 5.13. Üstyapı defleksiyonla sezonun etkisi

Soğuk iklim bölgelerinde dört mevsim vardır: Kaplamanın en fazla dayanıklı olduğu derin bir don döneminde ölçülen defleksiyon en düşük düzeydedir. Donun kaplama/tabana zemini toprak sistemi içerisinde kaybolduğu bir çözülme döneminde defleksiyon büyük ölçüde artar. Eriyen buzdan kaynaklanan fazla su kaplama/tabana zemini toprak yapısını terk ettiği dönemde defleksiyon azalmaktadır. Taban zemini türü de Şekil 5.14'te gösterildiği gibi, defleksiyonları etkileyen mevsimsel iklim faktörleri ile etkileşime girebilir (Peshkin vd., 1998).

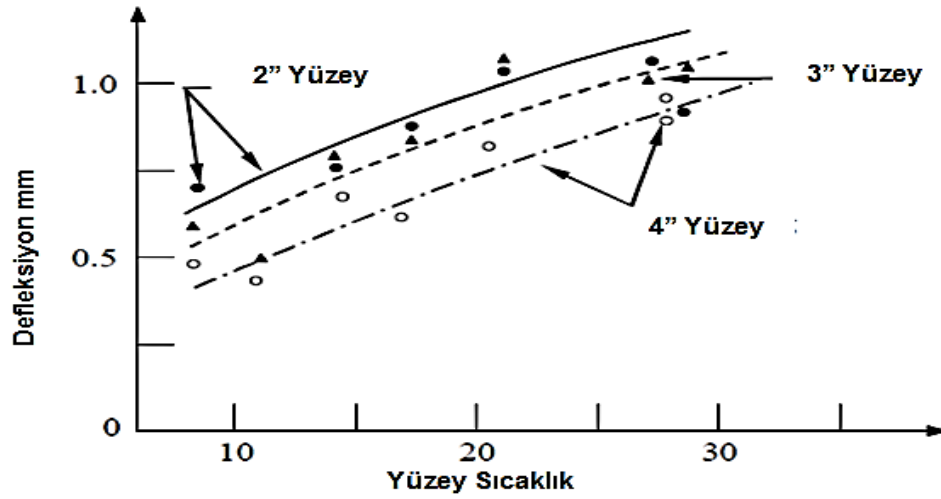


Şekil 5.14. Mevsimlik üstyapı defleksiyonları üzerinde zemin etkisi

Donma-çözülme olaylarının olmadığı bölgelerde yer alan kaplamalardaki defleksiyonlar, önemli ölçüde serbest nemin var olduğu yağmurlu mevsimde meydana gelen en yüksek seviyede defleksiyona sahip düz bir sinüs eğrisini takip etmektedir. Nispeten daha kuru yerlerde, esnek kaplamalar üzerindeki maksimum defleksiyon, asfalt yüzeyinin yüksek sıcaklık ve yoğun güneş ışınlarına bağlı olarak yumuşadığı sıcak yaz aylarında meydana gelebilir (Peshkin vd., 1998).

5.9.3.1. Sıcaklığın etkisi

Sıcaklık, büyük ölçüde esnek kaplama defleksiyonlarını etkilemektedir. Şekil 5.15'te gösterildiği gibi, ortalama Bitümlü Sıcak Karışım (BSK) tabakasının sıcaklığı arttıkça, esnek bir kaplamanın defleksiyonu da artar. Bu durum, BSK modülünde bir azalma ile sonuçlanan yüksek sıcaklıklarda asfalt yumuşamasının bir sonucudur.



Şekil 5.15. Esnek üstyapı defleksiyona sıcaklığın etkisi

Sıcaklık derz ve çatlak yakınındaki rijit kaplama defleksiyonlarını da etkilemektedir. Sıcak havalarda rijit plağı genişler, sıcak havalar derz ve çatlakların sıkılaşmasına neden olur ve daha yüksek derz veya çatlak yük transferi verimliliğini ve düşük defleksiyonları üretir. Böyle dönemlerde alınan defleksiyon ölçümleri yanıltıcı olabilir (Peshkin vd., 1998).

Karayolu esnek üstyapı yüzeyi, asfaltın siyah renginden dolayı güneş ışığını daha çok absorbe etmektedir. Bu durumda bitümlü karışımın mekanik özelliklerine bağlı olarak ölçülen defleksiyon değerini, üstyapı sıcaklığı, yani hava sıcaklığı etkilemektedir. Bitüm kaplamalı üstyapılarda, üstyapıya uygulanan bir yük miktarı için oluşan defleksiyon miktarı, üstyapı sıcaklığının artışıyla artmaktadır. Ancak sadece üstyapı yüzeyi sıcaklığını bilmek yetmez. Çünkü alt tabakalardaki defleksiyonlar da sıcaklıktan etkilenir ve alt tabaka yüzeylerindeki sıcaklıkların da bilinmesi gereklidir. Alt tabaka yüzeylerindeki sıcaklık değerlerini bulmak için bazı ilişkiler geliştirilmiştir. Genelde referans bir sıcaklık değeri kabul edilmiş ve ölçülmüş olan defleksiyon değerleri bu referans sıcaklık değerine göre düzeltilmiştir. Bir tahribatsız defleksiyon ölçümü, ölçüm yapılan zaman dilimi için ve ölçüm alınan şartlar için geçerlidir. Sıcaklık arttığında ya da aniden azaldığında defleksiyon ölçümü takip eden gün ya da hafta için geçerli olmaz. Bu tür durumlarda, ölçülen defleksiyon değerlerini yorumlamak için; ölçümün yapıldığı mevsim, günün hangi vakti olduğu dikkate alınmalıdır (Saltan, 1999).

Genelde defleksiyon ölçümleri 21°C standart sıcaklığa göre düzeltilmektedir. Bu düzeltme işlemi, tahribatsız test metotlarının önemli bir parçasıdır. Ancak yine de sıcaklık çok önemli bir konu olduğu için tahribatsız testlerin, çok sıcak yaz günleri ve/veya direk güneş ışığı altında uygulanmaması gerekmektedir. 35 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda ölçüm alınmaması tavsiye edilmektedir. Bir FWD testi esnasında üstyapı sıcaklığının ölçümü, üstyapı yüzeyinden 40 mm lik bir derinlikte yapılır. 7 mm çapında bir delik açılır. Açılan deliğin içi önce gliserol ile doldurulur ve sonra deliğin içine termometre sokularak sıcaklık okunur. Sıcaklık okumaları arasındaki maksimum süre bir saati geçmemelidir. Ancak hava sıcaklığından üstyapı sıcaklığını elde etmek için bazı ilişkiler de geliştirilmiştir. Meteorolojik verilerden üstyapı sıcaklığını belirlemek ölçüm yapmaya göre daha kolaydır. Örneğin Witczak aşağıdaki gibi bir ilişki geliştirmiştir (Saltan, 1999).

$$T_{üstyapı} = T_{hava} \left(1 + \frac{1}{z + 4} \right) - \frac{34}{z + 4} + 6 \quad (5.3)$$

Burada, z, bitümlü tabakanın derinliği; $T_{üstyapı}$, z derinliği için üstyapı sıcaklığı ve T_{hava} ise, havanın sıcaklığıdır. Yine benzer bir ilişki de Thompson tarafından geliştirilmiştir.

$$T_{üstyapı} = T_{hava} (1.18 - 0.017 z) + 0.76 z - 1.7 \quad (5.4)$$

Buradaki semboller yukarıdakilerle aynıdır.

Genelde yükten en uzak noktalardaki sensörler taban zemininin özelliklerine bağlı olduğu için ve taban zemini sıcaklıktan çok etkilenmediği için bu sensörlerdeki defleksiyon değerleri üzerinde sıcaklığın pek bir etkisi yoktur. Yüke yakın olan ilk dört sensörün sıcaklıktan etkilendiği son üç sensörün etkilenmediği söylenmektedir. Özellikle yedinci sensörde ölçülen defleksiyon değerinin tamamıyla taban zemininin özelliğini yansıttığı kabul edilmektedir. Ayrıca yapılan çalışmalarda taban zemini modülü ile yedinci sensör defleksiyon değeri arasında lineer bir ilişki bulunmuştur (Saltan, 1999).

5.9.3.2. Nemin etkisi

Bir üstyapıdaki nemlilik durumu aslında oldukça karmaşıktır. Nemliliği pek çok parametre etkilemektedir. Yağış, buharlaşma, sızma bunlardan en önemli olanlarıdır. Eğer yol üstyapı yüzeyi çok kaliteli yapılmışsa üstyapı yüzey sularından zarar görmez. Ancak yer altı suyu yükselerek üstyapıya zarar verebilir. Bir zemin karışımının özelliklerinin diğer sebeplere göre nem içeriğinden daha çok etkilendiği karayolu ve zemin mühendislerinin aralarında uyuştukları bir noktadır. Eğer nem yüzdesi değişirse, belirli nem şartları altında belli dayanım ve taşıma gücüne sahip olan zeminler yetersiz kalabilir (Saltan, 1999).

Temel ve taban zemininin nem içeriğini etkileyen faktörler; zemin taneciklerinin büyüklüğü ve şekli, boşluk yapısı, yeraltı su durumu, yağış şartları ve düşen kar ve yağmur miktarlarıdır. Kısmen doymuş zeminlerdeki nem miktarı, danecikleri çevreleyen su filmindeki çekme kuvvetiyle partikülleri birbirine bağlayarak zeminin performansı üzerinde büyük bir etki yapmaktadır. Kumlu zeminlerde çekme kuvveti nispeten azdır, fakat özellikle killerde oldukça fazladır. Taban zeminindeki nem içeriği dayanım üzerinde büyük bir etki göstermektedir. Defleksiyondaki değişim yüzdesi, önemli miktarda taban zeminindeki nem değişimine bağlıdır. Üstyapıların projelendirilmesinde, durumunun belirlenmesinde ve bakım çalışmalarında nem içeriğinin büyük etkisi dikkate alınmalıdır (Saltan, 1999).

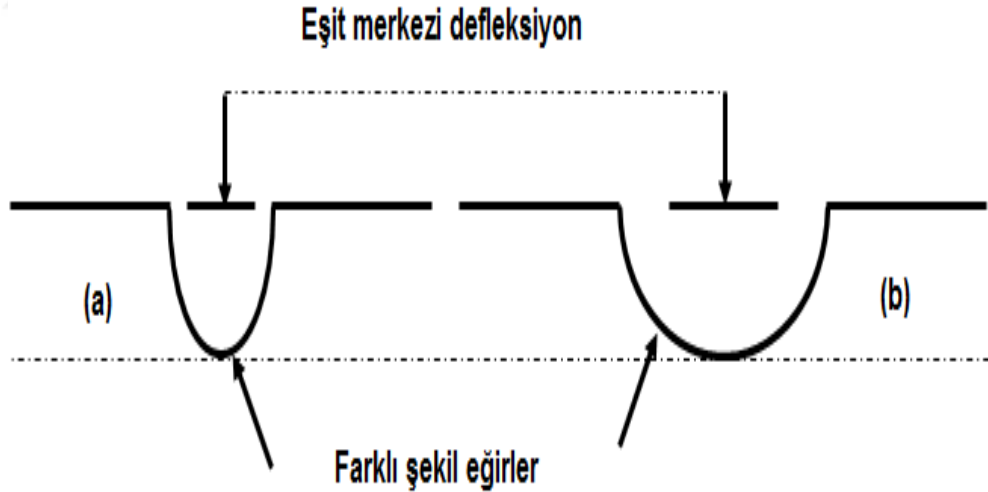
5.9.4. Defleksiyon eğrisi

Bir üstyapı düşey bir yüzey yüklemesine maruz kaldığı zaman üstyapının deforme olmuş şekli bir defleksiyon eğrisi olarak bilinir. Üniform dairesel olarak yüklenmiş tabakalı bir üstyapıda oluşan defleksiyon değerlerinin radyal olarak simetrik özelliği vardır. Ayrıca radyal eksen boyunca defleksiyon değerleriyle ifade edilebilir. Genelde, yük merkezinden uzak olan defleksiyonlar taban zemini davranışını ortaya koyarken, yük merkezine yakın olan defleksiyonlar bütün üstyapının durumunu ortaya koymaktadır. Defleksiyon eğrisinin derinliği

taban zemininin taşıma gücü hakkında, eğrinin konkavlığı da tabakaların dayanımları hakkında bilgi vermektedir. Ölçülen bir yüzey defleksiyonları grubundan üstyapı tabakalarının elastisite modüllerini belirleme işlemine “Geri-hesaplama (Backcalculation)” denilmektedir (Saltan, 1999).

Düşen ağırlıklı deflektometre, sadece test yükü altındaki defleksiyonu ölçmez, aynı zamanda bu yük altında ve etrafındaki bütün defleksiyon eğrisi hakkında bilgi sağlar. Aynı derinlikte defleksiyon eğrileri geniş ya da dar bir şekle sahip olabilir. Geniş bir şekil zayıf bir taban zeminini ortaya çıkaracaktır. Halbuki dar bir şekil üstyapıdaki daha üst tabakaların zayıf olduğunu göstermektedir. Bu duruma daha yukarıdaki asfalt betonu tabakalarındaki yüksek sıcaklıklar sebep olmaktadır. Bu durum merkez ve merkez yakınında daha yüksek defleksiyonlara sebep olmaktadır (Saltan, 1999).

Aynı derinlikte defleksiyon eğrileri geniş ya da dar şekle sahip olabilir. Bu durum Şekil 5.16’da gösterilmiştir.



Şekil 5.16. Aynı derinlikte farklı şekil eğrisi, a) dar eğri, b) geniş eğri

Eğer asfalt tabakası daha düşük kalitede ya da çatlaklı ise benzer bir etki gözlemlenebilir. Yani, geniş şekil, zayıf bir taban zemini ve/veya yumuşak alt tabakalar demektir. Dar şekil ise, yumuşak üst tabakalar demektir. Farklı defleksiyon eğrisi şekilleri. Üst tabakaların zayıf olması durumunda defleksiyon

eğrisinin yük altında oldukça büyük değerlere ulaştığı görülmektedir. Yükten uzaklaştıkça eğim miktarı düşmektedir. Taban zemini zayıf, üstyapı dayanıklı ise, yaklaşık üniform bir eğim söz konusudur. Üst tabakalar güçlendikçe, eğim miktarı düşmektedir (Saltan, 1999).



6. ADAPTİF SİNİR AĞINA DAYALI BULANIK ÇIKARIM SİSTEMİ (ANFIS)

6.1. Genel Bakış

Günümüzde geleneksel yöntemlere alternatif olarak çeşitli problemlerin çözümünde, akıllı sistemler kullanılmaktadır. Bulanık mantık ve sinir ağları, akıllı sistemlerin geliştirilmesinde birlikte kullanılan tamamlayıcı araçlardır (Hocaoglu ve Kurban, 2013).

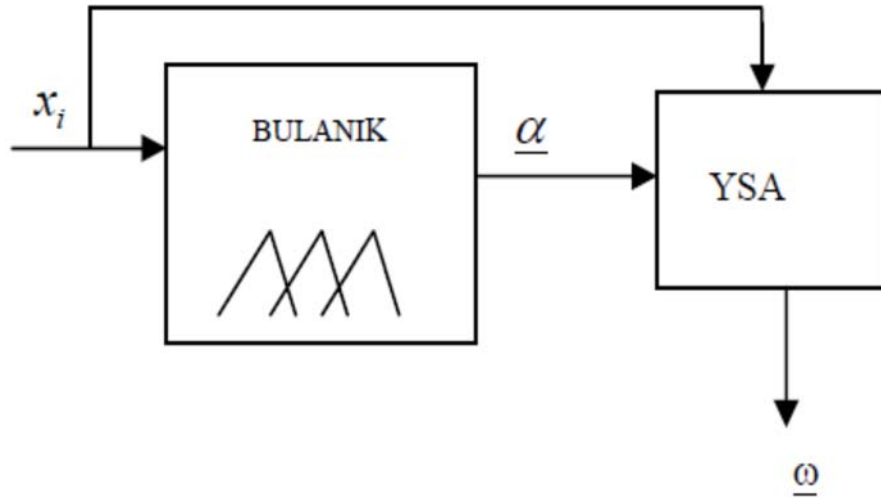
Bulanık sistemler, genel anlamda, giriş değişkenlerinden çıkış değişkenlerine dönüşümü sağlamak amacıyla bulanık kümeleri kullanan sistemlerdir. Bulanık çıkarım sistemlerinde kural tabanında kullanılan bulanık kuralların sonuç kısımları yardımıyla bulanık sistemleri ikiye ayırmak mümkündür; mamdani ve takagi-sugeno-kang (TSK). Parametreleri optimize edilen sugeno tipi bulanık çıkarım sistemlerine, adaptif sinir ağına dayalı bulanık çıkarım sistemi (ANFIS) adı verilir (Karamanoğlu vd. 2010). ANFIS kelimesi (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System)'in baş harflerinden oluşmaktadır. ANFIS sadece sugeno tipi modelleri çalıştırmaktadır. Sugeno tipi modelleme 1985 yılında sunulmuştur. Mamdani tipi modellemenin modifikasyonu şeklindedir ve giriş verilerine uygulanacak işlemler aynıdır. Tek farklılıkları çıktı verilerinde bulunmaktadır. Sugeno tipi modellemede çıktı değişkenleri girdilerin bir fonksiyonu şeklinde üyelik fonksiyonlarına sahip olmaktadır ve çıktı üyelik fonksiyonları lineer veya sabit olmak zorundadır (Çakıroğlu vd., 2011).

6.2. Adaptif Ağ Yapılı Bulanık Çıkarım Sistemi

Yapısı karmaşık, nonlinear sistemler için yapay sinir ağlarından istifade edilerek gerçekleştirilen çalışmalardan, başarılı sonuçlar alınmıştır. Uyarlanır (adaptif) bulanık sistemlerin kullanılmasıyla gerçekleştirilen, modelleme ve denetim uygulamaları da literatürde geniş bir biçimde yer almaktadır. Bu nedenle bulanık sistemlerin etkinliğinin artırılmasında, uyarlama tekniğinin katkısını sağlamaya yönelik çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bunlardan biri, işleyişi adaptif ağ yapısı içerisinde gerçekleşen, bulanık bir modelle (ANFIS)

gerçekleştirilmesidir. ANFIS yöntemi Jang tarafından 1993 yılında önerilmiştir. Çalışmasında bulanık çıkarım sistemine fonksiyonel olarak eşit olan bir uyarlamalı ağ oluşturmayı amaçlamıştır (Dülger, 2013).

ANFIS, bulanık mantık ve sinir ağları, akıllı sistemlerin geliştirilmesinde birlikte kullanılan tamamlayıcı araçlardır. Bu sistem genel hatları ile Şekil 6.1’de görüldüğü gibi tanımlanabilir. Yapay sinir ağları, ham verilerle uğraşıldığında iyi sonuçlar veren düşük seviyeli yapılardır. Bulanık mantık ise, uzman görüşü sonucu elde edilen dilsel bilgileri kullanarak daha yüksek seviyeli sonuçlar çıkarmaktadır. Aslında bulanık sistemlerin öğrenme kabiliyeti yoktur ve kendilerini yeni çevreye adapte edemezler. Diğer yandan yapay sinir ağları öğrenme kabiliyetine sahiptir; fakat kullanıcı tarafından anlaşılmazlar (Çakıt, 2008).



Şekil 6.1. ANFIS bulanık mantık ve sinir ağları sistemi

Sinirsel bulanık sistemler, yapay sinir ağlarının paralel hesaplayabilme ve öğrenme kabiliyeti ile bulanık mantığın uzman bilgisini kullanarak sonuçlar çıkarabilme özelliklerinin birleşiminden oluşur. Sonuç olarak sinirsel bulanık sistemler sayesinde yapay sinir ağları daha anlaşılır hale gelir (Çakıt, 2008).

6.3. Adaptif Sinir Ağına Dayalı Bulanık Çıkarım Sistemi Görevi

ANFIS yalnızca görev tahmini ya da tek çıktılı doğrusal olmayan fonksiyonların tahmininde kullanılabilir. ANFIS modelinde temel amaç kullanılan parametreleri optimize etmektir (Berber ve Boru, 2013).

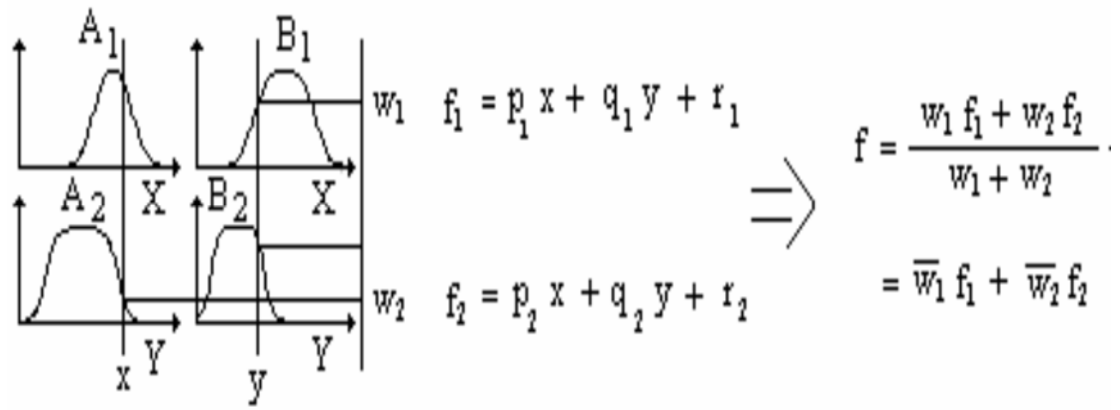
ANFIS temel olarak “bulanık çıkarım sistemi”nin adaptif ağlara uyarlanmış halidir. Melez öğrenme algoritması ile birlikte ANFIS, bulanık eğer-ise kuralları ile insan bilgisini yansıtan girdi çıktı yapısını ortaya koymaktadır. Matlab yazılımındaki bulanık mantık modülü’nde bir kullanıcı arayüzü (ANFIS editor) aracılığı ile kullanılmaktadır. ANFIS yönteminin uygulanabilmesi için elde girdi ve çıktıya dayanan bir veri setine ihtiyaç duyulmaktadır. Seçilen üyelik fonksiyon adedi ve tipine bağlı olarak kurulan model melez öğrenme algoritması kullanılarak eğitilmektedir (Berber ve Boru, 2013).

Daha önce de açıklandığı gibi, ANFIS yapısı, sugeno tipi bulanık sistemlerin, sinirsel öğrenme kabiliyetine sahip bir ağ yapısı olarak temsilinden ibarettir. Bu ağ, her biri belli bir fonksiyonu gerçekleştirmek üzere, katmanlar halinde yerleştirilmiş düğümlerin birleşiminden oluşmuştur. Bulanık çıkarım sistemini, x ve y gibi iki girişi ve f gibi bir çıkışı olduğunu farz ederek ele alalım. İki tane bulanık eğer-ise kuralı bulunan, birinci dereceden sugeno bulanık modeli için tipik kural kümesi (Çakıroğlu vd., 2011):

Kural 1: eğer x A1 ve y B1 ise o halde $f_1=p_1x+q_1y+r_1$

Kural 2: eğer x A2 ve y B2 ise o halde $f_2=p_2x+q_2y+r_2$

şeklinde ifade edilir. Şekil 6.2’de sugeno bulanık modeli için bulanık akıl yürütme mekanizması görülmektedir (Çakıroğlu vd., 2011).



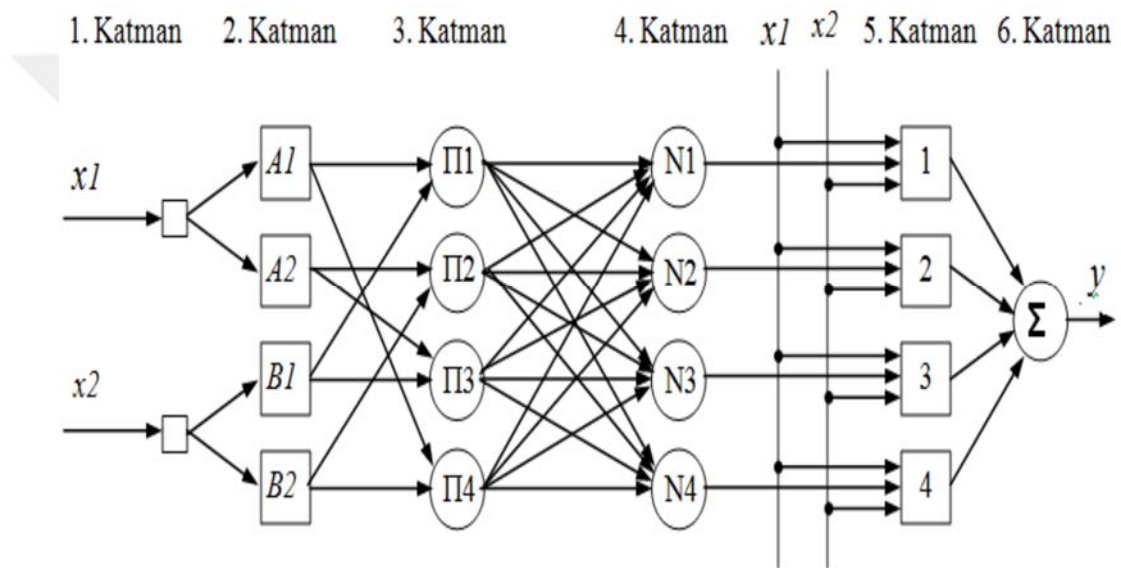
Şekil 6.2. Sugeno bulanık modeli için bulanık çıkarım sistemi (Çakıroğlu vd., 2011)

ANFIS'in, yapısında hem yapay sinir ağları hem de bulanık mantık kullanılır. Yapı bakımından ANFIS, bulanık çıkarım sistemindeki eğer-ise kuralları ve giriş çıkış bilgi çiftlerinden oluşur. ANFIS, ele alınan problem için oluşturulan yapıya göre olası tüm kuralları atayabilmekte veya kuralların veriler yardımıyla uzman tarafından atanmasına izin vermektedir. ANFIS'in kural oluşturabilmesi veya kural oluşturulmasına imkân sağlaması uzman görüşlerinden faydalanması anlamına gelmektedir. Bu nedenle birçok tahmin probleminde yapay sinir ağlarına uzman görüşlerinden faydalanma imkânı tanıdığı için ortalama hata kareler kriterine göre daha iyi sonuçlar elde edilmesini mümkün kılmaktadır. ANFIS'in öğrenme algoritması, en küçük kareler yöntemi ile geri yayımlı öğrenme algoritmasının bir arada kullanılmasından oluşan melez öğrenme algoritmasıdır (Belen ve Kaya, 2011).

ANFIS elde bulunan girdi setine göre üyelik fonksiyonun seçiminde çeşitli seçenekler (üçgen üyelik fonksiyonu, yamuk üyelik fonksiyonu, gauss kombinasyon üyelik fonksiyonu, genelleştirilmiş çan eğrisi üyelik fonksiyonu vb.) sunmaktadır (Akı ve Karasulu, 2014).

6.4. Adaptif Sinir Ağına Dayalı Bulanık Çıkarım Sistemi Yapısı

Sinirsel bulanık sistemler yapay sinir ağları ve bulanık mantığın avantajlarını bir araya getirmiştir. Öğrenme bulanık mantık için bir avantaj olurken, bilgi tabanlı yapı da yapay sinir ağları için artı bir yöndür. Sinirsel bulanık sistemlerden birisi de ANFIS'dir ve sinirsel-bulanık kontrol mekanizmaları tasarlamak için kullanılır. ANFIS 6 katmandan oluşmaktadır. Bu sistem Şekil 6.3'te gösterilmiştir. ANFIS yapısındaki her katmana ait düğüm işlevleri ve katmanların isleyişi sırasıyla şöyledir (Gedik, 2011):



Şekil 6.3. Tipik bir ANFIS mimarisi

- Katman 1, Giriş katmanı olarak adlandırılmaktadır. Bu katmandaki her düğümden alınan giriş sinyalleri diğer katmanlara aktarılır.
- Katman 2, Bulanıklaştırma katmanı olarak adlandırılır. Giriş değerlerini bulanık kümelerle ayırmada Jang'ın ANFIS modeli, üyelik fonksiyonu şekli olarak genelleştirilmiş Bell aktivasyon fonksiyonunu kullanmaktadır. Burada, her bir düğümün çıkışı, giriş değerlerine ve kullanılan üyelik fonksiyonuna bağlı olan üyelik derecelerinden oluşmaktadır ve 2. Katmandan elde edilen üyelik dereceleri $\mu_{A_j}(x)$ ve $\mu_{B_j}(y)$ şeklinde gösterilir.

- Katman 3, kural katmanıdır. Bu katmandaki her bir düğüm, sugeno bulanık mantık çıkarım sistemine göre oluşturulan kuralları ve sayısını ifade etmektedir. Her bir kural düğümünün çıkışı μ_i , 2. Katmandan gelen üyelik derecelerinin çarpımı olmaktadır. μ_i değerlerinin elde edilişi ise, ($j=1,2$) ve ($i=1,...,n$) olmak üzere,

$$y_i^3 = \Pi_i = \mu_{A_j}(X) \times \mu_{B_j}(Y) = \mu_i \quad (6.1)$$

şeklindedir. Burada, y_i^3 , 3. Katmanın çıkış değerlerini; n ise, bu katmandaki düğüm sayısını ifade etmektedir.

- Katman 4, normalizasyon katmanıdır. Bu katmandaki her bir düğüm, kural katmanından gelen tüm düğümleri giriş değeri olarak kabul etmekte ve her bir kuralın normalleştirilmiş ateşleme seviyesini hesaplamaktadır. Normalleştirilmiş ateşleme seviyesi $\bar{\mu}_i$ 'nin hesaplanması ise,

$$y_i^4 = N_i = \frac{\mu_i}{\sum_{i=1}^n \mu_i} = \bar{\mu}_i \quad (i = 1, n) \quad (6.2)$$

formülüne göre gerçekleştirilir.

- Katman 5, arındırma katmanıdır. Arındırma katmanındaki her bir düğümde verilen bir kuralın ağırlıklandırılmış sonuç değerleri hesaplanmaktadır. 5 katmandaki i . düğümün çıkış değeri ise,

$$y_i^5 = \bar{\mu}_i [p_i x_i + q_i x_i + r_i] \quad (i = 1, n) \quad (6.3)$$

Buradaki (p_i, q_i, r_i) degiskenleri, i . kuralın sonuç parametreleri kümesidir.

- Katman 6, toplam katmanıdır. Bu katmanda sadece bir düğüm vardır ve Σ ile etiketlenmiştir. Burada, 5. katmandaki her bir düğümün çıkış değeri toplanarak sonuçta, ANFIS sisteminin gerçek değeri elde edilir. Sistemin çıkış değeri olan y 'nin hesaplanması ise,

$$y_i^5 = \sum \bar{\mu}_i [p_i x_i + q_i x_i + r_i] \quad (6.4)$$

buradaki (p_i, q_i, r_i) degiskenleri, i. kuralın sonuç parametreleri kümesidir.

6.5. ANFIS Tasarımcı Penceresi

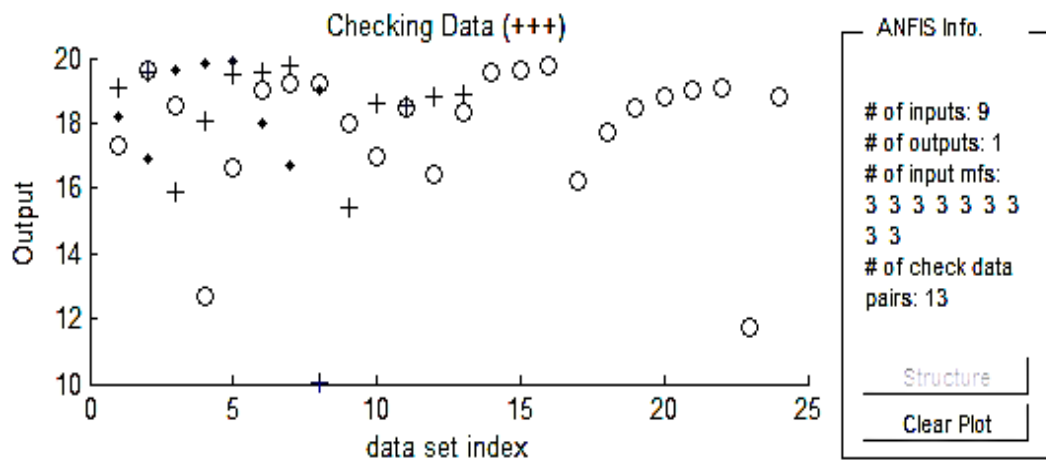
ANFIS Tasarımcı penceresi, tipik bir iş akışını desteklemek için bir pilot bölgeyi ve dört ayrı alanı içermektedir. Tasarımcı aşağıdaki görevleri gerçekleştirmenizi sağlar:

- Veri Yükleme ve Temizleme
- Başlangıç FIS Yapısını Üretme veya Yükleme
- FIS Eğitimi
- Eğitilen FIS'in Doğrulanması

6.5.1. Pilot bölge

Bölgede dört tip sembol aşağıdaki gibi bulunmuştur:

- Test verisi pilot üzerinde mavi renkte • • • • • olarak belirir
- Eğitim verisi pilot üzerinde mavi renkte o o o o o olarak belirir
- Kontrol verisi pilot üzerinde mavi renkte + + + + olarak belirir
- FIS çıktısı pilot üzerinde kırmızı renkte □ □ □ □ □ olarak belirir. Pilot Bölge Şekil 6.4'te gösterilmiştir.



Şekil 6.4. Pilot bölge

6.5.2. Tipik bir iş akışını desteklemek için farklı alanlar

Tipik bir iş akışını desteklemek için dört ayrı alanı içermektedir. Tasarımcı aşağıdaki görevleri gerçekleştirmeyi sağlar:

6.5.2.1. Veri yükleme ve temizleme

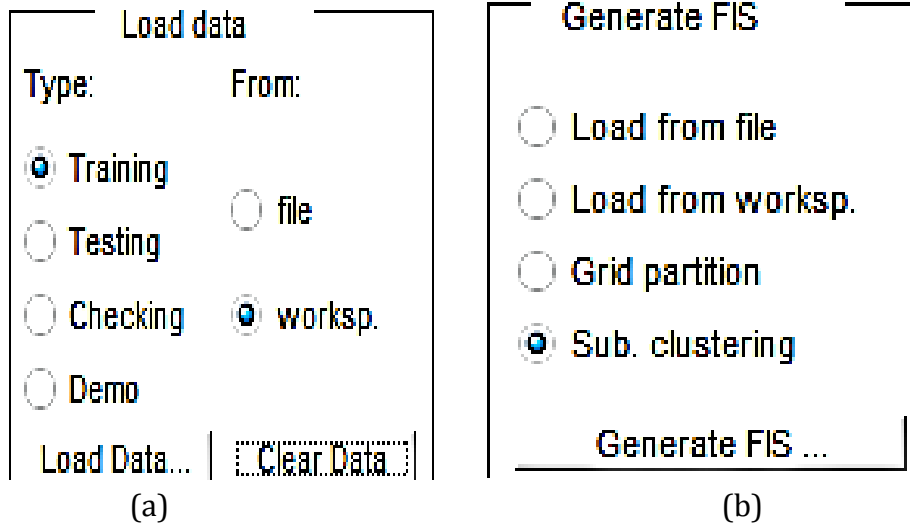
Bir FIS modelini eğitmek için, modellenen olan sistemin istenen girdi/çıkış verilerini içeren bir Eğitim veri setini yükleyerek işe başlanılmalıdır. Yüklenen herhangi bir veri seti, sütun vektörleri ve son sütunda çıkış verileri olarak düzenlenen veriye sahip bir dizi olmalıdır. Ayrıca, tasarımcı içerisinde Test ve Kontrol verileri de yüklenebilir. Veri yükleme ve temizleme alanı Şekil 6.5.a'da gösterilmiştir.

6.5.2.2. Başlangıç FIS yapısını üretme veya yükleme

FIS eğitime başlamadan önce, bir başlangıç FIS model yapısını mutlaka belirtmek gerekir. Model yapısını belirtmek için şu görevlerden birisi gerçekleştirilir: Önceden kaydedilmiş olan bir Sugeno tipi FIS yapısını bir dosyadan veya MATLAB çalışma alanından yükleyin ve başlangıç FIS modelini aşağıdaki bölümlerle tekniklerinden birisi seçilerek üretin:

- Grid bölümlerle- Veri üzerinde grid bölümlerini kullanarak tek-çıkışlı Sugeno-tipi FIS üretir
- Çıkarmalı kümeleme - Veri üzerinde ilk olarak çıkarmalı kümelemeyi uygulayarak ANFIS eğitimi için bir başlangıç modeli üretir.

Başlangıç FIS model yapısının üretme alanı Şekil 6.5.b'te gösterilmiştir



Şekil 6.5.a) Veri yükleme alanı, b) FIS Yapısını üretmesi alanı

6.5.2.3. FIS'in Eğitimi

Eğitme verilerini yükledikten ve başlangıç FIS yapısını oluşturduktan sonra, FIS eğitime başlanabilir. Aşağıdaki adımlar FIS'in nasıl eğitileceğini göstermektedir.

- Optimizasyon Yönteminde hibrit ya da geri yayılımı, optimizasyon yöntemi olarak seçilmektedir. Optimizasyon yöntemleri, eğitme verilerini benzetmek için üyelik fonksiyonu parametrelerini eğitmektedir (Hibrit optimizasyon yöntemi en küçük kareler ile geri yayılım gradyan çıkarma yönteminin bir kombinasyonudur).
- Eğitim Dönem sayısı ve eğitim Hata Toleransı eğitimin durma kriterlerini belirlemek için girilir. Maksimum dönem sayısına ulaşıldığında veya eğitim hata hedefi elde edildiğinde eğitim süreci durur.
- FIS eğitimi için Eğitime Başlaya tıklanır. FIS Eğitimi Şekil 6.6.a'da gösterilmiştir.

6.5.2.4. FIS'in Doğrulanması

FIS eğitildikten sonra, FIS'i eğitmek için kullandığınız veriden farklı olan bir Test veya Kontrol verisini kullanarak modeli doğrulayın. Eğitilen FIS doğrulanması için:

- Doğrulama veri seti seçilir ve Veri Yükleme tıklanır.
- Teste Başla tıklanır. Eğitilen FIS doğrulaması Şekil 6.7.b'de gösterildiği gibi yapılır.

Train FIS

Optim. Method:

backpropa ▼

Error Tolerance:

0

Epochs:

300

Train Now

Test FIS

Plot against:

☐ Training data

☒ Testing data

☐ Checking data

Test Now

(a)

(b)

Şekil 6.6.a) FIS Eğitimi alanı, b) FIS'in Doğrulaması alanı

7. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Bu bölümde önceden elde edilen verileri (tabaka sayısı, yük tekrar sayısıdır, BSK1 tabakası elastisite modülü, BSK2 tabakası elastisite modülü, temel tabakası elastisite modülü, taban zemini elastisite modülü, BSK1 tabakası kalınlığı, BSK2 tabakası kalınlığı, temel tabakası kalınlığı) Adaptif Sinir Ağına Dayalı Bulanık Çıkarım Sistemi (ANFIS) ile bir modeli yapılacaktır. Bu model ile esnek üstyapı kalan ömrü tahmin edilecektir. Veriler, Arkansas'ta Esnek Kaplamaların Kalan Ömrünü Tahmin Modellerinin Kalibrasyonu çalışmasından alınmıştır(Dennis vd., 2012).

Çalışma da 16 farklı yer incelenmiştir ve her testte iki çeşit yükleme durumu için veri alınmıştır. Veriler aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

- Tabaka sayısı, asfalt karot için görsel inceleme yoluyla elde edilmiştir.
- Trafik izleme verileri, Arkansas State Highway and Transportation Department (AHTD)'tan elde edilmiştir.
- BSK, temel ve taban zemini tabakası için elastisite modülü, tahribatlı ve tahribatsız testleri ile elde edilmiştir.
- BSK ve temel tabakasının kalınlığı, tahribatlı ve tahribatsız testleri ile elde edilmiştir.

7.1. Esnek Üstyapı Kalan Ömür Hesaplaması

Kalan ömrü hesaplamak için önemli parametrelerin, tabaka elastisite modüllü değerleri, trafik verileri, tabakaların kalınlıkları ve başka parametreleri gibi bulunması gerekmektedir. Bitümlü tabakanın en alt kısmındaki maksimum yatay çekme şekil değiştirmesi (maksimum yatay çekme şekil değiştirmesi toplam asfalt tabakasının altında hesaplanmalıdır) ve taban zeminindeki maksimum basınç şekil değiştirmesi (maksimum basınç şekil değiştirmesi (0.0001 in) temel ve taban zemini tabakasının arayüzü altında hesaplanmalıdır) hesaplanması gerekir. Bunun için bir elastik tabaka programı (KENLAYER) kullanılmaktadır.

Dingil yükü uygulamaları tekrar sayısının izin verilen miktarının hesaplanması, bitümlü tabakadaki yorulma ve taban zemini düşey şekil değiştirme (kalıcı deformasyon) değeri hesaplanmaktadır. Bunun için iki denklem vardır (Asphalt Institute ye göre) :

➤ Yorulmaya göre:

$$N_f = f_1 * (\epsilon_t)^{-f_2} * (E_{AC})^{-f_3} \quad (7.1)$$

➤ Deformasyona göre ise:

$$N_r = f_4 * (\epsilon_c)^{-f_5} \quad (7.2)$$

Burada: N_f , N_r yorulma ve deformasyon için izin verilen standart yükü tekrar sayısıdır. ϵ_t Bitümlü tabaka altındaki maksimum yatay çekme şekil değiştirmesidir. E_{ac} Asphalt tabaksının elastisite modülüdür. ϵ_c Taban zemini üstündeki basınç şekil değiştirmesidir. f_1, f_2, f_3, f_4 ve f_5 katsayılarıdır, genellikle alan performans verileri, yol testleri ve laboratuvar testlerinden tespit edilmiştir. Burada katsayıların değeri (0.0796, 3.291, 0.854, 1.365 E-9, 4.477) sırasıyla kullanılmaktadır, değerler Asphalt Institute den alınmıştır.

N_f , N_r değerlerine bağlı olarak yorulma ömrü ve deformasyon ömrü yukarda verilen formüller yardımıyla hesaplanır. Bu ömrü değerlerinden kritik olanı, yani küçük olanı üstyapı ömrü olarak kabul edilir.

Zarar oranını hesaplamak için uygulamalı yük ve izin verilen sayısının oranı olarak tanımlanmıştır. Zarar oranı hesaplamasında aşağıdaki denklem kullanılmaktadır.

$$D = N/N_{f,r} \quad (7.3)$$

Burada, D, üstyapı için zarar oranı; N, uygulamalı yük; $N_{f,r}$, yorulma veya deformasyon için izin verilen standart yük tekrar sayısıdır.

Kalan ömrü hesaplamak için aşağıdaki denklem kullanılmaktadır

$$KÖ = (1 - D). Y \quad (7.4)$$

Burada, KÖ, kalan ömrü; D, Zarar oranı; Y, Üstyapı tasarım ömrüdür. Bu çalışma sırasında tüm üstyapılar için 20 yıl kullanılmaktadır. Burada iki varsayım var:

- Üstyapı tasarım ömrü için 20 yıl kullanılmaktadır
- Zarar oranı ile kalan ömür için lineer dağılım kabul edilmektedir.

Esnek Üstyapı Kalan Ömrü Hesaplamak için (Casa G) yeri örnek olarak alınmıştır, analizde KENLAYER programı kullanılmıştır. KENLAYER’de kullanılan parametreler, 4.23 inçlik bir temas yarıçapına, 80 psi lastik basıncına ve 13.5 inçlik bir tekerlek aralığına sahip olan çift lastikli standart bir 8.2 ton tek dingilli yük kullanılarak asfalt tabakasının altındaki çekme şekil bozulmasını hesaplamak için kullanılmıştır. Bu yükleme parametreleri KENLAYER tarafından önerilen parametrelerdir.

Analizler için kritik çekme şekil değiştirmesi, asfalt tabakasının altında hesaplanmıştır. Asfalt tabakasının tabanındaki çekme şekil değiştirmesi; ilki tek bir tekerlek merkezinin altındaki nokta, ikincisi tekerleğin kenarındaki nokta ve üçüncüsü de iki tekerlek arasındaki orta nokta olmak üzere üç noktada hesaplanmıştır. BSK, temel ve taban zemini tabakaları için Poisson oranlarının değerleri sırasıyla 0.35, 0.35 ve 0.40 alınmıştır.

Uygulama KENLAYER programı tamamladıktan sonra aşağıdaki sonuçları elde edilmiştir (Şekil A.9).

- Bitümlü tabakanın en alt kısmındaki maksimum yatay çekme şekil değiştirme değeri (ϵ_t) $1,18E-04$ olarak hesaplanmıştır.
- Taban zeminindeki maksimum basınç şekil değiştirme değeri (ϵ_c) $3,27E-04$ olarak hesaplanmıştır.
- Yorulmaya göre dingil yükü uygulamaları tekrar sayısının izin verilen miktarı (N_f) $5,21E+06$ olarak hesaplanmıştır.

- Deformasyona göre dingil yükü uygulamaları tekrar sayısının izin verilen miktarı (N_r) $5,51E+06$ olarak hesaplanmıştır.
- N_f ve N_r değerleri Denklem 7.1 ve 7.2 yardımıyla hesaplanmıştır N_f ve N_r değerlerine bağlı olarak yorulma ve deformasyon ömrüdür. Bu ömür değerlerinden kritik olanı, yani küçük olanı üstyapı ömrü olarak kabul edilir, örnekte küçük değer olarak N_f bulunmuştur.
- Zarar oranı değeri (D) $0,0883$ olarak hesaplanmıştır. Bu hesaplama için Denklem 7.3 kullanılmıştır.
- Üstyapının kalan ömrü ($KÖ$) $18,23$ yıl olarak hesaplanmıştır. Bu hesaplama için Denklem 7.4 kullanılmıştır.

Ek A'da KENLAYER programının penceresi, KENLAYER programının girdileri ve çıktıları ($N_f, N_r, \epsilon_t, \epsilon_c, D$) değerlerini ve KENLAYER programının sonucu görülmektedir.

Maksimum hesaplanan şekil değiştirmesi analizde kullanılmıştır. Kritik şekil değiştirmesinin tayini için seçilen parametreler Çizelge 7.1'de tüm kaplamalar için gösterilmiştir. Kaplamalar, 4 tabaka için 2 bitümlü sıcak karışım (BSK), temel ve taban zemini tabakaları, 3 tabaka için BSK, temel ve taban zemini tabakaları ve 2 tabaka için BSK ve taban zemini tabakaları şeklinde 2-3-4 tabaka kaplama sistemi olarak analiz edilmiştir. BSK, temel ve taban zemini tabakaları için Poisson oranlarının değerleri sırasıyla $0.35, 0.35$ ve 0.40 alınmıştır.

Tabaka sayısı, yük tekrar sayısı (N), BSK, temel, taban zemininin elastisite modülü ($E_{AC}, E_T, E_{T.Z}$) ve kalınlığı (T_{AC}, T_T) değerleri, KENLAYER ile maksimum yatay çekme (ϵ_t) ve taban zeminindeki maksimum basınç (ϵ_c) şekil değiştirmesi değerleri, Dingil yükü uygulamaları tekrar sayısının izin verilen miktarının Yorulmaya göre(N_f) ve Deformasyona göre(N_r) değerleri ve üstyapının kalan ömrü ($KÖ$) değerleri Çizelge 7.1'de gösterebilir.

Çizelge 7.1. KENLAYER de kullanılan parametreleri

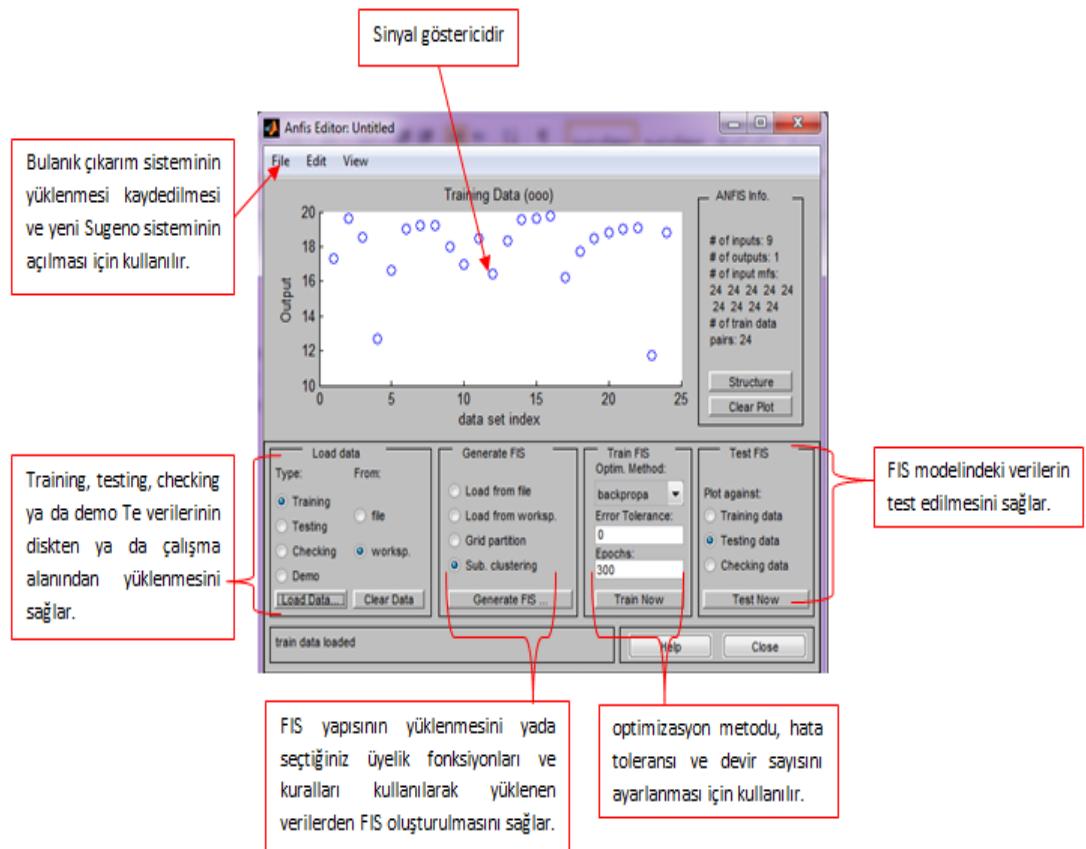
Say	Tabaka sayısı	elastisite modülü (psi)				Tabaka kalınlığı (in)			Fiili yük (say)		Şekil değiştirmesi		Tekrar sayısının izin verilen (say)		Kalan ömrü (Yıl)	
		BSK1	BSK2	Tem.	T.Z	BSK1	BSK2	Tem	1	2	Et	Ec	Nf	Nr	Yük1	Yük2
Casa G	3	976000	-	15640	9340	6.75	-	6	460115	525845	1,18E-04	3,27E-04	5,21E+06	5,51E+06	18,23	17,98
Casa A	3	1025000	-	14720	7680	6.91	-	3	460115	525845	1,17E-04	3,63E-04	5,09E+06	3,46E+06	17,34	16,96
Adon G	4	954000	14240	14240	5930	9.86	5.76	3	591738	676272	7,29E-05	2,18E-04	9,34E+08	3,35E+07	19,64	18,49
Adon A	4	1032000	14730	14730	6250	6.65	6.1	4	576408	658752	1,17E-04	3,57E-04	1,91E+08	3,72E+06	16,9	16,45
Adon P	4	1109000	14200	14200	5930	7.26	3.75	7.5	576408	658752	9,47E-05	3,01E-04	3,95E+08	7,98E+06	18,56	18,35
Carr G	2	670000	-	-	4800	14.44	-	-	1280712	1486134	5,94E-05	1,73E-04	6,82E+07	9,48E+07	19,6	19,56
Carr A	2	84100	-	-	4800	13.88	-	-	1280712	1486134	5,25E-05	1,57E-04	8,42E+07	1,46E+08	19,82	19,65
Carr P	2	970000	-	-	5930	14.06	-	-	1280712	1486134	4,41E-05	1,31E-04	1,33E+08	3,32E+08	19,88	19,78
Morr G	3	802000	-	17280	12310	6.19	-	4	1135734	1277701	1,44E-04	3,72E-04	3,15E+06	3,10E+06	12,7	11,76
Morr A	3	859000	-	15460	7680	8.1	-	4	1135734	1277701	1,06E-04	3,12E-04	8,26E+06	6,76E+06	16,64	16,22
Buril G	3	952000	-	27980	16370	10.5	-	9	3309042	3833972	5,48E-05	1,22E-04	6,58E+07	4,60E+08	19	18,83
Buril A	3	684000	-	25030	12310	10.5	-	9	3309042	3833972	7,35E-05	1,68E-04	3,33E+07	1,08E+08	18,02	17,7
Buril P	3	1264000	-	22260	5930	10.13	-	9	3309042	3833972	5,54E-05	1,81E-04	4,99E+07	7,81E+07	16,68	18,46
Hunt G	3	792000	-	25400	16370	9.56	-	10	1567293	1871276	7,20E-05	1,45E-04	3,14E+07	2,07E+08	19	18,81
Hunt A	3	993000	-	25760	16370	9.31	-	8	1556976	1858960	6,39E-05	1,45E-04	3,83E+07	2,08E+08	19,2	19,03
Hunt B	3	1141000	-	19930	16370	9.19	-	9	1556976	1858960	6,04E-05	1,28E-04	4,09E+07	3,63E+08	19,24	19,09

7.2. Esnek Üstyapı Kalan Ömrü Tahmini

Bu çalışmada esnek üstyapı kalan ömrü tahmini, adaptif ağ yapısına dayalı bulanık çıkarım sistemi (ANFIS) uygulayarak elde edilmiştir. Tahmin metotlarında giriş olarak tabaka sayısı, yük tekrar sayısı, elastisite modülü (iki asfalt, temel ve taban zemini), tabaka kalınlığı (iki asfalt ve temel) parametreleri kullanılmış ve esnek üstyapı kalan ömrü çıkış olarak alınmıştır. Çalışmada 32 adet deneysel veri seti kullanılmıştır. Veri setlerinin 25'i modelin eğitiminde 7 tanesi ise test aşamasında işleme alınmıştır. Adaptif Ağ Yapısına Dayalı Bulanık Çıkarım Sistemi oluşturulurken MATLAB kullanılmıştır ve çalışmada kullanılan editörler aşağıda detaylı şekilde anlatılmıştır.

7.2.1. ANFIS'in ana penceresi

Şekil 7.1'de çalışmada ANFIS'in ana penceresi görülmektedir.



Şekil 7.1. Adaptif ağ yapısına dayalı bulanık çıkarım sistemi editörü

ANFIS model ile yapılan üstyapı kalan ömrü tahminlerinde yalnızca Sugeno kullanılmaktadır. Ayrıca, ANFIS oluşturulurken Sugeno sisteminin kullanılması için aşağıdaki özelliklere sahip olması gerekir;

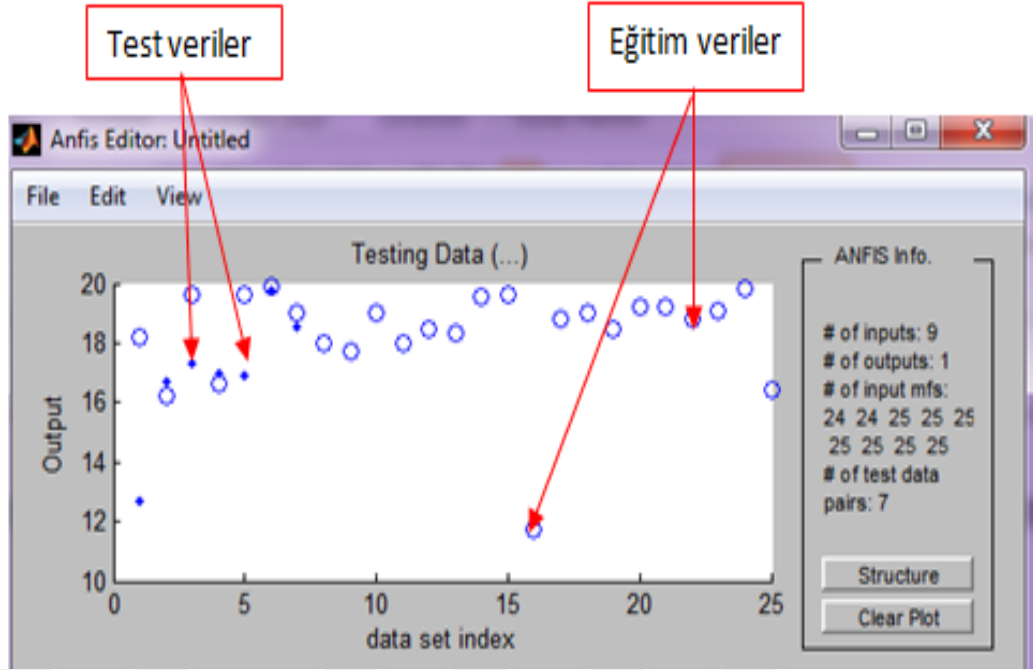
- Sıfır ya da birinci dereceden Sugeno sistemi kullanılması gereklidir.
- Bir çıktılı olması ve ağırlıklı ortalama durulama ünitesi kullanması gereklidir. Bütün çıktı üyelik fonksiyonları aynı türde olmalıdır ve ayrıca lineer ya da sabit çıktılı olması gereklidir.
- Hiçbir kural paylaşımı olmamalıdır. Sistemde her bir kural tek bir çıkış üyeliği üzerinde çalışabilecek şekilde olmalıdır.
- Her bir kural için ağırlık, bütünlük sağlamalıdır. Eğer bulanık çıkarım sistemi bu kısıtlamalarına uyumlu değilse hata oluşur.

Bulanık model algoritmasının adımları şu şekilde özetlenebilir:

- Veri yükleme.
- Başlangıç FIS Yapısını üretme veya yükleme.
- FIS Eğitimi.
- Eğitilen FIS'in Doğrulanması.

7.2.1.1. Veri yükleme

Bir FIS modelini eğitmek için, modellenen olan sistemin istenen girdi/çıktı verilerini içeren bir Eğitim veri setini yükleyerek işe başlanılmalıdır. Yüklediğiniz herhangi bir veri seti, sütun vektörleri ve son sütunda çıktı verileri olarak düzenlenen veriye sahip bir dizi olmalıdır çalışmada sırasıyla (1., 2., 3., 4., 5., 6., 7., 8. ve 9.) sütunları (tabaka sayısı, yük tekrar sayısıdır, BSK1 tabakası elastisite modülü, BSK2 tabakası elastisite modülü, temel tabakası elastisite modülü, taban zemini elastisite modülü, BSK1 tabakası kalınlığı, BSK2 tabakası kalınlığı, temel tabakası kalınlığı) temsil edilir ve 10. sütunu Esnek üstyapı kalan ömrü temsil edilir. Eğitim ve test verileri Şekil 7.2'de görülmektedir.



Şekil 7.2. Çalışma da Eğitim ve test verileri

7.2.1.2. FIS yapısını üretme

Başlangıç FIS modelini aşağıdaki bölümlene tekniklerinden birisini seçerek üretin:

- Grid bölümlene- Veri üzerinde grid bölümlemesini kullanarak tek-çıkıtlı Sugeno-tipi FIS üretir
- Çıkarmalı kümeleme - Veri üzerinde ilk olarak çıkarmalı kümelemeyi uygulayarak ANFIS eğitimi için bir başlangıç modeli üretir.

Bu çalışmada çıkarmalı kümeleme tekniklerini kullandık. Bu sahada (etki aralığı, sıkışma faktörü, kabul oranı, reddetme oranı) bulunmuştur.

Etki aralığı, veri alanı bir hiperküp birimi olarak dikkate alındığında bir küme yarıçapını ifade etmektedir. Yarıçaplar için kabul edilebilir değerler genellikle 0.2 ve 0.5 arasındadır. Küçük bir küme yarıçapı genellikle, birçok kural ile veya tersi durum ile sonuçlanan veri içerisindeki birçok küçük kümeyi ortaya çıkaracaktır. Çok-boyutlu verilerde, farklı yarıçaplar her bir boyut için belirlenebilmektedir. Eğer aynı değer tüm veri boyutlarına uygulanırsa, her bir küme merkezi verilen yarıçapta küresel bir komşuluk etkisine sahip olacaktır.

Sıkıştırma faktörü, kümenin bir parçası olarak kabul edilecek merkezden uzaktaki noktaların potansiyelini sıkıştırmak için bu küme merkezinin komşuluğunu belirleyen yarıçap değerlerini çarpmak için kullanılan bir faktördür. Örneğin 20 gibi yüksek değerler, birbirilerinden uzak olan kümeleri bulmak için kullanılmaktadır. Kabul oranı, üzerinde başka bir veri noktasının bir küme merkezi olarak kabul edileceği birinci küme merkezinin potansiyeline ait bir fraksiyon olarak potansiyeli ayarlamaktadır. Yüksek değerler, var oldukları için çok güçlü bir potansiyele sahip olan veri noktalarını kabul etmek için kullanılmaktadır.

Küme merkezleri. Reddetme oranı, altında başka bir veri noktasının bir küme merkezi olarak ret edileceği birinci küme merkezinin potansiyeline ait bir fraksiyon olarak potansiyeli ayarlamaktadır. 0.7 gibi yüksek değerler, güçlü bir potansiyele sahip olmayan tüm veri noktalarını ret etmek için kullanılmaktadır. Bu çalışmada, modelde kullanılan parametreler Şekil 7.3'de gösterilmiştir. Bu parametreler çeşitli uygulama sonuçları içerisinde elde edilmiştir.

Range of influence:
.02
Squash factor:
1.25
Accept ratio:
.5
Reject ratio:
.15

Şekil 7.3. Model parametreler

7.2.1.3. FIS eğitimi

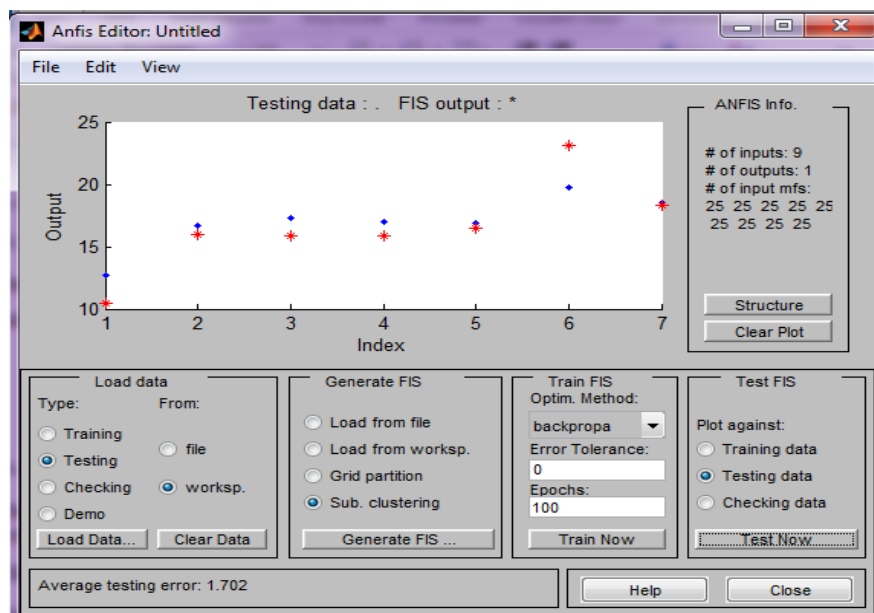
Eğitme verilerini yükledikten ve başlangıç FIS yapısını oluşturduktan sonra, FIS eğitime başlayabilirsiniz. Aşağıdaki adımlar FIS'in nasıl eğitileceğini göstermektedir.

- Optimizasyon Yönteminde hibrit ya da geri yayılımı, optimizasyon yöntemi olarak seçilir.
- Eğitim sayısını ve eğitim Hata Toleransı eğitimin durma kriterlerini belirlemek için girilir.

Bu çalışmada, optimizasyon yöntemi olarak geri yayılım algoritması kullanılmıştır ve eğitim sayısı 100 olarak alınmıştır.

7.2.1.4. FIS testi

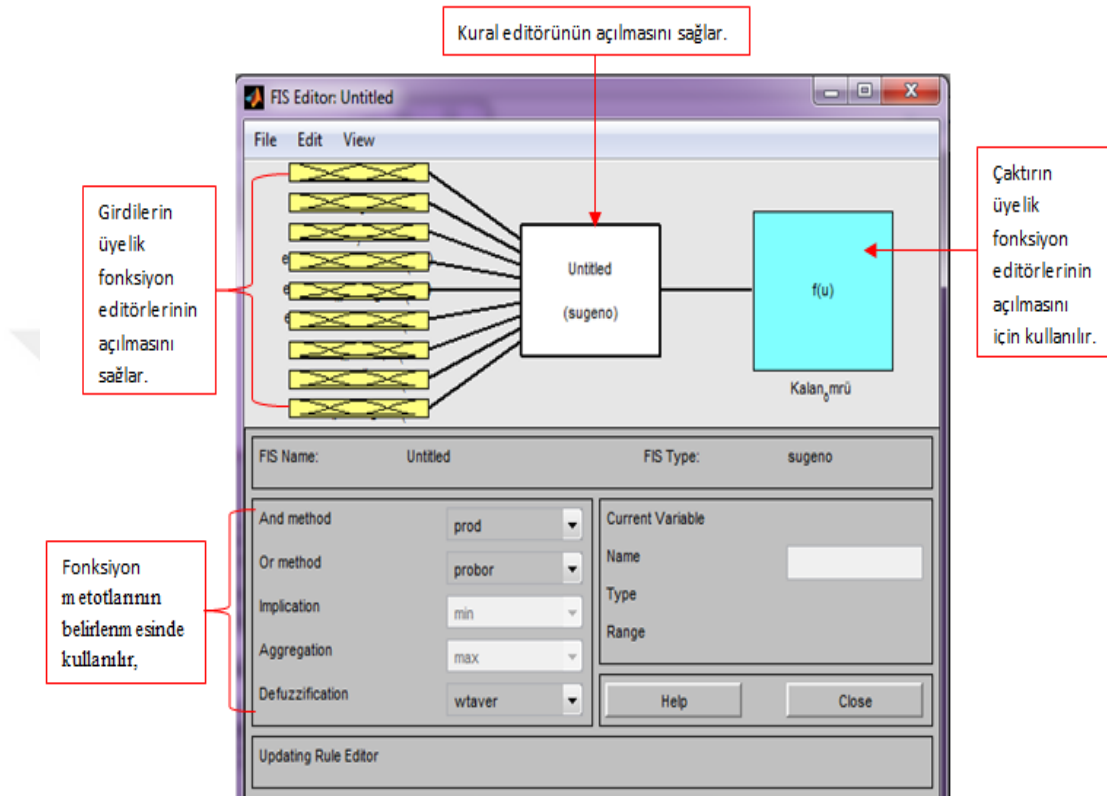
FIS eğitildikten sonra, FIS'i eğitmek için kullanılan veriden farklı olan bir Test veya Kontrol verisini kullanarak model doğrulanmaktadır. Test seti Şekil 7.4'te görülmektedir. Şekil 7.4'te mavi olarak görülen işaretler Esnek üstyapı kalan ömrü hesaplaması verilerini, kırmızı olarak görülen işaretler ANFIS modelinin tahmin ettiği değerleri belirlemektedir.



Şekil 7.4. Test sonrası test verilerinin eşleşmesi

7.2.2. Bulanık çıkarım sistem editörü

Bulanık Çıkarım Sistem Editörü, bulanık çıkarım sistemleri hakkındaki bilgileri gösterir. Şekil 7.5'te bulanık çıkarım sistem editörü görülmektedir.



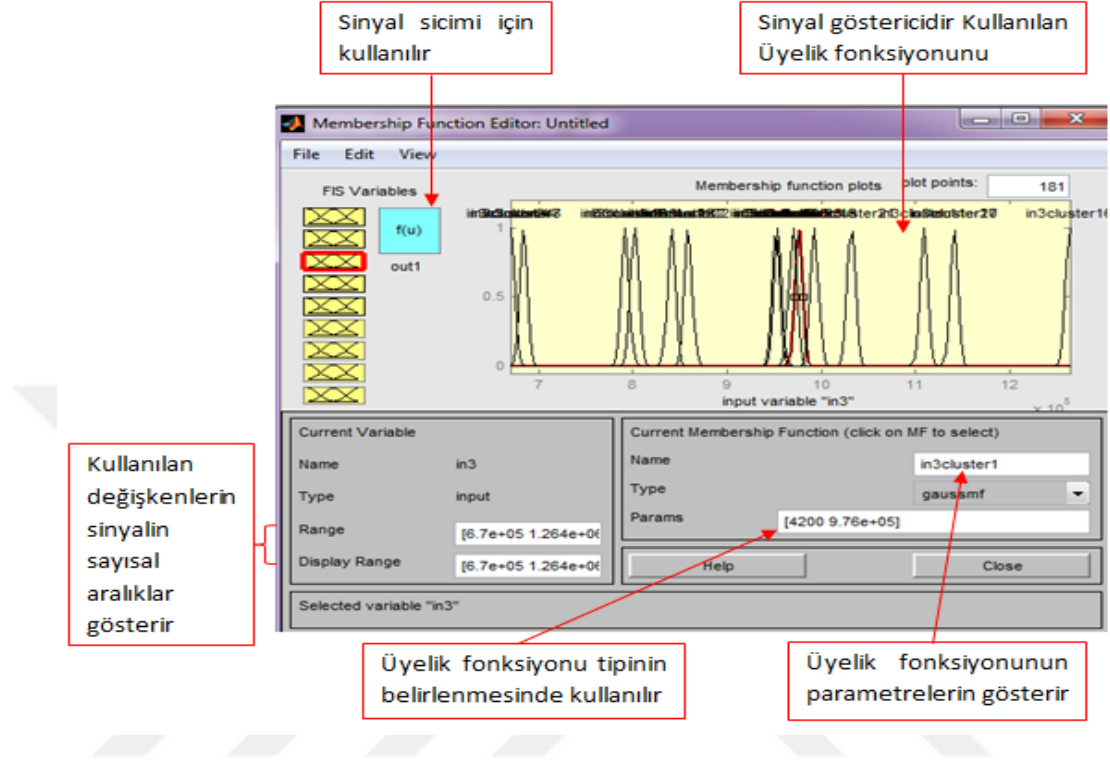
Şekil 7.5. Bulanık çıkarım sistem editörü

Bu çalışmada kalan ömür tahmini için AND metodu olarak prod, OR metodu olarak probor, durulaştırma (Defuzzification) yöntemi olarak da ağırlıklı ortalama (wtaver) metodu seçilmiştir. Durulama işlemi için en çok kullanılan yöntem eğriler altında kalan alanın ağırlık merkezinin bulunmasıdır. Bu yöntem yalnızca çıkışlı üyelik fonksiyonların üyelik değerinin tepe noktası değeri belirlenerek, ortalamaların alınmasıyla yapılır.

7.2.3. Üyelik fonksiyon editörü

ANFIS, üyelik fonksiyonu parametreleri sistem davranışını tanımlayan bir veri setinden elde edilir. Ayrıca, bu veri seti gruplar halinde bölünebilmekte ve bu grupların en iyi üyelik fonksiyonuna göre düzenlenmesi yapılabilmektedir.

Bulanık üyelik fonksiyonu şekli, parametre kümesine bağlıdır ve bu parametrelerin değiştirilmesi üyelik fonksiyonunun şeklini değiştirir. Üyelik Fonksiyon Editörü Şekil 7.6’da görülmektedir.

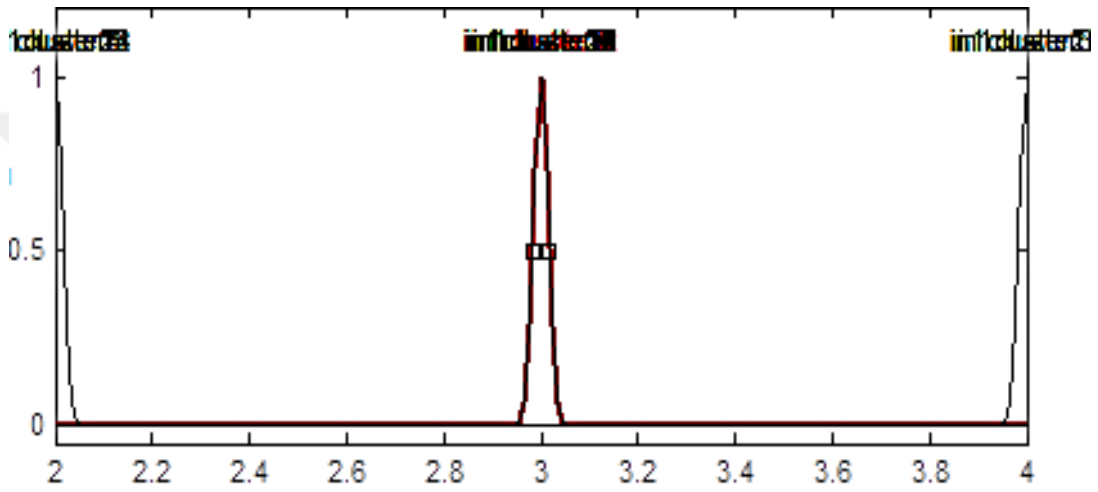


Şekil 7.6. Üyelik fonksiyon editörü

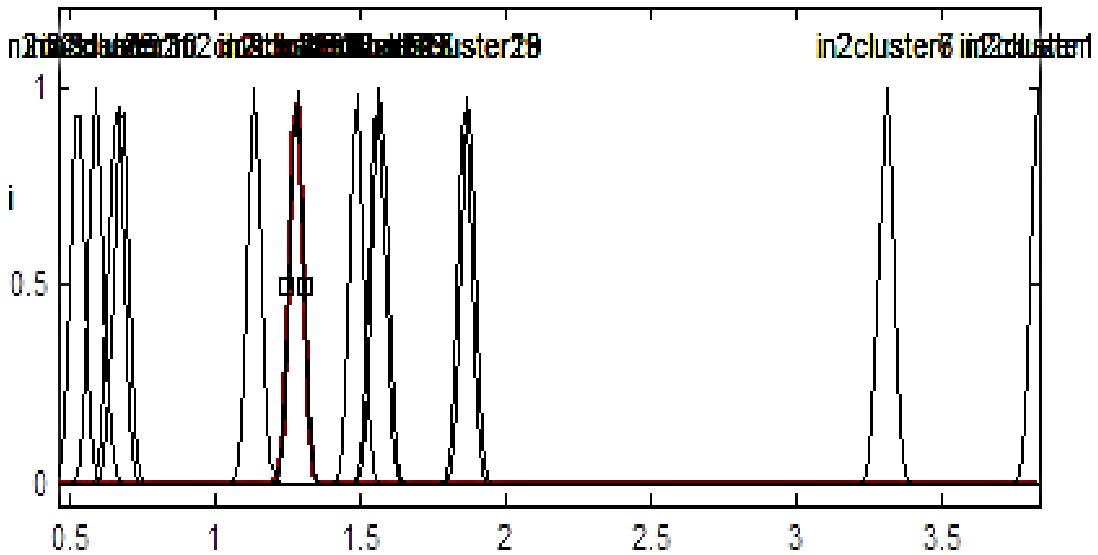
Bir değişken için üyelik fonksiyonlarının şekli, aralığı ve sayısının seçimi nihayetinde subjektif tasarım seçimlerine bağlı olmasına ve bunun da sistem performansını etkilemesine rağmen, aşağıdaki bazı açıklamaların bilinmesinde fayda vardır:

- Evrensel kümede tanımlanan bulanık kümelerin simetrik olarak dağıtılması gerekmektedir.
- Her bir değişken için tek sayıda bulanık kümelerin ortada yer alması mümkün olmaktadır. Tipik olarak her sistem değişkeni için 5 veya 7 tane bulanık küme kullanılmaktadır.
- Hiç bir kesin değerin herhangi bir bulanık kümede tanımsız kalmaması için yan yana bulanık kümelerin belli bir yüzde ile üst üste binmesi sağlanmalıdır. Böylece çıkışın belirlenmesinde de birden fazla kuralın kullanılması da sağlanmış olmaktadır.

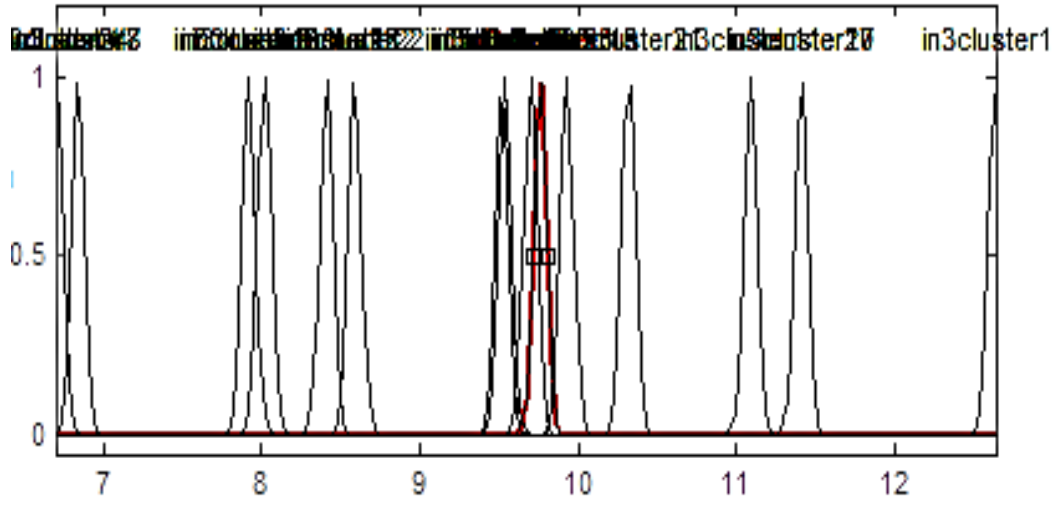
Bu çalışmada, Esnek üstyapı kalan ömrü hesaplaması sonuçlarına göre tahmin edebilen bir model geliştirilmiştir. Modele girdi olarak seçilen tabaka sayısı, yük tekrar sayısı, BSK1 tabakası elastisite modülü, BSK2 tabakası elastisite modülü, temel tabakası elastisite modülü, taban zemini elastisite modülü, BSK1 tabakası kalınlığı, BSK2 tabakası kalınlığı ve temel tabakası kalınlığı parametreleri için oluşturulan ve girdiler gauss üyelik fonksiyonuyla kullanılmaktadır. Üyelik fonksiyonları sırasıyla Şekil 7.7, 7.8, 7.9, 7.10, 7.11, 7.12, 7.13, 7.14 ve 7.15'te görülmektedir. Şekil 7.16'da kalan ömrü için üyelik fonksiyonu görülmektedir.



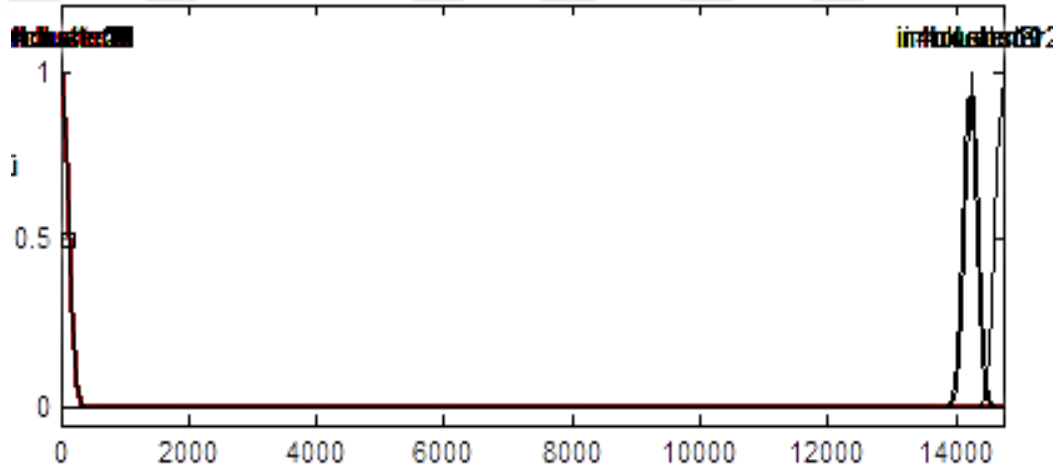
Şekil 7.7. Tabaka sayısı için üyelik fonksiyonu



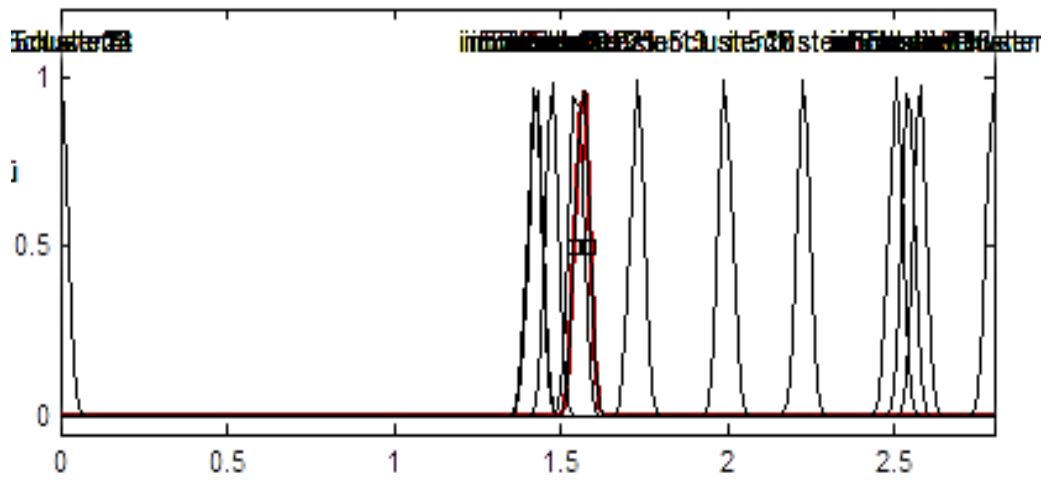
Şekil 7.8. Yük tekrar sayısı için üyelik fonksiyonu



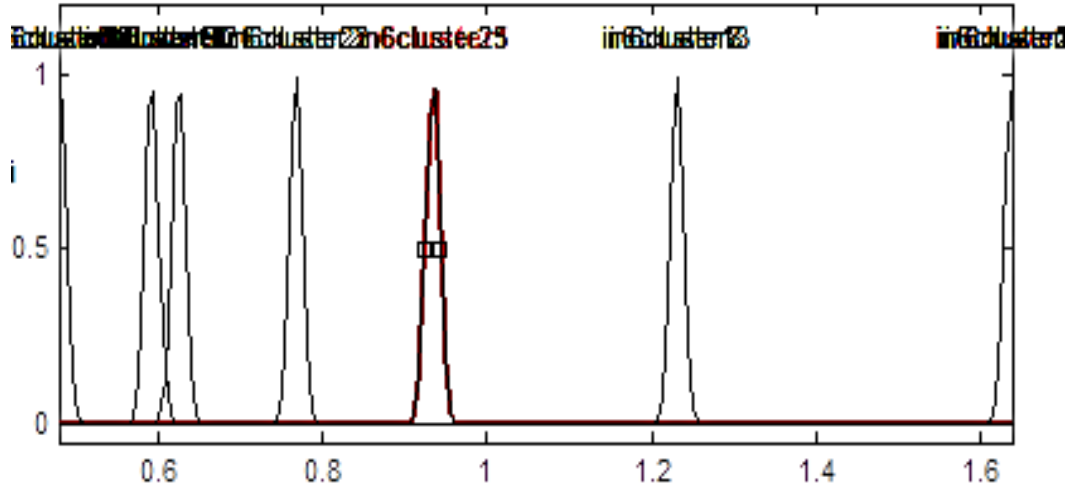
Şekil 7.9.BSK1 tabakası elastisite modülü için üyelik fonksiyonu



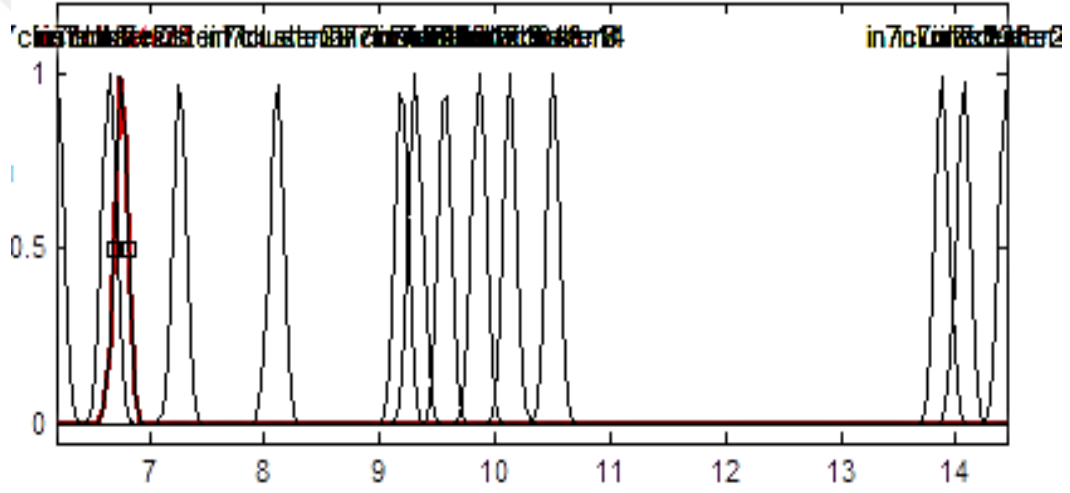
Şekil 7.10.BSK2 tabakası elastisite modülü için üyelik fonksiyonu



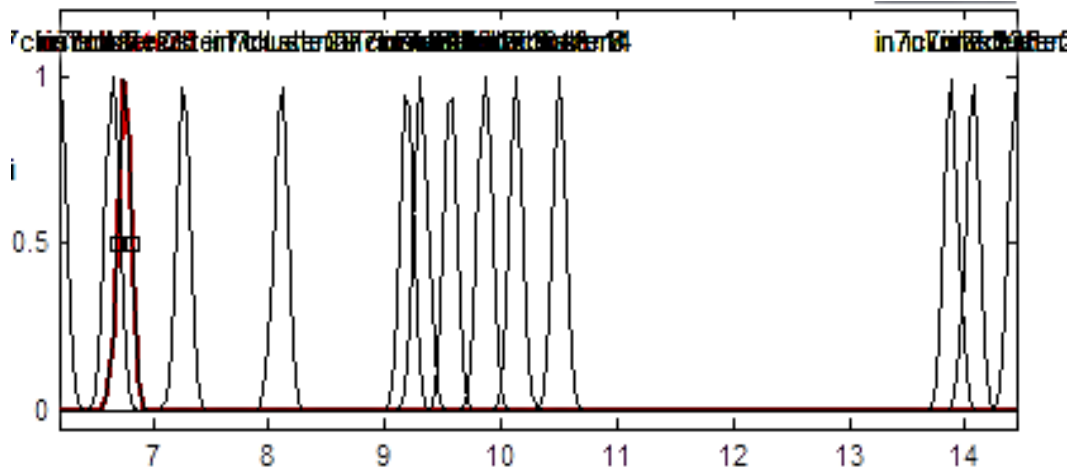
Şekil 7.11.Temel tabakası elastisite modülü için üyelik fonksiyonu



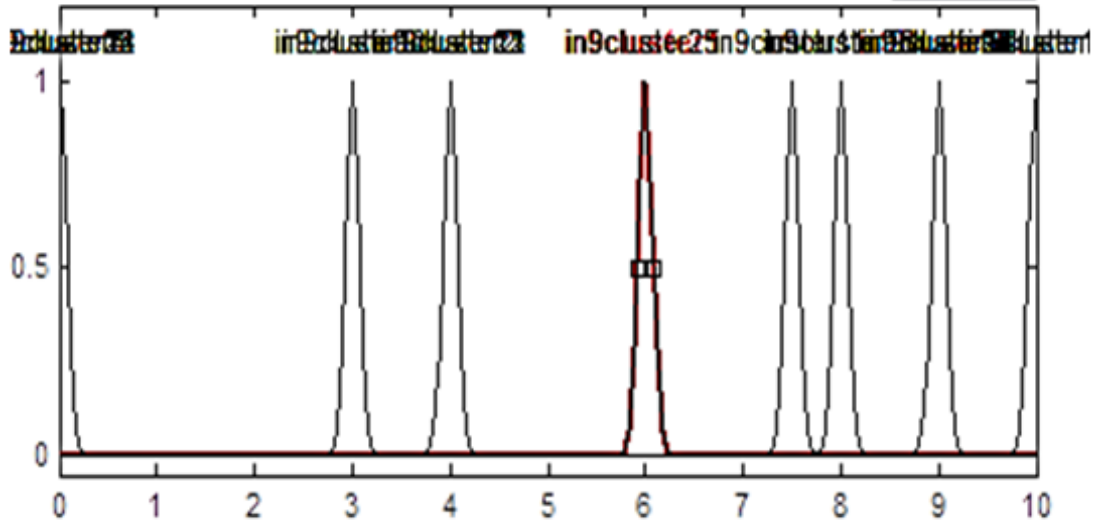
Şekil 7.12.Taban zemini elastisite modülü için üyelik fonksiyonu



Şekil 7.13.BSK1 tabakası kalınlığı için üyelik fonksiyonu



Şekil 7.14.BSK2 tabakası kalınlığı için üyelik fonksiyonu



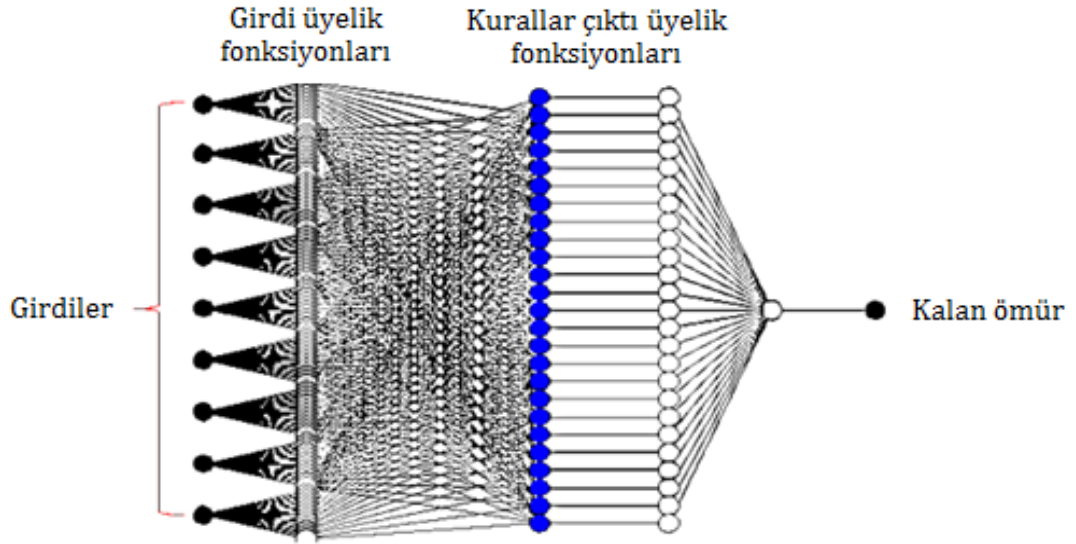
Şekil 7.15. Temel tabakası kalınlığı için üyelik fonksiyonu

out1cluster13	out1cluster25
out1cluster12	out1cluster24
out1cluster11	out1cluster23
out1cluster10	out1cluster22
out1cluster9	out1cluster21
out1cluster8	out1cluster20
out1cluster7	out1cluster19
out1cluster6	out1cluster18
out1cluster5	out1cluster17
out1cluster4	out1cluster16
out1cluster3	out1cluster15
out1cluster2	out1cluster14
out1cluster1	

Şekil 7.16. Kalan ömür için üyelik fonksiyonu

7.2.4. ANFIS modelin yapısı

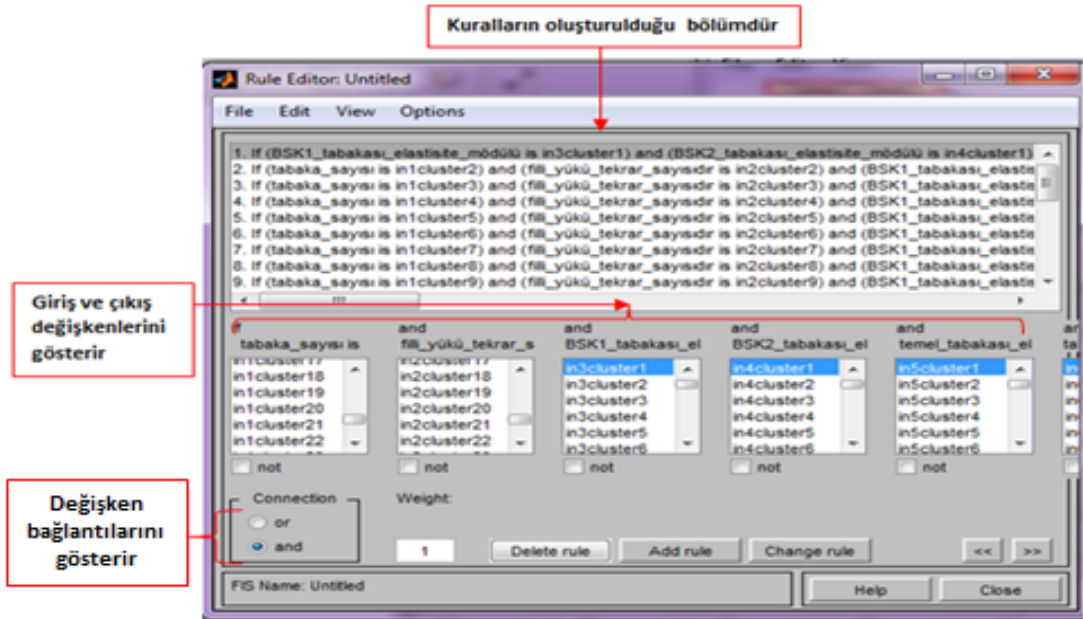
ANFIS verilen girdi değerleri ile çıktı arasında ilişki elde edebilme için kural oluşturmuştur. Kurulan ANFIS modelinin mimarisi Şekil 7.17’de görülmektedir.



Şekil 7.17. Geliştirilen modelin genel yapısı

7.2.5. Kural editörü

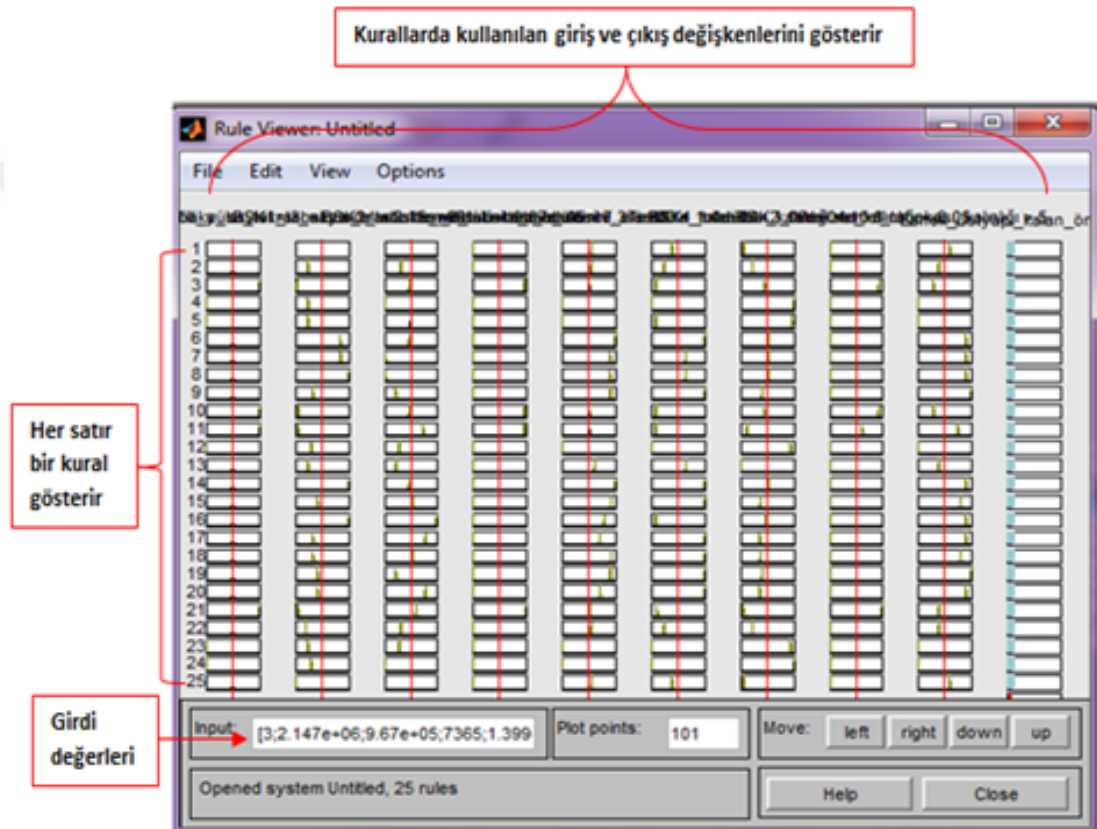
ANFIS yapısına, veriler kullanılarak kuralların oluşturulması ile devam edilmiştir. Kural editörü, Bulanık Çıkarım Sistem editöründe tanımlanan girdi ve çıktı değişkenlerine bağlı olarak kuralları otomatik olarak oluşturmaktadır. Aşağıda Şekil 7.18’de kural editörü görülmektedir. Şekil 7.18’de bu kurallardan ilk 9 tanesi görülebilir.



Şekil 7.18. Kural editörü

7.2.6. Kural izleyici

Kurallar oluşturulduktan sonra bulanık çıkarım sistemi tanımlanmış olur ve sistem kontrol edilmek istendiğinde kural izleyici (Rule Viewer) kullanılır. Kural izleyici ile oluşturulan kural tabanına uygun olarak girişlerdeki değerlerin değişimine göre çıkışlarda meydana gelen değişim incelenebilir. Şekil 7.19'da Kural izleyici görülebilir.



Şekil 7.19. Kural izleyici

Şekil 7.19'da kural numaraları her satırın sol tarafında gösterilmektedir. İlk dokuz sütun öncül üyelik fonksiyonlarını, son sütun ise verilen çıkarım sistemi için ağırlıklı ortalama sonucunu göstermektedir. Durulaştırılmış çıktı bu alan üzerinde kalın dikey bir çizgi olarak görüntülenir. Bulanık kuralların grafiksel gösterimi aslında bütün bulanık çıkarım süreçlerinin bir yol haritasını ve özetini teşkil etmektedir. Grafikteki her bir satır kural tabanındaki bir kurala karşılık gelmekte, girdi ve çıktıların üyelik fonksiyonlarını vermektedir

7.2.7. ANFIS modelinin testi

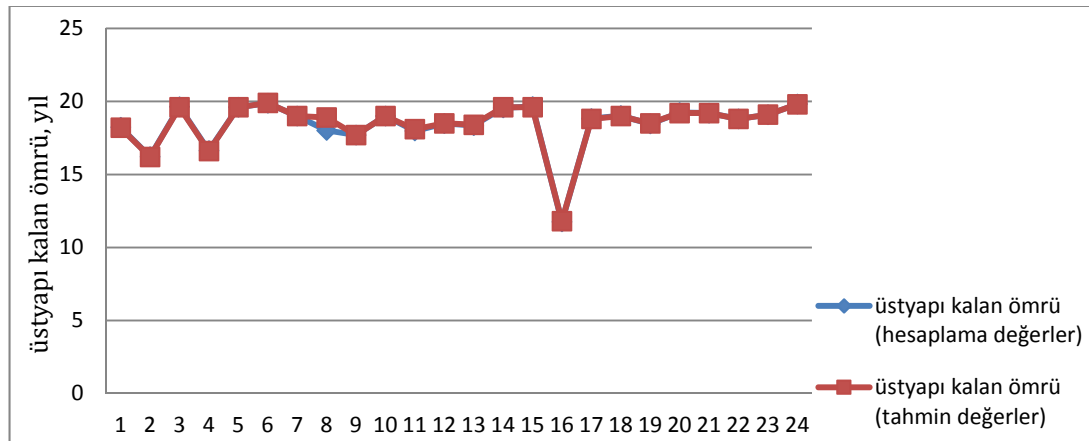
7.2.7.1. Eğitim seti

Eğitim seti için çıktı (tahmin ve hesaplama) değerleri Çizelge 7.2’de gösterilmektedir.

Çizelge 7.2. Eğitim seti için çıktı (tahmin ve hesaplama) değerleri

	Kalan ömür			Kalan ömür	
	Hesaplama	Tahmin		Hesaplama	Tahmin
1	18,23	18,2	14	19,56	19,6
2	16,22	16,2	15	19,65	19,6
3	19,64	19,6	16	11,76	11,8
4	16,64	16,6	17	18,83	18,8
5	19,6	19,6	18	19,03	19
6	19,88	19,9	19	18,46	18,5
7	19	19	20	19,24	19,2
8	18,02	18,9	21	19,2	19,2
9	17,7	17,7	22	18,81	18,8
10	19	19	23	19,09	19,1
11	17,98	18,1	24	19,82	19,8
12	18,49	18,5	25	16,45	16,4
13	18,35	18,4			

Eğitim aşamasından sonra eğitim seti ile modelin tahmin ettiği eğitim değerleri arasındaki örtüşme grafiği Şekil 7.20’de görülmektedir. Şekil 7.20’de mavi olarak görülen çizgi hesaplama verilerini, kırmızı olarak görülen çizgi ANFIS modelinin tahmin ettiği değerleri belirlemektedir.



Şekil 7.20. Model – hesaplama sonuçları eşleşme grafiği (Eğitim seti)

Eğitim aşamasında kullanılan veri seti ile modelden elde edilen tahmin değerlerinin grafiği Şekil 7.21’de görülmektedir



Şekil 7.21. Model – hesaplama sonuçları ilişkisi (Eğitim seti)

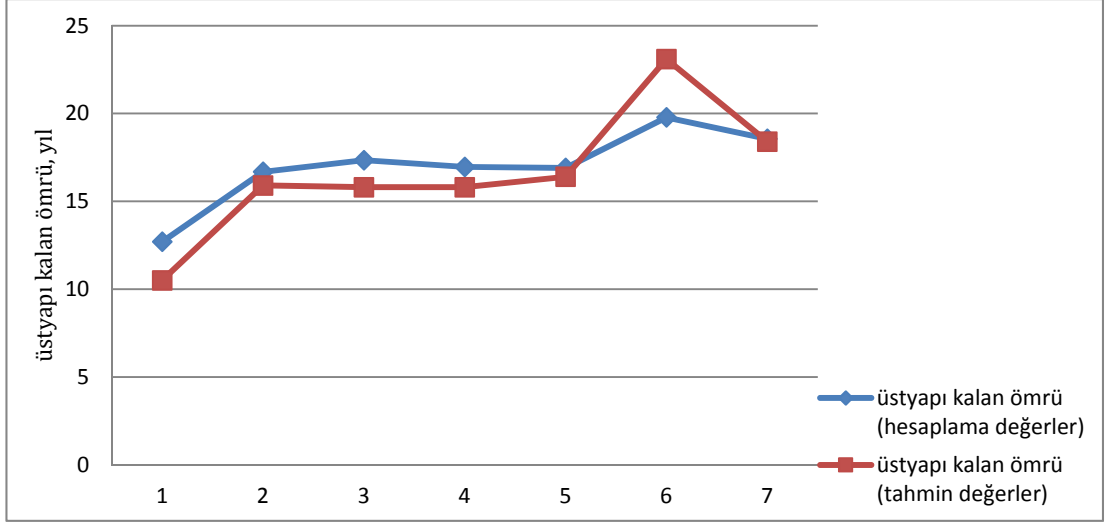
7.2.7.2. Test seti

Test seti için çıktılar (tahmin ve gerçek) değerleri Çizelge 7.3’te gösterilmektedir.

Çizelge 7.3. Test seti için çıktı (tahmin ve hesaplama) değerleri

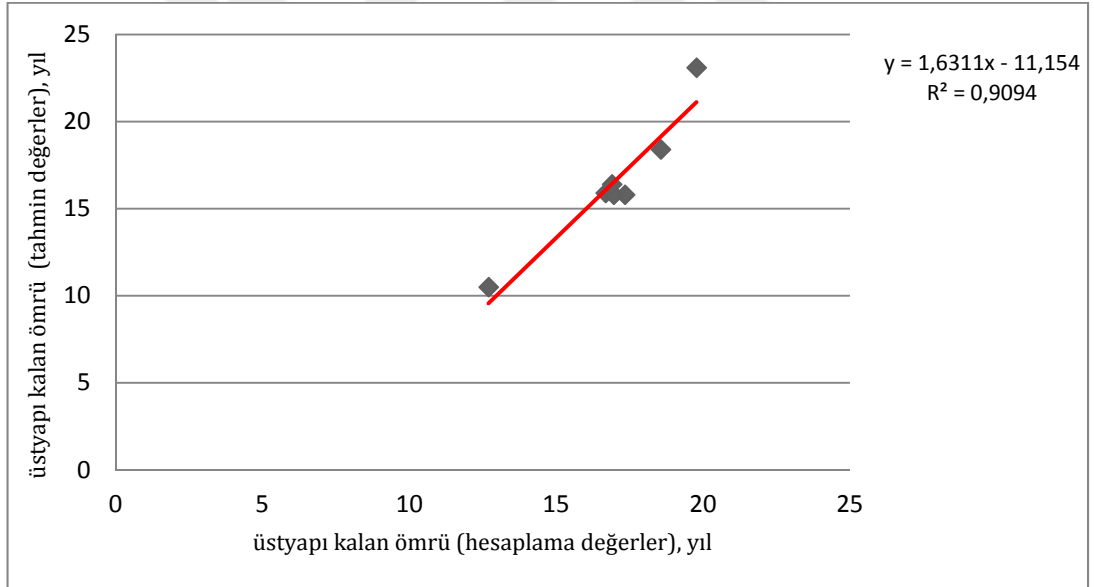
	Kalan ömür			Kalan ömür	
	Hesaplama	Tahmin		Hesaplama	Tahmin
1	12,7	10,5	5	16,9	16,4
2	16,68	15,9	6	19,78	23,1
3	17,34	15,8	7	18,56	18,4
4	16,96	15,8			

Test seti ile modelin tahmin değerleri arasındaki örtüşme grafiği de Şekil 7.22’de verilmiştir. Şekil 7.22’de mavi olarak görülen çizgi gerçek verileri, kırmızı olarak görülen çizgi ANFIS modelinin tahmin ettiği değerleri belirlemektedir.



Şekil 7.22. Model – hesaplama sonuçları eşleşme grafiği (test seti)

Test aşamasında kullanılan veri seti ile modelden elde edilen tahmin değerlerinin grafiği Şekil 7.23’de görülmektedir.



Şekil 7.23. Model – hesaplama sonuçları ilişkisi (test seti)

Şekil 7.22 ve 7.23 incelendiğinde model ile hesaplama sonuçları arasında kabul edilebilir düzeyde bir yakınlık bulunmaktadır. Oluşturulan ANFIS modelinin test ve eğitim aşamasında hesaplama sonuçları iyi bir korelasyon ilişkisi ile tahmin edebildiğini göstermektedir.

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

8.1. Esnek Üstyapı Kalan Ömrü Hesaplaması

Kalan ömrü hesaplamak için önemli parametrelerin, tabaka elastisite modüllü değerleri, trafik verileri, tabakaların kalınlıkları verilerinin bulunması gerekmektedir. Üstyapı kalan ömrü dört adımda hesaplanmaktadır. Bunlar:

- Bitümlü tabakanın en alt kısmındaki maksimum yatay çekme şekil değiştirmesi ve taban zeminindeki maksimum basınç şekil değiştirmesinin hesaplanması gerekir. Bunun için bir elastik tabaka programı kullanılmaktadır.
- Dingil yükü uygulamaları tekrar sayısının izin verilen miktarının hesaplanması, bitümlü tabakadaki yorulma ve taban zemini düşey şekil değiştirme (kalıcı deformasyon) değeri hesaplanmaktadır. Bunun için (7.1) ve (7.2) denklemleri kullanılmaktadır
- Zarar oranının hesaplamak için (7.3) denklemi kullanılmaktadır.
- Kalan ömrü hesaplamak için (7.4) denklemi kullanılmaktadır.

8.2. Esnek Üstyapı Kalan Ömrünün Tahmini

Bu çalışmada esnek üstyapı kalan ömrünün tahmini, Adaptif Ağ Yapısına Dayalı Bulanık Çıkarım Sistemi (ANFIS) uygulayarak yapılmıştır. ANFIS'ta kullanılan üyelik fonksiyonun şekli ise parametrelere göre ayarlanmaktadır ve bu çalışmada esnek üstyapı kalan ömrünün belirlenmesi için en uygun üyelik fonksiyonu gauss olarak belirlenmiştir. Bulanık çıkarım sisteminin oluşturulması için 32 veri kullanılmıştır. Deneysel veriler, eğitim için 25 adet ve test için 7 adet olmak üzere ikiye ayrılarak modellemede kullanılmıştır. Test aşamasında model oluşturulurken tanımlanmayan girdiler kullanılarak modelin durulaştırma ekranından tahmin sonuçları alınmıştır. Eğitim setinde Model

sonuçları ile deney sonuçları arasında 0.988 gibi yüksek bir ilişki görülmüştür. Test setinde ise Model sonuçları ile deney sonuçları arasında 0.909 gibi yüksek bir ilişki görülmüştür.

Çalışma sonucunda, kurulan ANFIS modelinin, Esnek üstyapı kalan ömrünün tahmini edilmesinde uygun sonuçlar verdiği görülmüştür.



KAYNAKLAR

- AASHTO, 1993, Guide for Design of Pavements Structures, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC.
- Ağar, E., Göktepe, A.B., Lav, A.H., 2005, Esnek Üstyapılarda Mekanik Özelliklerin Yapay Sinir Ağları Kullanılarak Geri-hesaplanması. İTÜ Muhendislik Dergisi, 4 (2), 31-42.
- Akı, K., Karasulu, B., 2014, Esnek Hesaplama Sinirsel Bulanık Sinerjiyi Temel Alan Sistemler ve Yaklaşımlar Üzerine Bir İnceleme, Cumhuriyet Üniversitesi Fen Fakültesi Fen Bilimleri Dergisi (CFD), 35 (2), 54-86.
- Al-Qadi, I.L., Leng, Z., Larkin Al, 2011, In-Place Hot Mix Asphalt Density Estimation Using Ground Penetrating Radar. Technical Report of Research, Federal Aviation Administration Under Cooperative Agreement, DOT 05-C-AT-UIUC, ICT Report No. 11-096.
- Al-Qadi, I.L., Leng, Z., Lahouar, S. Baek, J., 2010. In-place Hot-Mix Asphalt Density Estimation Using Ground Penetrating Radar, Transportation Research Board 89th Annual Meeting, 10-14 January 2010, Washington, D.C., Paper Number 10-1735.
- Ayçiçek, S., 2011, Esnek Üstyapılarda İmalat ve Uygulama Kusurları, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kentsel Sistemler ve Ulaştırma Yönetimi, Yüksek Lisans Tezi, Bahçeşehir Üniversitesi, İstanbul.
- Balla, C.K., 2014, Prediction of Remaining Service Life of Pavements, Submitted as Partial Fulfillment of the Requirements for the Master of Science in Engineering, the University of Toledo, USA.
- Bay, J.A., Stokoe, k.H., 1998, Development of the Rolling Dynamic Deflectometer for Continuous Deflection Testing of Pavement, Project Summary Report 1422-3F, Center for Transportation Research, the University of Texas at Austin, Austin.
- Belen, M.A., Kaya, A., 2011, 2.4GHz ISM Bandı Alıcı Verici Sistemleri İçin ANFIS Kullanılarak 280MHz Band Geçiren Aktif Filtre Tasarımı ve Analizi, Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Sempozyumu, 5-7 Ekim, Fırat Üniversitesi-Elazığ, 313-317.
- Berber, N., Boru, A., 2013, Adaptif Ağ Yapısına Dayalı Bulanık Çıkarım Sistemi ile Hava Tahmini, Endüstri Mühendisliği, Gaziantep Üniversitesi, Gaziantep.
- Canada, M. 2007, Working Safety With Nuclear Gauges, Submitted, INFO-9999-4 (E) Revision 2, the Canadian Nuclear Safety Commission, Minister of Public Works and Government Services Canada, Canada.

- Caner, M., Akarslan, E., 2009, Mermer Kesme İşleminde Spesifik Enerji Faktörünün ANFIS ve YSA Yöntemleri ile Tahmini, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 15 (2), 221-226.
- Çakıroğlu, M., Erenoğlu, E., Kasap, S., Ekiz, Y., 2011, Çelik Lif Katkılı Betonların Tahribatsız Deney Yöntemleriyle Elde Edilen Basınç Dayanımının ANFIS Metoduyla Tahmini, SDU International Journal of Technological Sciences, 3 (3), 14-22.
- Çakıt, E., 2008, El Becerisine Etki Eden Faktörlerin Değerlendirilmesine Yönelik Bulanık Mantık Yaklaşımı, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Adana.
- Dennis, N., Hall, K.D., Hazra, S., 2012, Calibration of Prediction Models for Remaining Life of Flexible Pavements in Arkansas, MBTC DOT 2070, Arkansas.
- Dülger, Ö., 2013, Hiyerarşik Uyarlanabilir Ağ Tabanlı Bulanık Çıkarım Sistemi Kullanılarak Matematik Dersi Başarı Tahmini, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 20 (5), 166-173.
- Flintsch, G.W., Ferne, B., Diefenderfer, B., 2010, Use of Continuous Deflection Measurements for Network Level Pavement Analysis (PPT). Virginia Sustainable Pavement Research Consortium (VA-SPARC), Virginia.
- Gedafa, D.S., 2008. Estimation of Remaining Service Life of Flexible Pavements From Surface Deflections, submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Doctor of Philosophy, Kansas State University, Kansas.
- Gedik, F.A., 2011, İletişim Ağ Problemlerinin Çözümünde Neuro-Fuzzy Yaklaşımı, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Ankara.
- Gopalakrishnan, K., Thompson, M.R., 2004, Backcalculation of Airport Flexible Pavement Non-Linear Moduli Using Artificial Neural Networks, Proceedings of the Seventeenth International Florida Artificial Intelligence Research Society Conference, 12-14 May 2004, Florida, USA 652-658.
- Göktepe, A.B., Ağar, E., Lav, A.H., 2007, Esnek Üstyapıların Mekanik Özelliklerinin Geri- Hesaplanmasında Yapay Zeka Kullanımı, 7. Ulaştırma Kongresi, 19-21 Eylül, İstanbul, 345-353.
- Gramajo, C.R., 2005, Verification of Mechanistic-Empirical Pavement Deterioration Models Based on Field Evaluation of In-Service Pavements, the Faculty of Virginia Polytechnic Institute and State University Blacksburg, Virginia

- Grau, R.H., Alexander, D.R., 1994, Nondestructive Testing, Evaluation, and Rehabilitation for Roadway Pavements, Technical Report Series, viii Executive Summary, IWR Report 94-FIS-8, U.S. Army Corps of Engineers, Water Resources Support, Center Institute for Water Resources.
- Graveen, C., 2001, Nondestructive Test Methods to Assess Pavement Quality for Use in A Performance-Related Specification, A Thesis Submitted to the Faculty of Purdue University, in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science in Civil Engineering, Indiana.
- Gürer, C., 2012, Ulaştırma Mühendisliği, Basılmamış Ders Notları, Konu 8, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyonkarahisar.
- Hall, H., Correa, C.E., Carpenter, S.H., Elliot, R.P., 2001, Rehabilitation Strategies for Highway Pavements, NCHRP Web Document 35 (Project C1-38): Contractor's Final Report, National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, National Research Council.
- Hardwiyono, S., 2012, Equivalent Thickness Calculation Methods Boussinesq-Exel and FWD-ELMOD on Flexible Pavement, Jurnal Ilmiah Semesta Teknika, 15 (1), 75-89.
- Harold, L., Quintus, V., Rao, C., Robert, E. Minchin, J., Nazarian, S., Kenneth R. Maser, Prowell, B., 2008, Nondestructive Testing Technology for Quality Control and Acceptance of Flexible Pavement Construction, National Concrete Pavement Technology NCHRP REPORT 626, Transportation Research Board(TRB), Champaign.
- Hill, M., Mchugh, J., Turner, J.D., 2000, Cross-Sectional Modes in Impact-Echo Testing of Concrete Structures, Journal of Structural Engineering, 126, 228-234.
- Hocaoglu F., Kurban M., 2013, Adaptif Ağ Tabanlı Bulanık Mantık Çıkarım Sistemİle Eskişehir Bölgesi İçin Güneşlenme Süreleri Tahmini, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir.
- Huang, Y.H., 1993, Pavement Analysis and Design, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, USA.
- Ilıcalı, M., 2005, Ulaştırma Ana Planı Stratejisi, Sonuç Raporu, T.C. Ulaştırma Bakanlığı.
- Kandil, K.A., 2013, Modeling Marshall Stability and Flow for Hot Mix Asphalt Using Artificial Intelligence Techniques, Nature and Science 2013, 11(6), 106-112.
- Kumar, P.P., Ransinchung, D., Mayank, M., Nikhil, S., 2012, Performance Testing of Bituminous Mixes Using Falling Weight Deflectometer, Conference on

Civil Engineering Systems and Sustainable Innovations, 25-26 April 2014, Krishi Sanskriti, 172-178.

- Lee, J.L., Stokoe, K.H., 2006, Improved Testing Speed of the Rolling Dynamic Deflectometer, Report No. FHWA/TX-06/0-4357-1, Texas Department of Transportation Research and Technology Implementation Office, Austin.
- Lenz, R.W., 2011, Pavement Design Guide, Manual Notice ,TxDOT 01/2011, Revised January, 2011 by Texas Department of Transportation (512) 302-2453, Texas.
- Molenaar, A.A., 2006, Structural Design of Pavements. Structural, PART VI, Evaluation and Strengthening of Flexible Pavements Using Deflection Measurements and Visual Condition Surveys, Z Yuanfang, & HJ van Zuylen (Eds.), Proceedings Sino-Netherlands seminar (pp. 341-422). Delft: TRAIL Research School. (TUD).
- Neshat, M., Adeli, A., Masoumi, A., Sargolzae, M., 2011, A Comparative Study on ANFIS and Fuzzy Expert System Models for Concrete Mix Design, International Journal of Computer Science Issues, 3 (2).
- O'Donnell, M. J., 2011, Use of Nondestructive Testing in the Evaluation of Airport Pavements, advisory circular (AC) No: 150/5370-11B, U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration, Virginia.
- Öcal, A., 2014, Yapay Sinir Ağları Tabanlı Yerçekimsel Arama Algoritması Kullanılarak Esnek Üstyapı Katman Özelliklerinin Geri-Hesaplanması. İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.
- Özcanan, S., Akpınar, M.V., 2014, Esnek Üstyapılarda Kritik Tekerlek ve Aks Konfigürasyonların Mekanistik Analizlere Göre Tespit Edilmesi, İMO Teknik Dergi, Yazı 413, 6625-6654.
- Padlo, P.T., Mahoney, J., Aultman-Hall L., Zinke, S., 2005, Correlation of Nuclear Density Readings with Cores Cut from Compacted Roadways, Report Number CT-2242-F-05-5, Prepared in cooperation with the U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration.
- Pandey, P., 2005, Guidelines for Structural Evaluation and Strengthening of Flexible Road Pavements Using Falling Weight Deflectometer (FWD) Technique. Ministry of Road Transport and Highways (Research Scheme R-81), New Delhi.
- Park, H.M., Kim, Y.R., 2002, Prediction of Remaining Life of Asphalt Pavement Using FWD Multiload Level Deflections, TRB 2003 Annual Meeting, 12-16 January 2003, Washington, CD-ROM.

- Pavement Interactive, 2010, Pavement Evaluation, Deflection, Erişim Tarihi: 21-1-2010, <http://www.pavementinteractive.org/article/deflection/>
- Peshkin, D.G., Smith, K.D., Wade, M., Epps, J.A., Moody, E.D., Scholz, T.V., 1998. Nondestructive Test Data Collection and Interpretation, Sixth Edition, National Highway Institute Federal Highway Administration, Virginia, Nichols Consulting Engineers, Chtd, Nevada.
- Phares, B.M., Ceylan, H., Souleyrette, R., Smadi, O., Gopalakrishnan, K., 2008, Development of a High Speed Rigid Pavement Analyzer – Phase I Feasibility and Need Study, Final Report, National Concrete Pavement Technology Center, Iowa State University, Washington.
- Qin, J., 2010, Predicting Flexible Pavement Structural Response Using Falling Weight Deflectometer Deflections, in partial fulfillment of the Requirements for the Degree Master of Science, Faculty of the Russ College of Engineering and Technology of Ohio University, Ohio.
- Saltan, M., 1999, Esnek Üstyapıların Analitik Değerlendirilmesi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Isparta.
- Saltan, M., 2002, Modeling Deflection Basin Using Neurofuzzy in Backcalculating Flexible Pavement Layer Moduli, Pakistan Journal of Information and Technology, 1(2), 180-187.
- Saltan, M., Fındık, F., 2005, Geniş Tabanlı ve Çift Tekerlekli Ağır Taşıtların Karayolu Esnek Üstyapıları Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi, Yöresinin İnşaat Mühendisliği Sorunları Kongresi, 22-24 Eylül 2005, Antalya.
- Saltan, M., Terzi, S., 2009, Backcalculation of Pavement Layer Thickness and Moduli Using Adaptive Neuro-fuzzy Inference System, Gopalakrishnan, K., Ceylan H., Attoh, N. O. (Eds.), Intelligent and Soft Computing in Infrastructure Systems Engineering, Volume 259, (177-204), Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin.
- Saltan, M., Terzi, S., Kucuksille, E. U., 2011, Backcalculation of Pavement Layer Moduli and Poisson's Ratio Using Data Mining, Expert Systems with Applications, 38 (2011), 2600–2608.
- Sanati, G., 2004, Comparison Study of the JILS Model 20T and Dynatest Model 8002 Falling Weight Deflectometers. ARA Project No. 16214.
- Serin, S., 2014, Tahribatsız Test Yöntemleri ile Esnek Üstyapıların Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin Modellenmesi, Doktora Tezi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta.
- Tabatabaei, S.A., Khaledi S., Jahantabi A., 1997, Modeling the Deduct Value of Pavements Condition of Asphalt Paevment by Adaptive Neuro-Fuzzy

Inference System. Department of Civil Faculty of Engineering, 6(1), 59-65.

Tunç, A., 2004, Kaplama Mühendisliği ve Uygulamaları, Asil Yayın Dağıtım LTD. ŞTİ. 5s. Ankara

Türkiye Asfalt Mütahitleri Derneği, 2009, Asfalt ile İlgili Terimler ve Tanımları, <http://www.asmud.org.tr/asfalt.php?sayfa=27>

Uzundurukan, S., Göksan, T. S., Korkmaz, A., Bayrak, M.Ç., 2006, Prediction of Soil Swelling Behavior Using ANFIS Analysis, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onbirinci Ulusal Kongresi, 7-8 Eylül, Trabzon, 534-540.

White, D.J., Gieselman, H., 2009, KUAB Model 150 2m Falling Weight Deflectometer. Center for Earthworks Engineering Research (CEER) Iowa State University, USA.

William, F., Ping, G., Sinha, K.M., 2010, Development of a Structural Index as an Integral Part of the Overall Pavement Quality in the INDOT PMS, Final Report, FHWA/IN/JTRP-2010/11, , SPR-3062, the Indiana Department of Transportation and the U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration.

Williams, S.G., 2008, Non-Nuclear Methods for HMA Density Measurements, MBTC 2075, Final Report, Research Assistant Professor, Department of Civil Engineering, University of Arkansas, USA.

Wu, Y.G., 2012, NDT Applications for the Assessment of Asphalt Pavements, Plate Thickness, and Steel-Grout Coupling, the Thesis Requirement for the Degree of Master of Applied Science in Civil Engineering, University of Waterloo, Canada.

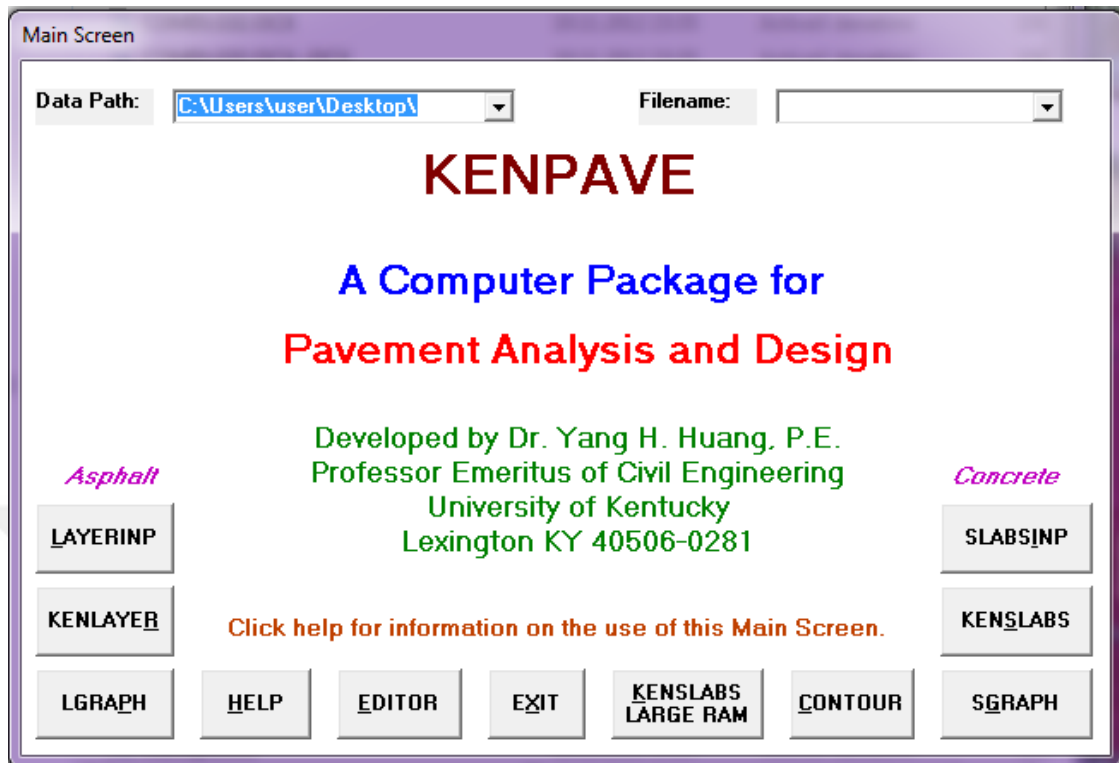
EKLER

EK A. Kenlayer Programı Pencereleeri ve Sonuçları

EK B. KENLAYER programının sonuçları



EK A. Kenlayer Programı Pencereleeri ve Sonuçları



Şekil A.1. KENLAYER programını ana penceresi

General Information of LAYERINP for Set No. 1

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

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

(2) When creating a new file, this form must be entered first because some default values to be used in the other forms vary with the system

Şekil A.2. KENLAYER programı giriş bilgileri (Genel bilgiler)

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

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

Unit in.

Layer No.	TH	PR
1	6.75	.35
2	6	.35
3	XXXXXXXXXX	.4

(1) This form appears when the 'Layer' menu on the Main Menu of LAYERINP is clicked. The number of layers on this form is equal to NL, as specified in the 'General' menu. This form is different from the one used for General Information in that a dotted rectangle, instead of the cursor, is used to indicate the active cell. If you want to read the remaining text and use the PgDn key, instead of the scrollbar, you should click this textbox to make it active. When you finish reading, you should click the cell to make it active before typing in the data. After you type in the data, the dotted rectangle will be changed into a three dimensional box and you must press the Enter key to make it effective. You can

Print OK

Şekil A.3. KENLAYER programı giriş bilgileri (Tabaka bilgileri)

Layer Moduli for Period No. 1 and Data Set No. 1

Unit psi

Layer No.	E
1	976000
2	15640
3	9340

(1) This form appears when the period button on the Layer Modulus of Each Period is clicked. The number of layers on this form is equal to NL, as specified in the 'General' menu.

(2) E (elastic modulus of each layer): If more convenient, you can enter the modulus in exponential form such as 1.234E5. Assign 0 or any value for viscoelastic layer. For a nonlinear layer, E is the assumed modulus for the first iteration and a convenient E to be assumed for both granular base and clayey subgrade is their K1 value

(3) After typing in the data in the first cell, move to the next cell by pressing the Enter or arrow down key.

(4) You can delete a line, or one

Print OK

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

Şekil A.4. KENLAYER programı giriş bilgileri (Elastisite modülü bilgileri)

Load Information for Data Set No. 1

Double click anywhere on a line to get auxiliary form for NR or NPT.

Unit		in.	psi	in.	in.	
Load Group No	LOAD	CR	CP	YW	XW	NR or NPT
1	1	4.23	80	13.5	0	3

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

(1) This form appears when the 'Load' menu on the Main Menu of LAYERINP is clicked. The number of lines, or load groups, is equal to NLG, as specified in the 'General' menu. Please refer to Figure 3.8 for axle arrangements.

(2) LOAD (type of loading): Assign 0 for single axle with single tire, 1 for single axle with dual tires, 2 for tandem axles, and 3 for tridem axles.

(3) CR (contact radius of circular loaded ares).

(4) CP (contact pressure on circular loaded ares).

(5) YW (center to center spacing between two dual wheels along the y

Print **OK**

Şekil A.5. KENLAYER programı giriş bilgileri (Yük bilgileri)

Layer Number and Fatigue Coefficients for Data Set No. 1

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

Sequence	LNBT	FT1	FT2	FT3
1	1	.0796	3.291	.854

(1) This form appears when the 'Bottom Tension' menu on the Damage Analysis is clicked. The number of sequences or layers for damage analysis on this form is equal to NLBT, as specified in the 'General' menu. Note that the upper left cell is the active cell, as indicated by the dotted rectangle, so you can type in the layer number right away. If you want to read the remaining text and use the PgDn key, instead of the scrollbar, you should click this textbox to make it active. After finishing reading, you should click the cell before typing in the data.

(2) LNBT (layer number for damage analysis of bottom tension).

(3) FT1, FT2, FT3 (fatigue coefficients, as indicated by f1, f2 and

Print **OK**

Şekil A.6. KENLAYER programı giriş bilgileri, Hasar bilgileri (Yorulmaya göre)

Layer Number and Permanent Deformation Coefficients for Data Set No. 1

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

Sequence	LNTC	FT4	FT5
1	3	1.365E-09	4.477

(1) This form appears when the 'Top Compression' menu on the Damage Analysis is clicked. The number of sequences or layers for damage analysis on this form is equal to NLTC, as specified in the 'General' menu. Note that the upper left cell is the active cell, as indicated by the dotted rectangle, so you can type in the layer number right away. If you want to read the remaining text and use the PgDn key, instead of the scrollbar, you should click this textbox to make it active. After finishing reading, you should click the cell before typing in the data.

(2) LNTC (layer number for damage analysis of top compression).

(3) FT4, FT5 (permanent deformation coefficients, as indicated by f4

Print OK

Şekil A.7. KENLAYER programı giriş bilgileri, Hasar bilgileri (Deformasyona göre)

Load Repetition for Period No. 1 and Data Set No. 1

Load Group	TNLR
1	460115

(1) This form appears when the period button on the Load Repetitions of each period is clicked. The number of load groups on this form is equal to NLG, as specified in the 'General' menu.

(2) TNLR (total number of load repetitions for each load group during each period).

(3) After typing in the data in the first cell, move to the next cell by pressing the Enter or arrow down key.

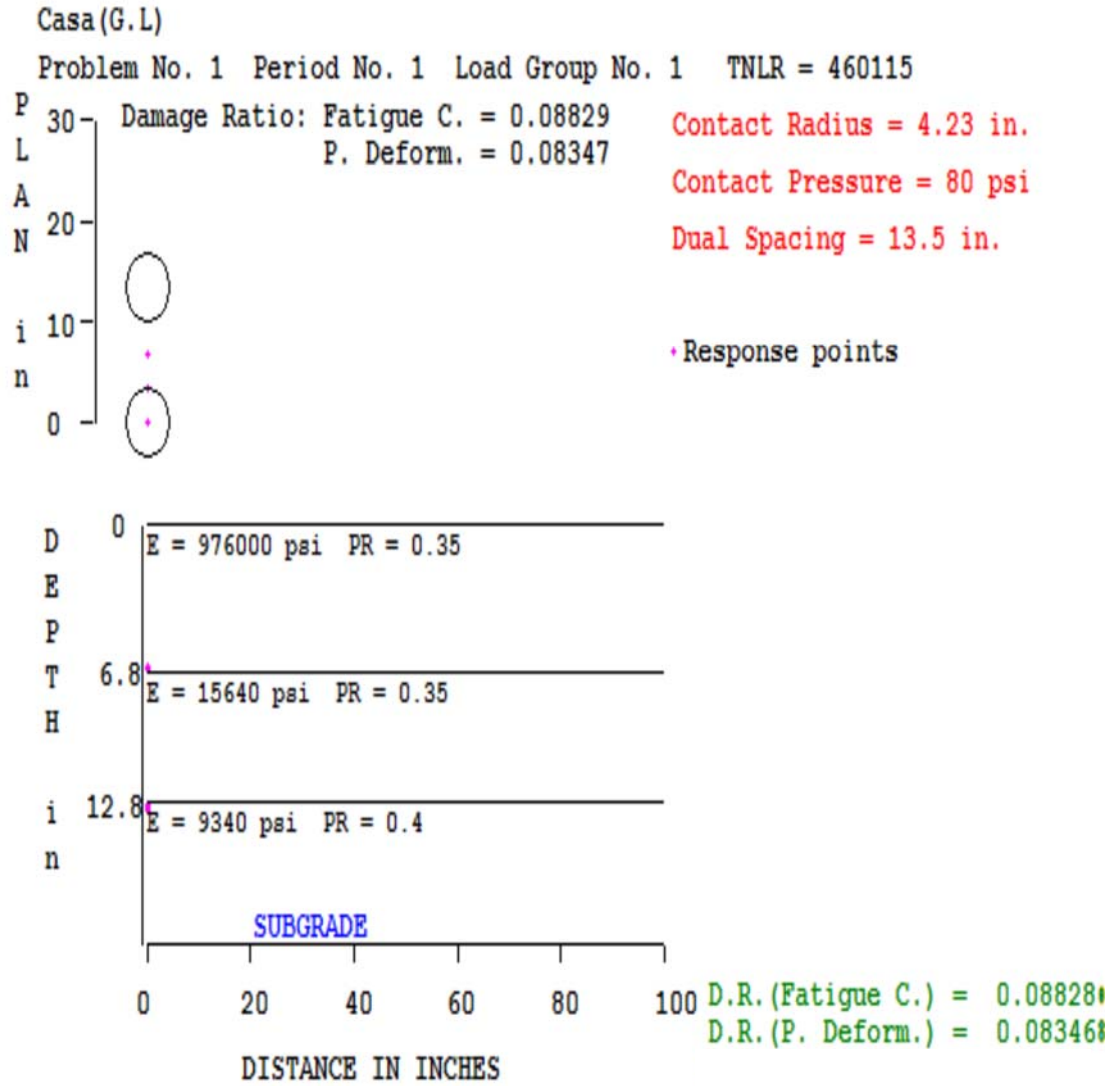
(4) You can delete a line, or one load group, by first clicking anywhere on the line to make it active and then press the <Ctrl>-<Del> keys. The NLG in the 'general' menu will be reduced automatically by 1.

(5) You can add a new line, or one load

Print OK

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

Şekil A.8. KENLAYER programı giriş bilgileri, Hasar bilgileri (yük uygulamaları)



Şekil A.9. KENLAYER programının sonucu (Casa G yeri)

EK B. KENLAYER programının sonuçları

```
CASA (GL)
INPUT FILE NAME -C:\Users\user\Desktop\CASA (GL).DAT
NUMBER OF PROBLEMS TO BE SOLVED = 1
TITLE -Casa(G.L)
MATL = 1 FOR LINEAR ELASTIC LAYERED SYSTEM
NDAMA=2, SO DAMAGE ANALYSIS WITH DETAILED PRINTOUT WILL BE PERFORMED
NUMBER OF PERIODS PER YEAR (NPY) = 1
NUMBER OF LOAD GROUPS (NLG) = 1
TOLERANCE FOR INTEGRATION (DEL) -- = 0.001
NUMBER OF LAYERS (NL)----- = 3
NUMBER OF Z COORDINATES (NZ)----- = 2
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 : 6.75 6
POISSON'S RATIOS OF LAYERS (PR) ARE : 0.35 0.35 0.4
ALL INTERFACES ARE FULLY BONDED
FOR PERIOD NO. 1 LAYER NO. AND MODULUS ARE : 1 9.760E+05 2 1.564E+04
3 9.340E+03
LOAD GROUP NO. 1 HAS 2 CONTACT AREAS
CONTACT RADIUS (CR)----- = 4.23
CONTACT PRESSURE (CP)----- = 80
NO. OF POINTS AT WHICH RESULTS ARE DESIRED (NPT)-- = 3
WHEEL SPACING ALONG X-AXIS (XW)----- = 0
WHEEL SPACING ALONG Y-AXIS (YW)----- = 13.5
RESPONSE PT. NO. AND (XPT, YPT) ARE: 1 0.000 0.000 2 0.000 3.375
3 0.000 6.750
NUMBER OF LAYERS FOR BOTTOM TENSION (NLBT)---- = 1
NUMBER OF LAYERS FOR TOP COMPRESSION (NLTC)--- = 1
LAYER NO. FOR BOTTOM TENSION (LNBT) ARE: 1
LAYER NO. FOR TOP COMPRESSION (LNTC) ARE: 3
LOAD REPETITIONS (TNLR) IN PERIOD 1 FOR EACH LOAD GROUP ARE : 460115
DAMAGE COEF.'S (FT) FOR BOTTOM TENSION OF LAYER 1 ARE: 0.0796 3.291
0.854
DAMAGE COEFFICIENTS (FT) FOR TOP COMPRESSION OF LAYER 3 ARE: 1.365E-
09 4.477
DAMAGE ANALYSIS OF PERIOD NO. 1 LOAD GROUP NO. 1
POINT VERTICAL VERTICAL VERTICAL MAJOR MINOR INTERMEDIATE
DISPL. PRINCIPAL PRINCIPAL PRINCIPAL
NO. COORDINATE (HORIZONTAL STRESS STRESS STRESS STRESS
P. STRAIN) (STRAIN) (STRAIN) (STRAIN) (STRAIN)
1 6.75000 0.01535 5.090 5.093 -156.659 -132.509
(STRAIN) -1.148E-04 1.089E-04 1.089E-04 -1.148E-04 -8.141E-05
1 12.75010 0.01375 3.303 3.370 0.448 0.574
(STRAIN) -1.210E-04 3.070E-04 3.171E-04 -1.210E-04 -1.020E-04

2 6.75000 0.01568 5.060 5.060 -155.309 -120.581
(STRAIN) -1.177E-04 1.041E-04 1.041E-04 -1.177E-04 -6.967E-05
2 12.75010 0.01404 3.454 3.469 0.458 0.624
(STRAIN) -1.262E-04 3.228E-04 3.251E-04 -1.262E-04 -1.014E-04

3 6.75000 0.01576 4.852 4.852 -147.758 -102.896
(STRAIN) -1.162E-04 9.486E-05 9.486E-05 -1.162E-04 -5.418E-05
3 12.75010 0.01414 3.494 3.494 0.462 0.645
(STRAIN) -1.278E-04 3.267E-04 3.267E-04 -1.278E-04 -1.003E-04
AT BOTTOM OF LAYER 1 TENSILE STRAIN = -1.177E-04
ALLOWABLE LOAD REPETITIONS = 5.212E+06 DAMAGE RATIO = 8.829E-02
AT TOP OF LAYER 3 COMPRESSIVE STRAIN = 3.267E-04
ALLOWABLE LOAD REPETITIONS = 5.512E+06 DAMAGE RATIO = 8.347E-02
*****
* SUMMARY OF DAMAGE ANALYSIS *
*****
AT BOTTOM OF LAYER 1 SUM OF DAMAGE RATIO = 8.829E-02
AT TOP OF LAYER 3 SUM OF DAMAGE RATIO = 8.347E-02
MAXIMUM DAMAGE RATIO = 8.829E-02
```

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Fakhir Abdulsada YASEEN

Doğum Yeri ve Yılı : Bağdat, 1978

Medeni Hali : Evli

Yabancı Dili : İngilizce

E-posta : fakhir1978@gmail.com



Eğitim Durumu

Lise : Aljihad Lisesi, 1999

Lisans : Babil Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

Mesleki Deneyim

Teknik Bölüm Başkanı (Al-haşmiye Belediyesi)	2003-2005
Teknik Bölüm Başkanı (Al-kasim Belediyesi)	2006-2008
Al-imam Belediyesi Müdürü	2009-2011
Al-mahavil Belediyesi Müdürü	2011-2013