

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

**KARAYOLLARI ESNEK ÜSTYAPILARINDA TABAKA ARA
YÜZEYLERİNDEKİ SÜREKSİZLİKLERİN SİSMİK
YÖNTEMLE BELİRLENMESİ**

Fadime Selcan ÖZEN

Danışman: Prof.Dr. Mehmet SALTAN

**DOKTORA TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ISPARTA – 2011**

TEZ ONAYI

Fadime Selcan ÖZEN tarafından hazırlanan “**Karayolları Esnek Üstyapılarında Tabaka Ara Yüzeylerindeki Süreksizliklerin Sismik Yöntemle Belirlenmesi**” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Süleyman Demirel Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof.Dr. Mehmet SALTAN

Süleyman Demirel Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Jüri Üyeleri :

Prof.Dr. Mustafa KARAŞAHİN

İstanbul Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Doç.Dr. Serdal TERZİ

Süleyman Demirel Üniversitesi, Yapı Eğitimi Anabilim Dalı

Doç.Dr. Mesut TİĞDEMİR

Süleyman Demirel Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yrd.Doç.Dr. Zakir KANBUR

Süleyman Demirel Üniversitesi, Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Prof.Dr. Mustafa KUŞÇU

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bidirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

İÇİNDEKİLER

İÇİNDEKİLER.....	i
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xi
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	4
2.1. Esnek Üstyapılar.....	4
2.2. Tahribatsız Deney Yöntemleri (Non-Destructive Tests – NDT)	6
2.2.1. Tahribatsız deney yöntemlerinin literatürdeki yeri.....	7
2.2.2. Elektromanyetik metot	11
2.2.2.1. Zemin penetrasyon radarı (Ground penetrating radar – GPR).....	11
2.2.3. Defleksiyon metodu	13
2.2.3.1. Düşen ağırlık deflektometresi (Falling weight deflectometer – FWD).....	13
2.2.3.2. Hafif ağırlık deflektometresi (Light weight deflectometer – LWD).....	15
2.2.3.3. Etki tepki metodu (Impulse response – IR)	16
2.2.4. Titreşim metodu	16
2.2.4.1. Rijitlik ölçer	16
2.2.4.2. Yüksek frekanslı tarayıcı	17
2.2.5. Ses/sesüstü sismik metotlar	18
2.2.5.1. Darbe-yankı metodu (Impact echo – IE)	18
2.2.5.2. Yüzey dalgalarının spektral analizi (Spectral analysis of surface waves – SASW)	19
2.2.5.3. Ultrases	20
2.2.6. Termal metotlar	21
2.2.6.1. Termograf	21
2.3. Karayolu Üstyapısı ile İlgili Sismik Deney Aletleri.....	22
2.3.1. Sismik üstyapı analizcisi (Seismic pavement analyser – SPA)	22

2.3.2. Taşınabilir sismik üstyapı analizcisi (Portable seismic pavement analyser – PSPA).....	23
2.4. Tabakalar Arasında Meydana Gelen Ayırışmalar	29
2.5. Tabakalar Arası Ayırışmanın Belirlenmesinde Tahribatsız Deney Metotlarının Kullanılması	33
2.5.1. Dalga yayılım prensibi	34
2.5.2. Darbe-yankı	35
2.5.3. Ultrasonik yüzey dalgaları.....	36
3. MATERYAL VE YÖNTEM	38
3.1. Küçük Ölçekli Üstyapının İnşa Edilmesi.....	38
3.1.1. Üstyapı kesiminde kullanılacak ara yüzey malzemelerinin belirlenmesi.....	38
3.1.2. Küçük ölçekli yol üstyapısının inşa edilmesi	45
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	55
4.1. Tahribatsız Deney Yönteminin Uygulanabilirliğinin Araştırılması için Ön Çalışma.....	55
4.1.1. Deney noktalarının konumlarının belirlenmesi	55
4.1.2. Ses/sesüstü sismik metotlar	56
4.1.2.1. Darbe yankı (IE) ve ultrasonik yüzey dalgaları (USW)	56
4.1.3. Defleksiyon metotları	65
4.1.3.1. Düşen ağırlık deflektometresi (FWD)	65
4.2. NDT Deney Metotlarının Uygulanabilirliğinin Kanıtlanması	68
4.2.1. Deney noktalarının konumlarının belirlenmesi	68
4.2.2. Ultrasonik yüzey dalgası (USW) sonuçları	69
4.2.3. FWD deneyi.....	78
4.3. Alınan Karot Numunelerinin Sonuçları	89
5. SONUÇLAR	93
5.1. Güvenilirlik	93
5.2. Tekrarlanabilirlik	96
5.3. Belirlenebilirlik Aralığı.....	97
5.4. Veri Toplama Hızı	97
5.5. Veri Analiz Hızı.....	100
5.6. Veri Analiz Sürecinin Değerlendirilmesi.....	101

5.7. Genel Değerlendirme	102
6. KAYNAKLAR.....	104
EKLER.....	110
ÖZGEÇMİŞ.....	136

ÖZET

Doktora Tezi

KARAYOLLARI ESNEK ÜSTYAPILARINDA TABAKA ARA YÜZEYLERİNDEKİ SÜREKSİZLİKLERİN SİSMİK YÖNTEMLE BELİRLENMESİ

Fadime Selcan ÖZEN

Süleyman Demirel Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Mehmet SALTAN

Bir üstyapıdan beklenen taşıma kapasitesini ve yapısal kaliteyi sağlayabilmesi için tabakalar arasındaki adezyonun yeterli miktarda sağlanmış olması gerekmektedir. Ayırışma problemi başlangıç aşamasında belirlenemezse, nemden dolayı alt tabakalarda ayırışmalara sebep olabilir. Var olan tahribatsız deney metotları ve deney aletleri yardımıyla problemleri bölgenin yerinin belirlenmesi sağlanarak, metodun başarısı ve etkinliği değerlendirilebilmektedir.

Arzu edilen metot ile ileri derecelerde oluşan ayırışmanın belirlenmesinden çok henüz ayırışma ilk aşamalarda problemli bölgelerin belirlenmesi gerekir. Bu sebeple henüz inşa edilmiş bir üstyapıda uygun ve pratik olan bir tahribatsız deney yöntemi ile ayırışma problemi tespit edilmelidir.

Bu amaçla, farklı derinliklerde ve farklı ayırışma derecelerinde inşa edilmiş kontrollü bir üstyapı kesiti üzerinde Düşen Ağırlık Deflektometresi ve Sismik Metotların ayırışmanın belirlenmesi üzerindeki etkinliği araştırılmıştır. Problemli bölgelerin belirlenmesinde ultrasonik yüzey dalgaları metodunun diğer metotlara göre çok daha başarılı olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Tahribatsız deney metotları (NDT), tabakalar arasındaki ayırışma, sismik metotlar, defleksiyon metotları, taşınabilir üstyapı analizcisi (PSPA), düşen ağırlık deflektometresi (FWD).

2011, 136 sayfa

ABSTRACT

Ph.D. Thesis

DETERMINATION OF THE DISCONTINUITY OF HIGHWAY FLEXIBLE PAVEMENTS LAYERS BY USING NONDESTRUCTIVE SEISMIC METHOD

Fadime Selcan ÖZEN

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

Supervisor: Prof. Dr. Mehmet SALTAN

Sufficient bonding between the pavement layers is essential to ensure the desired structural capacity and bearing capacity of a pavement. If undetected, the progression of delamination may result in stripping of the lower layers due to the intrusion of moisture. The existing nondestructive testing procedures and equipment that have the potential to address the problem were identified and their effectiveness and potential for success were evaluated.

The desirable method should ideally detect the onset of delamination as soon as possible, as opposed to detecting the problems in its advanced stages. Therefore, an appropriate practical nondestructive quality assurance tool capable of detecting the potential of delamination or debonding during or shortly after construction is very desirable.

For this purpose, Falling Weight Deflectometer and Sonic/Seismic Methods were evaluated on a controlled pavement section that was specifically constructed with various levels and depths of debonding. Ultrasonic surface wave method is more promising method for detecting debonded sections.

Key Words: Non-Destructive test methods (NDT), delamination, seismic methods, deflection methods, portable seismic pavement analyzer (PSPA), falling weight deflectometer (FWD).

2011, 136 pages

TEŞEKKÜR

Çalışmalarında bana her zaman vakit ayıran, her türlü bilgi ve deneyimini paylaştan, yol gösteren ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen danışman hocam Sayın Prof. Dr. Mehmet SALTAN' a şükranlarımı sunarım. Tez çalışmasının yurtdışında gerçekleşen deneysel bölümü için olanak sağlayan, sabır ve alçakgönüllülükle yardımını esirgemeyen U.S.A., El Paso Teksas Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünden Prof.Dr. Soheil NAZARIAN' a teşekkür ederim.

Her konuda verdiği destekten dolayı değerli Hocam Prof. Dr. Mustafa KARAŞAHİN' e ve tez izleme komitesinde değerli görüşlerinden dolayı Doç.Dr. Serdal TERZİ'ye teşekkürlerimi sunarım. Yurtdışındaki çalışmalara hızlı bir şekilde adapte olmamı sağlayan, her konuda yardımına başvurduğum Dr. Manuel CELAYA' ya teşekkür ederim.

Manevi desteklerini benden esirgemeyen ve çalışma ortamımı hazırlayan iş arkadaşlarıma teşekkür ederim. Bugüne kadar hiçbir konuda bana desteklerini, şefkatlerini ve sabırlarını esirgemeyen annem K. Mürşide ERTEM ve babam Ali İhsan ERTEM' e saygı, sevgi ve teşekkürlerimi sunarım. İş hayatımın huzurlu olması için elinden geleni yapan ve beni sevgisi ile onurlandıran sevgili eşim Gürsu ÖZEN' e teşekkür ederim.

Bu tez çalışması 1591-D-07 No'lu Proje ile tezimi maddi olarak destekleyen Süleyman Demirel Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yönetim Birimi Başkanlığı'na teşekkür ederim. Ayrıca bu tez çalışması için TUBİTAK tarafından 2214 kodlu yurtdışı araştırma bursu verilmiştir.

Fadime Selcan ÖZEN
ISPARTA, 2011

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Tipik bir esnek üstyapı kesiti (Ağar vd., 1998)	5
Şekil 2.2. Mevcut NDT yöntemleri	7
Şekil 2.3. Zemin penetrasyon radarı	12
Şekil 2.4. GPR verisi örneği	13
Şekil 2.5. Tipik bir FWD aleti	14
Şekil 2.6. Tipik bir FWD defleksiyon grafiği (Göktepe vd., 2005)	14
Şekil 2.7. LWD ve tipik bir defleksiyon eğrisi	15
Şekil 2.8. Tipik etki-tepki deney aleti ve ölçülmüş genlik-frekans eğrisi	16
Şekil 2.9. Humboldt rijitlik ölçer	17
Şekil 2.10. Elektromanyetik/Piezoelektrik sarsıcı sistem	17
Şekil 2.11. Etki-tepki deney aleti ve uygulaması	19
Şekil 2.12. İki kanallı SASW deneyinin genel düzeni (Stokoe et.al., 1994)	20
Şekil 2.13. Ultrasonik yansıma metodunun genel görünümü ve çalışma prensibi	21
Şekil 2.14. Tipik bir termografi aleti ve asfalt bir üstyapıdan elde edilen görüntü	21
Şekil 2.15. SPA deney aleti	22
Şekil 2.16. Taşınabilir üstyapı analizcisi (PSPA)	24
Şekil 2.17. Tipik bir PSPA veri kaydı	25
Şekil 2.18. Tabakalar arasında ayrışmanın sebep olduğu tipik bir bozulma örneği	29
Şekil 2.19. Tipik bir kayma bozulması	31
Şekil 2.20. Darbe-Yankı metodunun uygulama ve analiz şeması	36
Şekil 2.21. Tipik bir üstyapı kesiti ile ayrışma söz konusu olan iki farklı karot numunesi ile dağılma eğrilerinin karşılaştırılması	37
Şekil 3.1. Laboratuvar numunelerinin hazırlanması	40
Şekil 3.2. Kesme deney aleti	41
Şekil 3.3. Kesme deneyi sonrasında kırılmış bir numune (talk pudralı)	41
Şekil 3.4. Kesme deneyinden elde edilen sonuçlar	42
Şekil 3.5. Ultrasonik deney aleti	44
Şekil 3.6. UTEP' te asfalt kesitlerin inşa edileceği bölge	45
Şekil 3.7. Küçük ölçekli kesitlerin şematik gösterimi	46
Şekil 3.8. Kısmi ve tamamen temassız kesitlerin görünümü	47

Şekil 3.9. Seçilen arazinin temizlenip, uygun su muhtevasına getirilip sıkıştırılması	48
Şekil 3.10. Asfalt temel tabakasının inşa edilmesi	49
Şekil 3.11. Asfalt temelin üzerine ayrıştırma malzemelerinin yerleştirilmesi (derin ayrışma durumu için).....	50
Şekil 3.12. Asfalt temel üzerine ısı ileten tellerin yerleştirilmesi.....	51
Şekil 3.13. Sıcak karışım asfaltın inşaat sahasına getirilmesi.....	52
Şekil 3.14. Sıcak karışım ilk yüzey tabakasının inşa edilmesi.....	52
Şekil 3.15. Sıcak karışım üst yüzey tabakanın inşa edilmesi	53
Şekil 3.16. İnşaatın ikinci günü sonunda elde edilen PSPA deneyi sonuçları.....	54
Şekil 3.17. Üstyapı kesiti inşaatının tamamlanmasından sonra kaplama tabakası üzerinde yapılan PSPA deneyi sonuçları	54
Şekil 4.1. Kesitte deney noktalarının konumu	55
Şekil 4.2. Taşınabilir sismik üstyapı analizcisi detayı	56
Şekil 4.3. Küçük ölçekli yol çalışmasından PSPA ile elde edilen zaman kayıtları	57
Şekil 4.4. PSPA ile elde edilen dağılma eğrisi sonuçları	59
Şekil 4.5. Küçük ölçekli yol çalışmasında PSPA modül değerlerinin istatistiksel analizi.....	60
Şekil 4.6. Küçük ölçekli yol çalışmasında genel modül değerleri.....	61
Şekil 4.7. Beş şerit için dağılma eğrisi sonuçları.....	62
Şekil 4.8. PSPA ile elde edilmiş olan IE sonuçları.....	63
Şekil 4.9. PSPA ile elde edilen IE sonuçları (boy kesit için)	64
Şekil 4.10. Çalışmada kullanılan düşen ağırlık deflektometresi	66
Şekil 4.11 Çalışmadan elde edilen defleksiyon örnekleri.....	66
Şekil 4.12. FWD’ den elde edilen defleksiyon verilerinin istatistiksel analizi	67
Şekil 4.13. FWD modül değerleri.....	68
Şekil 4.14. Her bir kesitte kullanılan deney noktalarının yerleri.....	69
Şekil 4.15. Soğuk hava için genişletilmiş PSPA modül değerleri.....	70
Şekil 4.16. Sıcak hava için genişletilmiş PSPA modül değerleri	72
Şekil 4.17. PSPA modüllerinin sıcaklıkla değişimi.....	72
Şekil 4.18. Soğuk havada PSPA modüllerinin ısı farklılıklarına göre düzenlenmesi	74
Şekil 4.19. Sıcak havada PSPA modüllerinin ısı farklılıklarına göre düzenlenmesi	75

Şekil 4.20. Geliştirilmiş olan istatistiksel kritere bağlı olarak soğuk havada PSPA modüllerinin ısı farklılıklarına göre düzenlenmesi	76
Şekil 4.21. Geliştirilmiş olan istatistiksel kritere bağlı olarak sıcak havada PSPA modüllerinin ısı farklılıklarına göre düzenlenmesi	77
Şekil 4.22. Soğuk hava deneylerinden elde edilen 63 mm üst tabaka için modül grafığı.....	78
Şekil 4.23. Dağılma eğrisi (Soğuk hava koşulları altında).....	79
Şekil 4.24. Revize edilmiş istatistiksel kritere göre soğuk hava koşulları altında FWD defleksiyon verileri.....	81
Şekil 4.25. Revize edilmiş istatistiksel kritere göre sıcak hava koşulları altında FWD defleksiyon verileri.....	82
Şekil 4.26. FWD defleksiyonlarındaki zamanla değişim.....	83
Şekil 4.27. Soğuk hava koşullarında FWD defleksiyon değerlerinin sıcaklığa göre düzenlenmesi	84
Şekil 4.28. Sıcak hava koşullarında FWD defleksiyon değerlerinin sıcaklığa göre düzenlenmesi	85
Şekil 4.29. Soğuk hava koşullarında FWD modül değerlerinin revize edilmiş istatistiksel analizi.....	86
Şekil 4.30. Sıcak hava koşullarında FWD modül değerlerinin revize edilmiş istatistiksel analizi.....	87
Şekil 4.31. FWD modül değerlerine sıcaklığın etkisi.....	87
Şekil 4.32. Soğuk hava koşullarında FWD modül değerlerinin revize edilmiş istatistiksel analizi.....	88
Şekil 4.33. Sıcak hava koşullarında FWD modül değerlerinin revize edilmiş istatistiksel analizi.....	89
Şekil 4.34. Küçük ölçekli yol çalışmasında karot numunesinin alınması.....	90
Şekil 5.1. Sismik metodun genel durumu	99

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Çalışmada kullanılan karışımların özellikleri	39
Çizelge 3.2. Laboratuarda hazırlanan numunelerin kesme direnci sonuçları (psi)	43
Çizelge 3.3. Küçük ölçekli yol çalışmasında kullanılacak olan ara yüzey malzemeleri	43
Çizelge 3.4. Hazırlanan numunelerin sıkışma hızlarındaki ortalama farklar	44
Çizelge 3.5. Kesitlere ait karakteristikler	47
Çizelge 4.1. Modül değerlerinin analizinde kullanılan kriterler	61
Çizelge 4.2. Modül değerlerini analiz etmekte kullanılan geliştirilmiş kriterler	75
Çizelge 4.3. Geliştirilmiş kriterin değerlendirildiği bir örnek	76
Çizelge 4.4. Başlangıç noktasından 0.6 m ileride alınan karot numunelerinin kesme gerilmesi sonuçları (psi)	90
Çizelge 4.5. Başlangıç noktasından 2.1 m ileride alınan karot numunelerinin kesme gerilmesi sonuçları (psi)	91
Çizelge 4.6. Karot numunelerinin kesme deneyi sonuçları	92
Çizelge 5.1. Güvenilirliğin değerlendirme kriteri	93
Çizelge 5.2. Kriterleri açıklayan bir örnek	94
Çizelge 5.3. Tabakalar arasındaki ayrışmanın belirlenmesinde sismik metodun olasılık değeri	95
Çizelge 5.4. Metodun doğruluğu için sıralama kriteri	95
Çizelge 5.5. Metodun tekrarlanabilirliği	96
Çizelge 5.6. Farklı derece ve büyüklükteki ayrışmaların belirlenmesinde başarı durumu	98
Çizelge 5.7. Belirlenebilirlik aralık sıralaması	100
Çizelge 5.8. Veri toplama hızı sıralaması	100
Çizelge 5.9. Veri analiz hızı ve yorumlanma sürelerine göre sıralama	101
Çizelge 5.10. Veri analiz sürecinin değerlendirilmesi ve zorluk derecesi	101

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

ASTM	: Amerikan Test ve Malzemeler Derneği
DCP	: Dinamik Konik Penetrometre
FFT	: Hızlı Fourier Dönüşümü
FWD	: Düşen Ağırlık Deflektometresi
GPR	: Zemin Penetrasyon Radarı
IE	: Darbe Yankı
LWD	: Hafif Ağırlık Deflektometresi
NDT	: Tahribatsız Deney Yöntemleri
PSPA	: Taşınabilir Üstyapı Analizcisi
SASW	: Yüzey Dalgalarının Spektral Analizi
SPA	: Sismik Üstyapı Analizcisi
USW	: Ultrasonik Yüzey Dalgası
kg	: Kilogram
cm	: Santimetre
mm	: Milimetre
Hz	: Hertz
L	: Litre
Dk	: Dakika
C	: Santigrad
F	: Fahrenayt
GPa	: Giga paskal
E	: Elastisite Modülü
V	: Dalga hızı
ρ	: Kütle yoğunluğu
ν	: Poisson oranı
M	: Modül
G	: Kesme modülü
h	: İki arayüzey arasındaki mesafe
f	: Frekans
T	: Sıcaklık

1. GİRİŞ

Ulaşım insanların hayatlarını sürdürebilmeleri için gerekli unsurlardan biridir. Zamanın çok kıymetli olduğu günümüz koşulları içerisinde, en kısa mesafe ile en uzun mesafeleri kapsayacak şekilde kara yolu, demiryolu, deniz yolu ve hava yolu insanlar için hem yolcu hem de yük taşımacılığında hızlı çözümler sunmaktadır. Hangi ulaşım türü kullanılırsa kullanılsın, kara yolu ile ulaşım her bir ulaşım sistemine bağlantı sağlaması ve kısa mesafelerde en pratik çözümü sağlaması açısından ciddi önem taşımaktadır.

Dünyanın her bölgesi için farklı öneme sahip olan karayolu ağları Türkiye için ayrı bir önem taşımaktadır. Türkiye stratejik konumu bakımından Asya ve Avrupa kıtaları arasında bir köprü vazifesi görmektedir. Dolayısıyla Asya ve Avrupa kıtaları arasındaki yük ve yolcu taşımacılığının büyük bir kısmı Türkiye üzerinden gerçekleştirilmektedir. Türkiye Cumhuriyeti Karayolları Genel Müdürlüğü 01.01.2010 tarihi verilerine göre Türkiye’de otoyol, devlet yolu ve il yollarından oluşan karayolu uzunluğu 64 319 km’ dir (KGM, 2010).

Karayolları inşaatı planlama, projelendirme ve yapım süreci göz önüne alındığında ciddi bir zaman, emek ve maliyet gerektirmektedir. Götürülen oturan yol ağlarından dolayı, yeni bir yolu inşa etmenin yanı sıra, mevcut karayollarının bakım ve onarım çalışmaları daha ön plana çıkmaktadır. 2007 yılı ülkemiz toplam bütçesinin %2’si karayollarına ayrılmıştır ki, bu miktar yaklaşık 3.5 trilyon Türk Lirasına karşılık gelmektedir.

Tabakalı olarak inşa edilen karayolu esnek üstyapısının trafiğe açılmasından itibaren ömrünü tamamlayıncaya kadar geçen süre içerisinde, üzerinden geçen trafiği taşıyabilmesi ve iklim koşullarına karşı dayanıklı olması beklenmektedir. Bütün beklentileri karşılayacak bir üstyapı oldukça yüksek bir maliyet gerektirmektedir. Bu sebepten dolayı hem ekonomi hem de yol performansı dengelenmelidir. Yapım aşamasında ve sonrasında yol üstyapısının durumunu gözlemlemek için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bunlar yoldan karot numunesi alınarak laboratuvar

koşullarında gerçekleştirilen tahribatlı deneyler ve yolda herhangi bir deformasyona sebep olmadan gerçekleştirilen tahribatsız deneylerdir.

Dünyada son yıllarda oldukça gelişmiş olan tahribatsız deney aletlerinin, yol üstyapısının durumunu belirlemekteki başarısının git gide arttığı görülmektedir. Yerinde uygulanan tahribatsız deney yöntemleri ile üstyapının karakteristiklerini, üstyapının geometrik ya da mühendislik özelliklerinde herhangi bir kalıcı değişiklik olmadan tekrarlı olarak belirlemek ve değerlendirmek mümkündür. Üstelik bu yöntemlerin, üstyapının yapısal tasarımı, inşaat sırasında projesine uygunluğunun sağlanması ve üstyapıda zamanla gerçekleşen bozulmaların belirlenerek duruma uygun rehabilitasyon uygulamalarının seçilmesi gibi durumlarda uygulanması mümkün olabilmektedir.

Karayolu esnek üstyapıları projelendirilirken belirli bir süre dahilinde üzerinden geçecek trafiği ciddi bozulmalara maruz kalmadan taşıyabileceği planlanmaktadır. Ancak iklim ve çevre koşulları başta olmak üzere, planlama safhasında düşünülen fazla trafik akışı ve özellikle ağır trafik yüklerinden dolayı zamanla üstyapıda çeşitli bozulmalar meydana gelmektedir. Bu bozulmaların trafik akışını olumsuz derecede etkilemesinden önce, yani yolun fiziksel durumu değişmeden tespit edilip yol özelliklerinin iyileştirilmesi projenin ekonomik ömrünü tamamlamasını sağlayacaktır.

Karayolu esnek üstyapısı tabakalı bir sistem olduğu için yapım aşamasında tabakalar arasındaki bütünlüğün sağlanması çok önemlidir. Eğer bu süreklilik durumu sağlanamazsa ağır trafik yüklerinin de etkisiyle tabakalar arasında ayrışmalar meydana gelecek, daha sonrasında bu süreksizlik durumu artarak yolda ciddi bozulmalara sebep olacaktır. Dolayısıyla üstyapının üzerine gelecek olan trafik yüküne karşı taşıma gücünde azalmalar meydana gelecektir.

Yapılan bu çalışmada, karayolu esnek üstyapılarında meydana gelen tabakalar arasındaki süreksizlik durumunun belirlenmesinde tahribatsız deney yöntemlerinden biri olan sismik yöntemin kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu amaçla süreksizlik

durumlarını simule eden 42 m uzunluğunda üç tabakalı bir yol inşa edilmiş, tabakalar arasında farklı derecedeki süreksizlikleri simule edecek malzemeler yerleştirilmiştir. Bu yol üzerinde tahribatsız olarak gerçekleştirilen sismik deneyler uygulanmıştır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

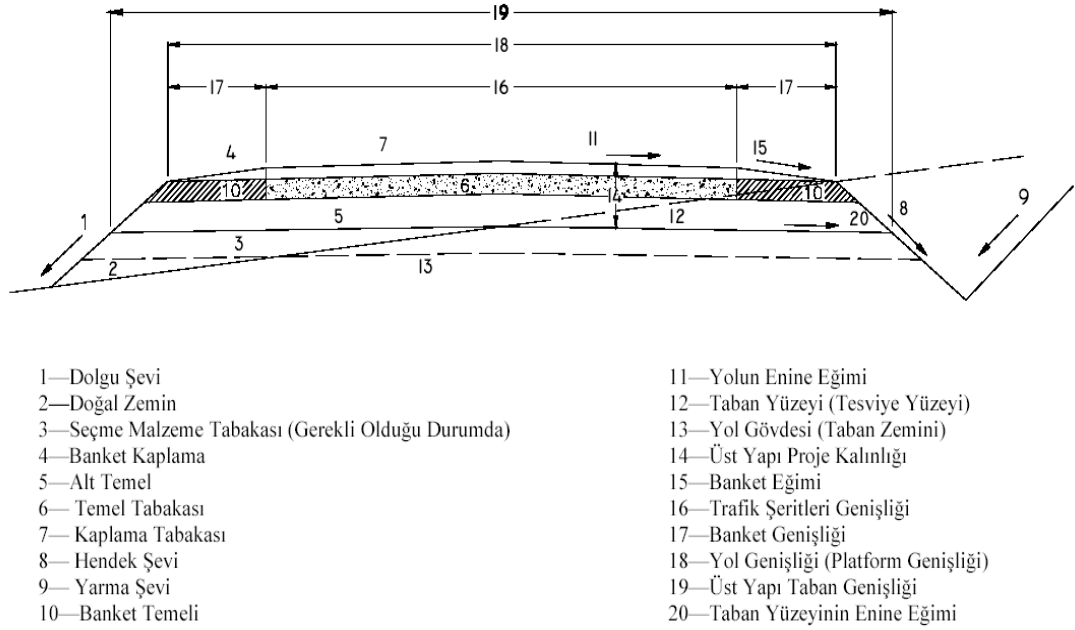
Trafik yükünü emniyetli bir şekilde taşıması ve farklı iklim koşullarında hizmet verebilmesi için tasarlanan tabakalı üstyapılar genel olarak iki farklı şekilde inşa edilmektedirler. Bunlar kaplama tabakası bitüm olarak inşa edilen esnek üstyapılar ile kaplama tabakası beton olan rijit üstyapılardır. Türkiye karayollarında çeşitli sebeplerden dolayı esnek üstyapılar tercih edilmektedir.

2.1. Esnek Üstyapılar

Üzerine gelen trafik yüklerini bünyesindeki çeşitli tabakalardan aktararak altyapının taşıyabileceği değere indirip, altyapıyı trafiğin ve çevresel koşulların olumsuz etkilerinden koruyup, en alttan en üste doğru nitelik ve taşıyıcılık bakımından daha iyi malzemelerden inşa edilen (alttemel, temel ve kaplama), düzgün bir yuvarlanma yüzeyine sahip, bağlayıcısı bitümden oluşan tabakalı yol yapısına “Esnek Üstyapı” denilmektedir (İlcalı vd., 2001; Açar vd., 1998). Tipik bir esnek üstyapı Şekil 2.1’ de görülmektedir. Karayolu esnek üstyapılarında her bir tabaka, üzerine gelen yükü bir alttaki tabakaya bir miktar yayararak iletmektedir. Bu durum sayesinde taban zeminine ulaşan yük kaplama tabakasına göre daha geniş bir alana yayılmış olmaktadır. Esnek üstyapılarda oluşan gerilmelerin değerleri yolun en üst tabakasından alta inildikçe düştüğü için, kullanılacak malzemelerin mekanik özellikleri de bu gerilme dağılışına uygun olarak seçilmektedir (Sezgin, 2003).

Üstyapıların trafik yüklerine ve iklimin bozucu etkilerine doğrudan maruz kalan en üst tabakası kaplama tabakasıdır. Trafik yükleri nedeniyle oluşan basınç ve çekme gerilmelerinin en yüksek seviyede olması nedeniyle diğer tabakalara göre daha yüksek elastisite modülüne, araç trafiğini emniyetli ve konforlu bir şekilde geçirebilmesi için yeterli pürüzlülükte üniform bir yuvarlanma yüzeyine ve iklim etkilerinden dolayı geçirimsizlik özelliğine sahip olmalıdır. Gerekli görüldüğü taktirde aşınma ve binder olarak iki tabaka halinde inşa edilebilir. Aşınma tabakası çok kaliteli inşa edilmesi gereken, trafiğe dayanım yanında su geçirimsizliğini sağlamak ve sürtünme oluşturmakla görevlidir. Binder tabakası ise kaplama

tabakasının kalın olması durumunda sıkıştırmada kolaylık ve ekonomi sağlamak için, aşınma tabakasına göre daha iri agregalardan inşa edilen tabakadır. Ayrıca, kaplama tabakasının taşıtlardan su sıçramasını ve yol yüzeyindeki küçük havuzcukların oluşmasını önlemek için drenaj tesislerine sahip olması gereklidir (Umar ve Ağar, 1991).



Şekil 2.1. Tipik bir esnek üstyapı kesiti (Ağar vd., 1998)

Temel tabakası, üstyapının oturduğu doğal zemin olan taban zeminini koruyan, bir veya birden fazla tabakadan oluşabilen, kaplama tabakasından gelen trafik yüklerini alt tabakalara ileten tabakadır. Temel tabakasının asıl görevi kaplama tabakasına dayanak sağlamak, taşıtların geçişlerinden dolayı oluşan gerilmeleri taban zemininin taşıma gücü sınırları içinde yaymaktır. Temel tabakası duruma göre çimentolu veya bitüm bağlayıcılı karışım, stabilize edilmiş veya dikkatle seçilmiş granüler malzemeden inşa edilebilmektedir. Trafik hacminin yüksek olduğu kesimlerde bitümlü karışımlar daha yaygın olarak kullanılmaktadır (Saltan, 1999).

Alttemel tabakası, taban zeminini ile temel tabakası arasına yerleştirilerek sıkıştırılan daneli malzeme veya uygun bir bağlayıcı malzeme ile stabilize edilmiş ve dona daha hassas olan taban zeminlerinde oluşan buz mercceklerinin yukarıdaki tabakalara doğru

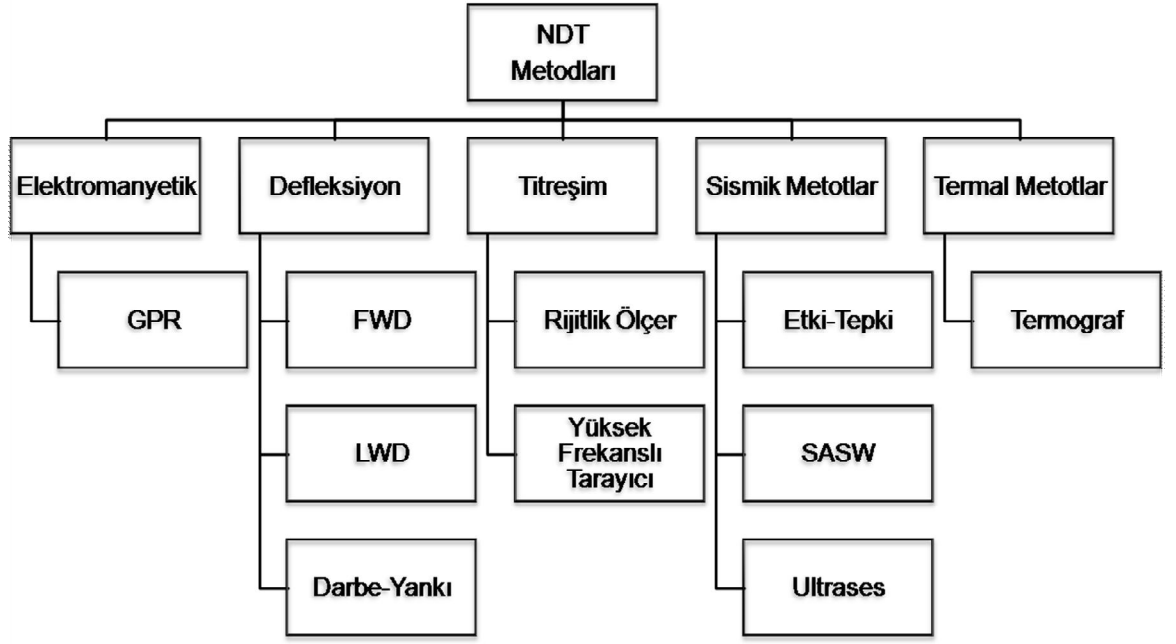
yükselmesi sonucu oluşacak don kabarmasını önlemek için inşa edilen tabakadır (Umar ve Ağar, 1991).

Bütün yapılarda olduğu gibi karayolu üstyapıları da taban zemini üzerine oturmaktadır. Taban zemini, sıkıştırılmış doğal zeminden oluşmaktadır. Bir esnek üstyapının davranışı taban zemininin taşıma gücü ile doğrudan doğruya ilişkili olduğundan, yapısal olarak en önemli tabakadır. Üstyapı yükü son olarak bu tabakaya iletilmektedir. Bu tabakanın esas görevini iyi yapabilmesi için iyi bir drenaja sahip olmalıdır (Karaşahin, 1993).

Karayolu üstyapıları genel olarak, yukarıda tabaka özellikleri verilen esnek üstyapı ve çimento betonu ve agregadan inşa edilen, yüksek eğilme mukavemetine sahip olan rijit üstyapılar olarak iki ana grupta inşa edilmektedirler. Rijit üstyapılarda alt tabakalar esnek üstyapı tabakaları ile benzer özelliktedir. Ancak aşınma tabakası, portland çimento betonundan inşa edilerek anolar halinde dökülmektedir.

2.2. Tahribatsız Deney Yöntemleri (Non-Destructive Tests – NDT)

Mevcut bir esnek üstyapının fiziksel durumu hakkında bilgi edinmek ve uygun bakım programını seçmek için mekanik özelliklerin belirlenmesinde var olan en güvenilir yöntemlerden biri tahribatsız deney yöntemleridir. NDT metotları, üstyapıya zarar vermeden üstyapının değerlendirilmesi, kısa sürede birçok noktada veri toplanabilmesi ve yorumlama kolaylığı ve kolay uygulanabilirliği gibi sebeplerden dolayı yaygın olarak tercih edilmektedir. Dünyada farklı teknikleri kullanan çeşitli NDT metotları mevcuttur. Bu metotlar Şekil 2.2’ de özetlenmiştir. Şekilde gösterilen farklı deney metotlarının geliştirilmesine ve birbirinden farklı birçok mühendislik problemlerinin çözülmesi üzerindeki çalışmalara halen devam edilmektedir.



Şekil 2.2. Mevcut NDT yöntemleri

2.2.1. Tahribatsız deney yöntemlerinin literatürdeki yeri

Karayolu üstyapıları tabaka kalınlıklarının belirlenmesi ile üstyapının zamanla değerlendirilmesi mümkün olup, tabaka kalınlıkları üstyapı yönetim sisteminde önemli bir parametre olarak kullanılmaktadır. Örneğin var olan bir üstyapıyı yapısal olarak güçlendirmek için inşa edilecek olan tabakanın tasarımında, kalite kontrol aşamasında ve üstyapının kalan servis ömrünün belirlenmesinde yapısal kapasite tahmini için tabaka kalınlıklarının belirlenmesi gerekmektedir. Tabaka kalınlığının tahribatsız ve hızlı bir şekilde belirlenmesi için zemin penetrasyon radarının kullanımı giderek artmakta ve bakım onarım işlemleri için standartlaştırma çalışmaları devam etmektedir. Maser (1994), Lenngren et.al. (2000), Willett and Rister (2002), Bastard et.al. (2007) ve Pinel et.al. (2009) GPR deney aletini kullanarak üstyapı tabakalarının kalınlıklarını belirlemek amaçlı çalışmalar yapmışlardır. Bu çalışmalara ilave olarak, üstyapının sürekli profilinin belirlenmesine (Wu et.al., 2003), var olan üstyapının güçlendirilmesi için ilave tabakanın tasarlanmasına (Harris et.al., 2004) ve üstyapıların ve köprülerin fizibilite çalışmalarına (Maser, 2006) ait çalışmalar da literatürde bulunmaktadır.

Günümüze dek üstyapının yapısal durumunu belirlemekte kullanılan çok sayıda tahribatsız deney aleti geliştirilmiştir. Farklı bir kategoride değerlendirilen ve defleksiyon ölçümünde kullanılan test metotları günümüz teknolojisinde oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu aletler, yük seviyelerindeki farklılıklar, üstyapıya uygulanan yükün şekli ve defleksiyon ölçülen noktaların sayısına bağlı olarak farklılıklar göstermektedir. Düşen ağırlık deflektometresi üstyapı malzeme karakterizasyonu ve üstyapının performansı (Siddharthan et.al., 1991), tabakalar arasındaki aderans durumunun belirlenmesi (Al-Hakim et.al., 2000), üstyapının rijitliği (Lu et.al., 2008) ve farklı tahribatsız deney metotları ile karşılaştırmalı olarak verilen bir çok çalışmada (Little and Yusuf, 2001; Saedd and Hall, 2002; Wimsatt and Scullion, 2003; Noureldin et.al., 2003; Uzarowski et.al.,2005) kullanılmıştır.

Farklı bir metodoloji kullanan yüksek frekanslı sarsma cihazı ile küçük bir yüzeye ait en küçük ayrıntıların elde edilmesi mümkün olmaktadır. Bu alet kullanılarak üstyapı üzerinde çeşitli çalışmaların uygulanabilirliğinin araştırılmasına devam edilmektedir (Watts et.al., 2009; Celaya et.al., 2010).

Bir diğer tahribatsız deney metodu olan termal metotlar uzun zamandır sıcak karışım asfalt üstyapıların inşası sırasında üstyapı sıcaklığının takip edilmesinde kullanılmaktadır. Ancak son zamanlarda bu tür aletler yardımı ile, mevcut bir üstyapı yüzeyindeki farklı sebeplerden dolayı var olan ısı farklılıklarından yararlanılarak problemleri kesimlerin yerlerinin belirlenmesi mümkün olmaktadır. Özellikle son yıllarda geliştirilmiş olan kızılötesi kameralar sıcaklıkları renkli ısı göstergeleri ile göstermekte ve bu halleriyle kayıt etmeye imkan sağlamaktadır. Üstyapılardaki sıcaklık farklılıklarına dayalı farklı çalışmalar halen devam etmektedir (Myers et.al., 2001; Dumoulin and Ibos, 2010).

Günümüz koşullarında esnek üstyapıların tasarımında her bir tabakaya ait modül değerleri, kalınlık ve poisson oranlarını hesaba katan mekanistik-ampirik tasarım yöntemleri kullanılmaktadır. Ancak malzeme ve bütün olarak tabakalar bu parametrelere bağlı değildir. Temel anlamda kabul edilebilir kıstas, yerleştirilip sıkıştırılan malzemenin uygun kalınlığına ve uygun yoğunluk değerlerine bağlı

olmasıdır. Herhangi bir mekanistik üstyapı tasarım sürecinin başarılı olması ve performansa dayalı şartnamelere doğru ilerlenmesi için her bir tabakaya ait modül, kalınlık ve poisson oranlarını ölçebilen aletlerin geliştirilmesi elzem hale gelmektedir. Bu amaçla çeşitli deney aletleri geliştirilmiştir. Bunlar sismik üstyapı analizcisi ve bu alete göre daha pratik ve hızlı analiz yapabilen aynı zamanda taşınabilir bir sistem olan taşınabilir üstyapı analizcisidir. Bu aletlerin son yıllarda kullanımı diğer tahribatsız deney aletlerinde olduğu gibi git gide yaygın hale gelmektedir. Literatürde SPA ve PSPA deney aletleri ve diğer tahribatsız deney aletleri ile karşılaştırmalı çeşitli çalışmaların var olduğu görülmektedir. Bunlardan bazıları genel hatlarıyla verilmiştir:

Nazarian et.al. (1999) inşaat süreci boyunca kalite kontrol için kullanılan laboratuvar ve arazi deneylerinin sonuçları ile sismik yöntemin birlikte kullanılması için bir çalışma yapmışlardır. Çalışmanın sonucunda, asfalt betonu tabakasından alınan karot numuneler üzerinde uygulanan çeşitli sismik deney aletlerinden elde edilen sonuçlar ile arazide yerinde ölçümlerle elde edilen sismik deney sonuçlarını birbirine oldukça yakın bulmuşlardır. Bu sonuçların aynı zamanda FWD gibi defleksiyon tabanlı yöntemlerle de oldukça yakın olduğu belirlenmiştir. Laboratuvar numuneleri arazi numuneleri ile aynı yoğunluk ve nem muhtevasında hazırlanması durumunda, temel ve taban zemini için de sonuçların oldukça yakın olduğunu görmüşlerdir.

SPA gibi sismik dalga yayılımına dayalı deney aletlerinde oluşturulan sinyallerde ciddi oranda düzensizlikler meydana gelebilmektedir. Uygun zaman kayıtlarını elde edebilmek için deney prosedürü bir kaç kere tekrarlanmak zorunda kalınmaktadır. Sinyalleri değerlendirmek için deney aleti operatörleri kendi kişisel tecrübelerinden yararlanmaktadırlar. Bu problemi çözmek için Tawfiq et.al. (2002) sismik kayıtların kendi dalga formlarına göre kategorize edilmesini ve sinyallerdeki düzensizliğin miktarını tanımlamak için bir α değerini kullanmışlardır. Bu düzensizlik faktörü (α) arazide deney yapılırken sinyallerin seçilmesindeki varsayıma dayalı süreci ortadan kaldırmış ve geri hesaplama analizlerine geçmeden önce bu düzensizliklerin üstyapı tabakalarının modül değerlerine etkisini belirlemekte kullanılmıştır. Bu değer

doğruluğunu belirlemek için kalibrasyonu iyi yapılmış bir FWD' den elde edilen değerlerle karşılaştırmalar yapmışlardır.

Saeed and Hall (2002) NDT deney aletlerinin asfalt betonu üstyapısının özelliklerini belirlemede doğruluklarını araştırmışlardır. Bu amaçla tipik bir üstyapıyı temsil eden on farklı bölge FWD, SPA, PSPA, GPR ve DCP aletlerini kullanarak yaz ve kış mevsimlerinde deneyler yapmışlardır. Tahribatsız deneylerin ardından elde edilen NDT test sonuçlarını değerlendirmek amacıyla fiziksel ve mekanik özelliklerini laboratuarda belirlemek için karot numuneleri almışlardır. Gerçekleştirilen deney sürecinin ardından tabaka kalınlıklarını belirlemede GPR ve SASW yöntemi kullanılarak analizi gerçekleştirilen APA karot numunelerine çok yakın değerler alınmıştır. Aynı zamanda GPR'ın üstyapıdaki süreksizliklerin ve yapısal değişimlerin belirlenmesinde oldukça başarılı olduğunu görmüşlerdir. Asfalt betonu tabaka modüllerinin belirlenmesinde ise hem FWD hem de SPA' nın benzer şekilde sonuçlar elde etmişlerdir.

İnce asfalt tabakaların altındaki sayısı bilinmeyen tabakalara sahip üstyapılarda yüzey altındaki tabakaların modüllerinin belirlenmesi oldukça güç olmaktadır. FWD sonuçlarının geri hesaplanması ile modül değerleri elde edilmesi güçtür. Bazı durumlarda karot numunelerinde dahi modül değerlerinin belirlenmesi mümkün olamamaktadır. Üstyapıya ait sismik verilerin değerlendirilmesi üstyapının yüzey modülünün belirlenmesinde kullanılan iyi bir yöntemdir. Mallick et.al. (2005) bir esnek üstyapının yüzey ve yüzey altındaki tabakalarına ait modül değerlerinin belirlenmesinde etkili bir şekilde kullanılabilmesi için sismik veri toplanmasına ait basit bir metodoloji sunmuşlardır. Köpük asfalt stabilize temele sahip üç farklı sıcak karışım asfalt tabakası üzerinde taşınabilir sismik ve düşen ağırlık deflektometresi ile deneyler yapmışlardır. Deney bölgelerinden karot numuneleri alarak bu numuneler üzerinde esneklik modülü deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Bütün deneyler sonucunda elde ettikleri sonuçları karşılaştırmış, köpük asfalt üzerinde sıcaklığın etkisini değerlendirmiş, bir ısı düzeltme faktörü geliştirmişler ve tabakalı elastik analiz ile elde edilen defleksiyon değerini gözlemlenen defleksiyon ile karşılaştırmışlardır. Sonuç olarak sismik deney verilerini kullanarak rasyonel bir

metot ile ısı düzeltme formülü geliştirmişlerdir. Köpük asfaltların değerlendirilmesinde bu tarz hızlı ve tahribatsız deney metotlarının etkinliğini göstermişlerdir.

Gucunski et.al. (2003) sıcaklık değişiminin ve mevsimsel iklim farklılıklarının üstyapı tabaka özellikleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Bu amaçla A.B.D.'nin New Jersey eyaletinde yirmi dört esnek, rijit ve kompozit üstyapı kesimlerinde ısı, donma-çözünme, nem, yeraltı suyu ve çevresel değişimlerin (hava sıcaklığı ve sağanak yağış) sürekli takip edildiği bölgelerde FWD ve SPA kullanılarak 2 yıllık yerinde ölçümlerin değerlendirmesini yapmışlardır. FWD ve SPA deneyleri birer aylık periyotlarla uygulanmıştır. Bu çalışmanın sonucunda özellikle sismik tekniklerin mevsimsel sıcaklık farklılıklardan dolayı meydana gelen modül değerleri üzerindeki etkisini bulmuşlardır.

Genel itibariyle tahribatsız deney metotları incelendikten sonra, bu metotlara ait genel bilgiler ile aletlerin çalışma prensipleri daha ayrıntılı olarak verilmektedir.

2.2.2. Elektromanyetik metot

2.2.2.1. Zemin penetrasyon radarı (Ground penetrating radar – GPR)

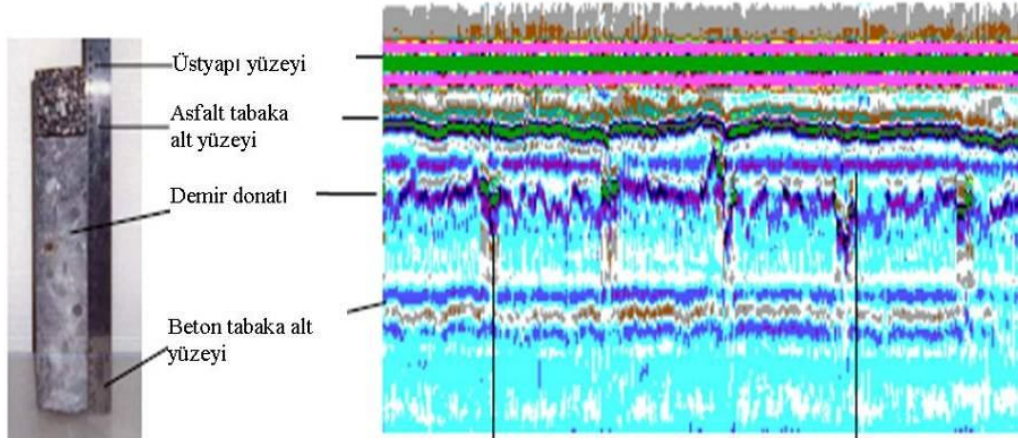
GPR genellikle üstyapı tabaka kalınlıklarının ölçülmesinde (ASTM D4748), üstyapıdaki yapısal değişimlerin ve anormalliklerin yerlerinin belirlenmesinde, beton plakalar altındaki boşlukların bulunmasında, beton üstyapılarda birleşim yerlerindeki öngerme ve tutturmaların yerlerinin belirlenmesinde ve asfalt üstyapılardaki nemin verdiği zararın (soyulma) belirlenmesinde kullanılmaktadır (Şekil 2.3). Bu teknoloji ilk olarak 1960' larda geliştirilmiştir (Morey, 1998).



Şekil 2.3. Zemin penetrasyon radarı

GPR 1970' lerin sonlarından beri karayolu üstyapı değerlendirme deney aleti olarak kullanılmaktadır. Bu alet kontrollü trafik altında tahribatsız olarak büyük miktarlarda sürekli veri toplama kabiliyetine sahiptir. Rijit üstyapılarda GPR, üstyapı köşeleri altındaki boşlukların ve çelik donatıların yerlerinin belirlenmesinde kullanılmaktadır.

Bir üstyapıda GPR deneyi uygulanması sırasında, kısa radyo dalga enerjisi antenler aracılığı ile üstyapı yüzeyine iletilir. Bu itkiler, malzeme içerisindeki dielektrik süreksizliğinin durumu ve yerine bağlı olarak çeşitlilik gösteren gidiş dönüş zamanı ve genlikler ile birlikte antene geri yansımaktadırlar (hava/asfalt, asfalt/temel, vs.). Yansıyan enerji yakalanır ve radar dalga formu olarak tanımlanan itki serisi formunda osiloskopta gösterilebilir. Üstyapı tabaka malzemeleri boyunca seyahat eden ve yansıyan bu enerji, farklı malzemelerin (tabakaların) sınırlarını oluşturur; bu yansımanın gücü ve gidiş dönüş süresi tabaka kalınlıklarının belirlenmesinde kullanılmaktadır (Maser, 2000). Şekil 2.4'te GPR ile elde edilen bir görüntü verilmiştir. Bu şekilde tabakaları ayıran bir boşluğun ya da bir nesnenin varlığı açık bir şekilde görülmektedir.



Şekil 2.4. GPR verisi örneği

2.2.3. Defleksiyon metodu

Defleksiyon, bir yük altında üstyapının tepkisinin ölçümü olarak tanımlanmaktadır (Hudson and Uddin, 1987). Defleksiyon metotları büyüklüğü bilinen bir yük altında üstyapıda oluşan yüzey defleksiyonlarının ölçülmesidir. Eğer ölçüm yapılan üstyapı kesiminde bir bozukluk durumu varsa bu bölgede ölçülen defleksiyon değerinin normal bir üst yapı kesimine göre daha büyük değerler vermesi beklenmektedir.

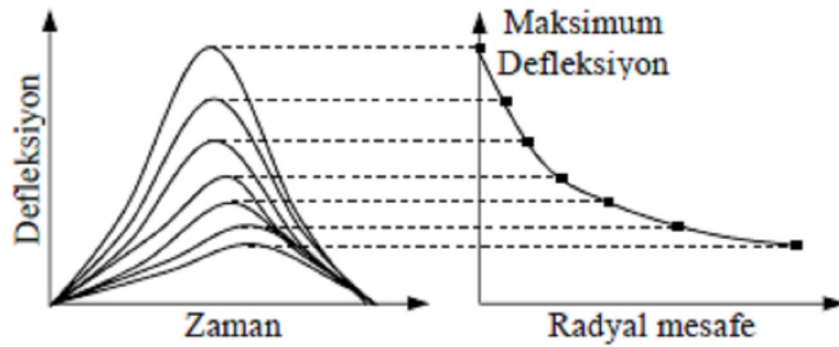
2.2.3.1. Düşen ağırlık deflektometresi (Falling weight deflectometer – FWD)

Dinamik geçici yüklemede, kaplama yüzeyine bir darbe yükü uygulanır ve yükün uygulama yerinden farklı uzaklıktaki ve bir eksen üzerinde bulunan noktalardaki defleksiyon değerleri zamana bağlı olarak kayıt edilmektedir. Kayıt edilen defleksiyon değerlerinin maksimumları seçilerek defleksiyon eğrisi elde edilmektedir. Şekil 2.5’ te bir araç tarafından çekilen FWD görülmektedir.



Şekil 2.5. Tipik bir FWD aleti

Geçici yükleme esasına göre çalışan FWD deneyinde, belirli bir ağırlık, uygulanmak istenilen etki seviyesine göre belirli bir yükseklikten kaplama yüzeyine düşürülür. Yükleme (6.7 kN ile 156 kN arasında), dairesel bir plaka ile yapılır ve kaplama yüzeyi ile plaka arasında lastik bir conta bulunur (ani darbe etkisinin azaltılması için). 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 0.025sn^{-1} ile 0.030sn^{-1} arasında değişir (Stolle, 1991; Göktepe vd., 2005). Şekil 2.6’da tipik bir FWD defleksiyon kaydı görülmektedir.

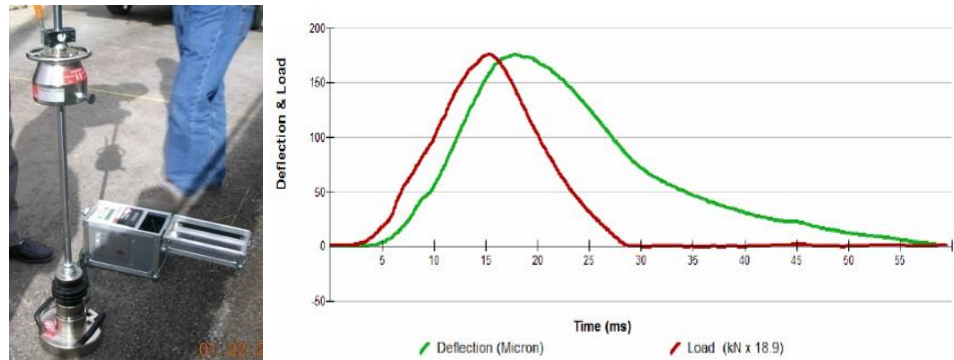


Şekil 2.6. Tipik bir FWD defleksiyon grafiği (Göktepe vd., 2005)

FWD statik bir ön-yüklemeye ihtiyaç duymaz ve yüklemeler daha düşük ağırlıklar ile yapılır. Sonuç olarak, yüksek ağırlıklı trafik yükleri, küçük ağırlıklar uygulanarak benzeştirilebilir (Hoffman and Thompson, 1982; Meier, 1995). FWD tarafından uygulanan darbe etkisi, yük uygulama süreleri çok farklı olsa bile, standart dingil yüklerinin oluşturduğu etkiye son derece yakındır ve diğer NDT yöntemlerinden daha başarılı sonuçlar vermektedir (Hoffman and Thompson, 1982; Tholen et.al., 1985; Sebaaly et.al., 1985; Bentsen, 1989; Zhou, 2000; Tawfiq et.al., 2000). FWD yöntemi ile, gerçek zamanlı ve diğer yöntemlere göre daha fazla veri elde etmek mümkündür (Meier, 1995).

2.2.3.2. Hafif ağırlık deflektometresi (Light weight deflectometer – LWD)

Hafif düşen ağırlık deflektometresi, FWD' nin hafif yük uygulayan versiyonudur ve kullanılması bir kişi tarafından kolaylıkla yapılabilir. Yükleme plakasına lastik tampon ile kalibre edilmiş sistemden çeşitli temas basıncı iletmek için, belirli bir ağırlık (10 kg, 15 kg ya da 20 kg) farklı yükseklikten düşürülmektedir. LWD üstyapı yüzeyindeki tek bir tekerleğin hareketini simule etmektedir. Bir hız transduseri ile hem yükü hem de defleksiyonları ölçmek mümkündür. Yük merkezi altındaki defleksiyon ölçülüp ve ilave jeofonlar kullanılarak yükleme merkezinden uzakta iki okuma daha alınabilmektedir. Defleksiyon eğrisi otomatik olarak ölçülüp kaydedilmektedir (Horak et.al., 2008). Şekil 2.7'de LWD ve LWD'den elde edilmiş tipik bir defleksiyon eğrisi görülmektedir.

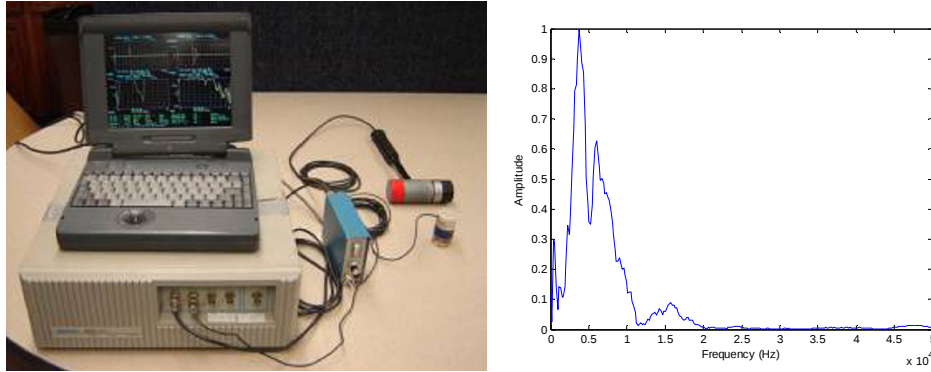


Şekil 2.7. LWD ve tipik bir defleksiyon eğrisi

2.2.3.3. Etki tepki metodu (Impulse response – IR)

Etki tepki metodunun prensibi, üstyapı yüzeyine bir çekiç ile darbenin uygulanması ve ardından bir ivme ölçer yardımı ile bu darbenin dikey dinamik yansımasının ölçülmesinden ibarettir (Sangiorgi et.al., 2003). Şekil 2.8’de tipik bir IR aleti ve bu aletten elde edilen tipik bir genlik frekans eğrisi verilmiştir.

Bu metot incelenen malzeme boyunca gerilme dalga yayılımını başlatmak için düşük şekil değiştirmeye sahip bir darbe kullanmaktadır. Uygulanan etkiye karşılık gelen tepki miktarı ölçülür ve incelenen kesimin durumunu belirlemek için analiz edilir. Elde edilen tepki değeri bir hız transdüseri (jeofon vs.) ya da bir ivme ölçer kullanılarak ölçülmektedir. Verilerin toplanıp depolanması için hem darbe çekici hem de alıcı taşınabilir bir bilgisayara bağlanmaktadır.



Şekil 2.8. Tipik etki-tepki deney aleti ve ölçülmüş genlik-frekans eğrisi

2.2.4. Titreşim metodu

2.2.4.1. Rijitlik ölçer

Zemin rijitlik ölçer diğer adıyla Humboldt GeoGauge, yerinde zeminin rijitliği ölçme aleti olarak Humboldt Üretim Şirketi tarafından 1990’ların ortasında geliştirilmiştir. Bu alet zeminin elastik modülünü ve rijitlik değerini yerinde ölçen, kullanımı oldukça basit olan taşınabilir bir alettir (Şekil 2.9). Zemin rijitlik ölçer deney aleti 28 cm çapında ve yaklaşık 25 cm yüksekliğinde olup yaklaşık 10 kg ağırlığındadır.

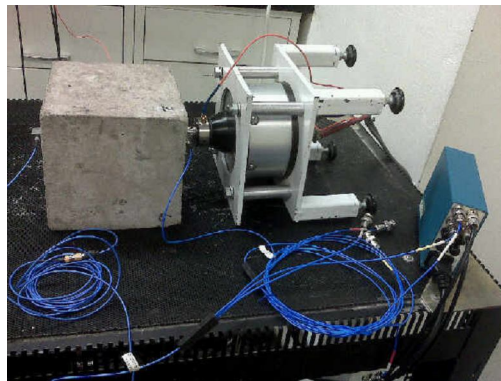
Zemin rijitlik ölçer aleti zemin tabakalarının kalite kontrolünü yerinde yapabilmek için geliştirilmiş bir alettir. Bu alet çok küçük yükleme genliği kullanarak 100 Hz ile 200 Hz frekans aralığında zemine titreşim göndermektedir. Frekansla (rijitlik spektrumu) rijitlikteki (yer değiştirme/yük) değişim malzemenin modül değerini ölçmek için kullanılmaktadır.



Şekil 2.9. Humboldt rijitlik ölçer

2.2.4.2. Yüksek frekanslı tarayıcı

Yüksek frekanslı el ile taşınabilen elektromanyetik/piezoelektrik sarsıcı, Wilcoxon Araştırma Şirketi tarafından askeri uygulamalar için geliştirilmiş bir alettir (Şekil 2.10). Bu alet ile, yüksek enerji seviyesinde (yatay, düşey ya da açılı olarak) ve yüksek frekanslarda (kilohertz) titreşim oluşturarak, kullanıldığı alana ait ince detaylar elde edebilmek mümkün olmaktadır (Celaya et.al., 2010).



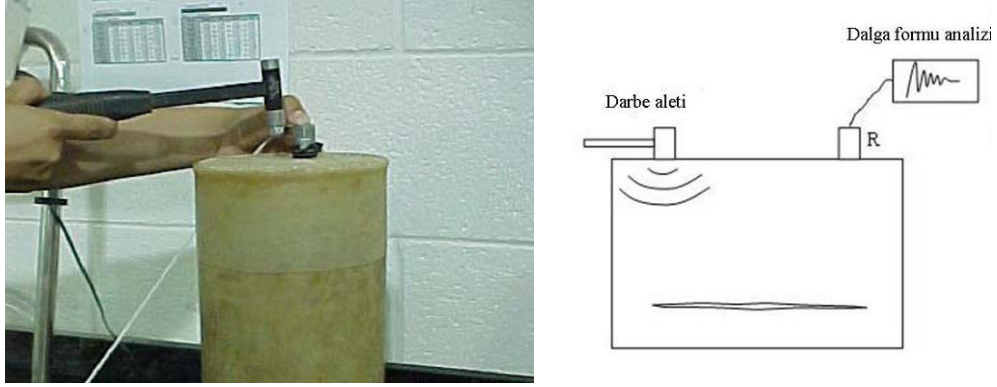
Şekil 2.10. Elektromanyetik/Piezoelektrik sarsıcı sistem

2.2.5. Ses/sesüstü sismik metotlar

Sismik ses ve sesüstü metotları malzeme karakterizasyonu veya hasar durumuna bağlı olarak elastik dalga yayılım prensibine dayanmaktadır. Malzeme yüzeyi bir nokta kaynak ile darbeye maruz kaldığında, bu malzeme yüzeyi boyunca farklı elastik dalga yayılımları oluşmaktadır. Bu dalgalar yüzey dalgaları ve vücut dalgaları (iç dalgalar) olarak iki gruba ayrılmaktadırlar. Sıkışma (P dalgası) ve kesme (S dalgası) dalgalarını içeren vücut dalgaları malzeme içerisinde küresel şekilde oluşmaktadır. Yüzey dalgaları (Rayleigh dalgası) ise vücut dalgalarının tersine silindirik bir formdadırlar. Bir tabakada oluşturulan sismik enerjinin yaklaşık üçte ikisini taşıyan yüzey dalgaları, vücut dalgalarına göre daha yüksek genliğe ve düşük oranda sönümlenmeye sahiptir (Nazarian et.al., 1993).

2.2.5.1. Darbe-yankı metodu (Impact echo – IE)

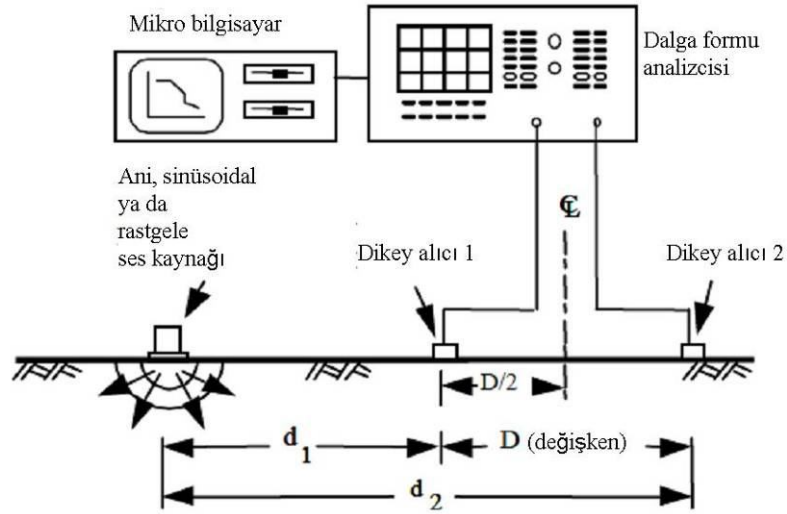
Darbe yankı (IE) metodu, uygulanan bir darbe (ses ile ultra ses arasındaki frekans değerlerinde) ve bir birinden farklı elastik özelliklere sahip malzemelerin ara yüzeylerinden yansıyan yankı değerinin belirlenmesinden ibaret bir metottur. Darbe yankı sistemi bir transdüser, darbe oluşturucu seti, bir veri toplama sistemi ve verileri toplamak ve değerlendirmek için gerekli olan bilgisayar sisteminden oluşmaktadır (Şekil 2.11). Darbe yankı metodu en üstte bulunan üstyapı tabakasının yüzeyi ile bu tabakanın tabanından yansıyan devamlı dalganın yansıyan frekansının belirlenmesine dayanmaktadır. Bu deney yöntemi ile üstyapı tabaka kalınlıklarını belirlemenin yanında boşluk, çatlakların ve bozulma bölgelerinin belirlenmesi ile üstyapı tabakaları arasındaki ayrışmaları ve üstyapı bütünlüğünü belirlemekte kullanılmaktadır (Sansalone and Carino, 1986; Lin and Sansalone, 1996).



Şekil 2.11. Etki-tepki deney aleti ve uygulaması

2.2.5.2. Yüzey dalgalarının spektral analizi (Spectral analysis of surface waves – SASW)

Yüzey dalgalarının spektral analizi (SASW) metodu ile kesme dalga hız profili elde edilmektedir. SASW'nin bir çeşidi olan Ultrasonik Yüzey Dalga metodunda (USW) ise frekans değerleri çok yüksek değerler almaktadır. Bu sebeple en üstteki üstyapı tabakasına ait kesme dalga hız profili elde edilmektedir (Nazarian et.al., 1993). Her iki metotta da, faz hızlarının dalga boyuna göre değişimi elde edilmektedir. Bu değişim dağılma eğrisi olarak adlandırılmaktadır. Dalga boyunun tabakanın kalınlığına eşit ya da tabaka kalınlığından daha küçük olması durumunda, yüzey dalgalarının yayılma hızı yaklaşık olarak dalga boyundan bağımsızdır. Üstyapının en üst tabakasının üniform bir yapıya sahip olduğu varsayımıyla, eğer yüksek frekanslı (düşük dalga boyuna sahip) dalgalar oluşturulursa, üst tabakaya ait faz hızı belirlenebilmektedir. Dalga boyu dolayısıyla faz hızı sabit olmayacak ve üst tabakaya ait kalınlığa bağlı olacaktır (Nazarian et.al., 1997). Şekil 2.12'de SASW metodunun genel bir düzeni gösterilmektedir.

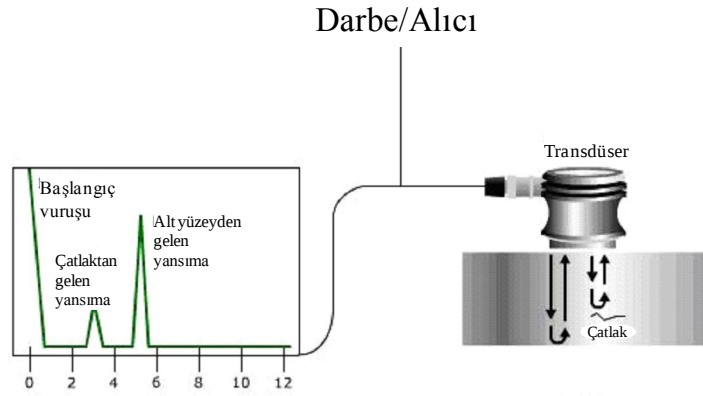


Şekil 2.12. İki kanallı SASW deneyinin genel düzeni (Stokoe et.al., 1994)

2.2.5.3. Ultrases

Tipik bir ultrases denetleme sistemi darbe-alıcı, transdüser ve görüntüleme ekran ünitelerinden oluşmaktadır. Darbe alıcı transdüser yüksek frekanslı ultrasonik enerji üretmesini sağlayan yüksek voltajlı elektrikli darbesi üretebilen bir elektronik alettir. Ultrasonik dalgalar ses frekanslarının (20 kHz üzerinde) elastik dalgaları olarak tanımlanmaktadır. Dolayısıyla ses enerjisi numune boyunca bir çeşit dalga boyunda iletilmektedir (Dunning, 2006). Ultrasonik metoda ait genel bir görünüm ve çalışma prensibi Şekil 2.13' te gösterilmektedir.

Garbacz and Garboczi (2003), ultrasonik deney yöntemini malzeme içindeki bozulmaların karakteristiklerinin belirlenmesinde, katı bir cismin kalınlığının ve mekanik özelliklerinin ölçülmesinde kullanmışlardır.

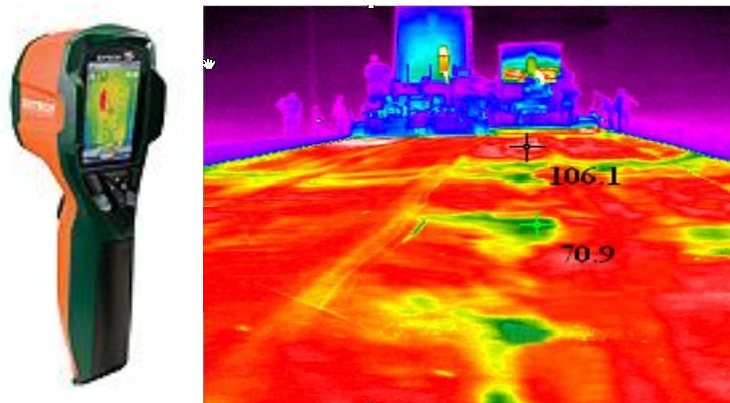


Şekil 2.13. Ultrasonik yansımada metodunun genel görünümü ve çalışma prensibi

2.2.6. Termal metotlar

2.2.6.1. Termograf

Kızıl ötesi termografi, farklı ısıdaki nesnelerden kızıl ötesi yayılımların farklılıklarının belirlenmesi ilkesine dayanmaktadır. Yüzeysel tabakalardaki boşlukların varlığı yüzey ısı dağılım haritalarında farklılıklara sebep olmaktadır. Bu farklılıklar kullanılarak bozulmalar belirlenebilmektedir. Şekil 2.14’ te tipik bir termografi cihazı ve asfalt üstyapıdan elde edilmiş bir görüntü verilmektedir.



Şekil 2.14. Tipik bir termografi aleti ve asfalt bir üstyapıdan elde edilen görüntü

2.3. Karayolu Üstyapısı ile İlgili Sismik Deney Aletleri

2.3.1. Sismik üstyapı analizcisi (Seismic pavement analyser – SPA)

Sismik üstyapı analizcisi (SPA), bozulmalara bağlı olarak üstyapının durumunu gözlemlemek için tasarlanmış ve yapılmış bir alettir. Bir rijit üstyapı altındaki boşlukların ve destek kaybının ölçümü, asfalt betonu üstyapılarda nem durumunun belirlenmesi, üstyapılardaki ince çatlakların belirlenmesi, tabakalar arasındaki delaminasyon ve asfalttaki yaşlanmanın ölçümü gibi çeşitli durumlarda kullanılmaktadır.

SPA iki tekerli bir treyler, hava basıncını ve elektronik kontrolü sağlayan cihazların bulunduğu treylerin arkasına monte edilmiş bir kutu ve jeofon ve ivmelendirici hava basınçlı silindirlerin bulunduğu dönüştürücü bir sistemden oluşmaktadır (Şekil 2.15). Dönüştürücü parçası 17 mm kanaldan oluşmaktadır ve hava basınçlı yay sistemi ile treylere bağlı olarak bulunmaktadır. Bu yaylar treyler ve kaynağın oluşturacağı titreşimlerinden dolayı dönüştürücü bölümünden bağlantısı kesilmiştir. Aynı zamanda üstyapının yüzey durumuna bağlı olarak düşey ölçümün düzgün bir şekilde yapılabilmesi için birkaç santimetrelik ayar aralığı bırakılmıştır.



Şekil 2.15. SPA deney aleti

Bu alet 5 ivmelendirici ve 3 jeofon ile yüksek ve düşük frekanslı havalı çekiçler ile üretilen yüzey dalgalarına karşı üstyapının tepkisini kaydetmektedir. Bir bilgisayar

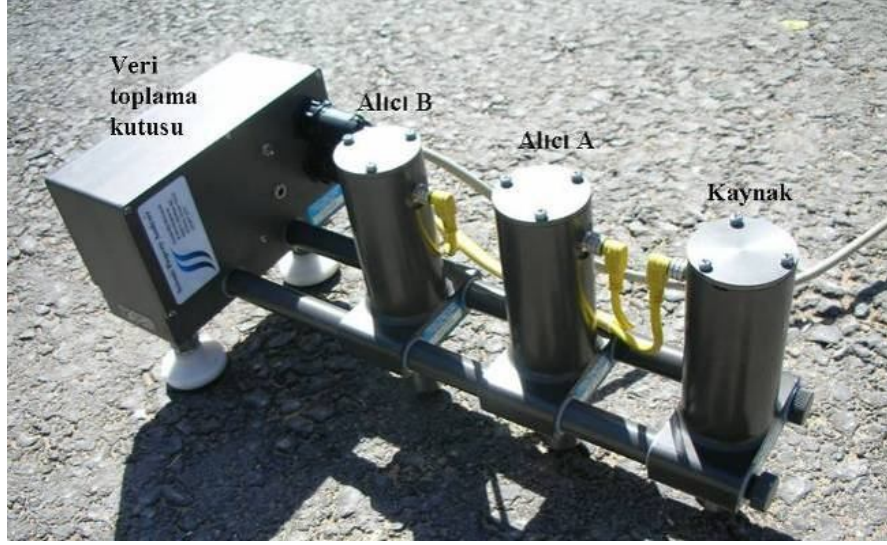
veri toplanmasını, alet kontrolünü ve açıklamaları kontrol etmektedir; ölçümler ve açıklamalar ekranda ve veri tabanı formatında rapor edilmektedir (Nazarian et.al., 1993).

SPA' nın kaynak dönüştürücü çerçevesi bir araç arkasında çekilebilen bir treylere takılır. SPA treyler etrafında aracın içinde ya da dışında çalışabilen bir bilgisayar ile bir teknisyen tarafından kontrol edilir. Alet, düşük frekanslı titreşimler oluşturan büyük bir havalı tokmak ve yüksek frekanslı titreşimler oluşturan küçük bir havalı tokmak ile sevk edilen yüzey dalgalarını dijital olarak kaydeder. SPA ile, bütün bir deney çerçevesi ve ekipmanı geri çekmek yaklaşık 1 dakikayı alır (Yuan et.al., 1998).

2.3.2. Taşınabilir sismik üstyapı analizcisi (Portable seismic pavement analyser – PSPA)

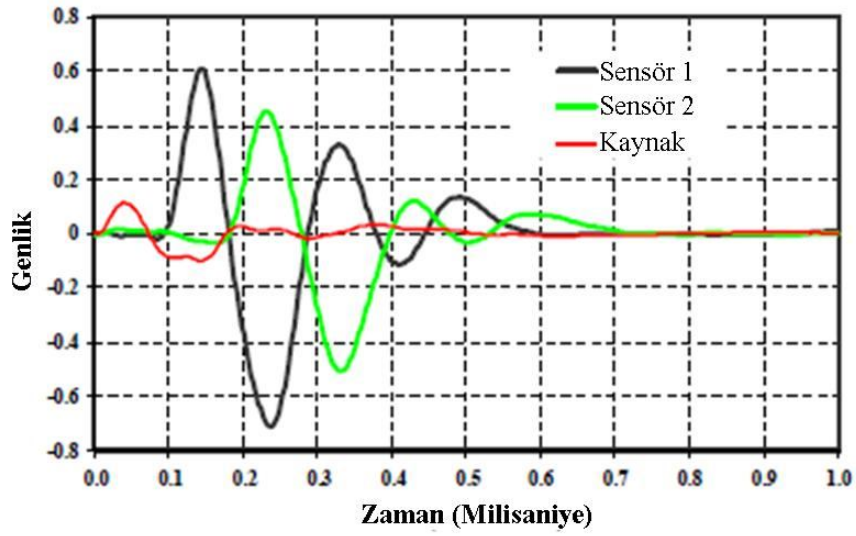
Baker et.al. (1995) tarafından geliştirilmiş olan, Sismik Üstyapı Analizcisinin basitleştirilmiş versiyonu olarak tasarlanan Taşınabilir Sismik Üstyapı Analizcisi (PSPA), bir üstyapının sismik rijitliğinin belirlenmesinde kullanılan tahribatsız bir deney aletidir. PSPA kullanılarak, arazide yüzey tabakalarının ortalama modülleri bir kaç saniye içinde tahmin edilebilmekte ve tabaka derinliği boyunca modüldeki değişim sağlıklı bir şekilde gözlemlenebilmektedir. Aynı zamanda bu alet, tabakaların sismik rijitliği, tabaka kalınlığı ve üstyapıdaki izotropi gibi parametreleri içeren, üstyapının durumu hakkında temel bilgilerin elde edilmesi için de kullanılmaktadır (Steyn and Sadzik, 2007).

PSPA iki transdüser, yüksek frekanslı sismik bir deneyi (1 kHz ile 50 kHz arasında) gerçekleştirmeyi sağlayan elle taşınabilir kaynak kutusu ve veri toplama sisteminden oluşan bir sistemdir (Şekil 2.16). Kaynak kutusuna darbe tetikleme sürekliliğini sağlamak için bir dönüştürücü yerleştirilmiştir. Kolaylıkla taşınabilen bu alet bilgisayar yardımıyla kullanılmaktadır. Bir kablo yardımıyla bilgisayardan PSPA' ya gönderilen darbe emri ile kaynak aracılığıyla darbe oluşturulmakta ve dönen sinyaller transdüserler vasıtasıyla tutularak tekrar bilgisayara geri gönderilmektedir.



Şekil 2.16. Taşınabilir üstyapı analizcisi (PSPA)

PSPA ile veri toplama prosedürü, aleti kullanan teknik personelin bilgisayar vasıtasıyla deney dizisini tetiklemesiyle başlamaktadır. Deney başlatıldıktan sonraki verilerin toplanması bilgisayar aracılığı ile otomatik olarak yapılmaktadır. Bilgisayar kontrollü solenoid kaynak, dörtle sekiz vuruş arasında olmak üzere aleti kullanan kişi tarafından vuruş için tetiklenir. Kaynağın ilk kaydedilen vuruş dönüşleri, elektronik aksamın dinamik aralığını optimize etmek için genliklerin düzenlenmesinde kullanılmaktadır, dolayısıyla ilk vuruşlar değerlendirmede kullanılmamaktadır. Son üç darbeden elde edilen üç transdüserin sonuç verileri kaydedilmekte ve daha güvenilir bir sonuç elde edilebilmesi için ortalamaları alınmaktadır. Üç ivme ölçerden elde edilen tipik voltaj verileri Şekil 2.17’ de gösterilmektedir. Herhangi bir sismik metotta, amaç malzeme boyunca dalgaların yayılım hızlarının bulunmasıdır. Bu kayıtlar sıcak karışım asfalt tabakasında oluşturulan dalga yayılımlarının belirlenmesinde kullanılmaktadır (Celaya et.al., 2010).



Şekil 2.17. Tipik bir PSPA veri kaydı

Yalnızca iki ivmelendirici ve bir yüksek frekanslı kaynak kullanıldığı için, PSPA özellikle üstyapının kaplama tabakasına ait bilgileri vermektedir. Tek bir noktada verinin elde edilmesi yaklaşık 15 saniye kadar olmaktadır. Bu sürenin kısa olması, hızlı veri toplanmasını ve üstyapı hakkında kısa sürede bilgi edinilmesini sağlamaktadır.

PSPA deney aletinin çeşitli kullanım alanları mevcuttur. Tabakaların kalite kontrolünün yapılması, köprü tabliye delaminasyonunun belirlenmesi, yapısal elemanlar arasındaki boşlukların belirlenmesi ve beton kür durumunun izlenmesi bunlardan bazılarıdır. Aynı zamanda portland çimentolu beton üstyapılarda yüzey tabakasının elastisite modülü, poisson oranı ve plaka kalınlığının belirlenmesinde veya delaminasyonun yerinin saptanmasında, asfalt betonu üstyapıda ise yüzey tabakasının elastisite modülü, poisson oranı ve tabaka kalınlığı gibi parametrelerin belirlenmesinde kullanılmaktadır (Mikulic et.al., 2001).

PSPA' nın çalışma prensibi, bir ortamda gerilme dalgaları oluşturulması ve bu dalgaların değerlendirilmesine dayanmaktadır. Ultrasonik Yüzey Dalga (USW) yorumlama metodu, malzemelerin modül değerlerinin belirlenmesinde kullanılmaktadır. Yüzey dalgaları sismik enerjinin yaklaşık üçte ikisinden oluşmaktadır. Ölçmesi en kolay olan en baskın dönüşler yüzey dalgalarına bağlı olan

dalgaların dönüşleridir. Dalga boyu üstteki tabakanın kalınlığına eşit ya da daha küçük olduğu zaman, dalga yayılımı dalga boyundan bağımsız olmaktadır. Bu yüzden, eğer yüksek frekanslı dalgalar (kısa dalga boyu) oluşturulursa ve üst tabakaların özelliklerinin üniform olduğu düşünülürse, üst tabakanın modül değeri, E_{arazi} , aşağıdaki formül ile belirlenebilmektedir.

$$E_{arazi} = 2 \rho [(1.13 - 0.16 \nu) V_R]^2 (1 + \nu) \quad (2.1)$$

Burada V_R yüzey dalgasının hızı, ρ kütle yoğunluğu ve ν Poisson oranıdır (Celaya and Nazarian, 2006).

PSPA deney aleti pürüzlü sıcak karışım asfalt yüzeylerinde ölçüm alabilmek için tasarlanmış, hem IE hem de SASW sismik metotlarını otomatik olarak eş zamanlı gerçekleştirebilen bir alettir. Malzemelere ait olan modül değerlerinin belirlenmesinde Ultrasonik Yüzey Dalga (USW) yorumlama metodu kullanılmaktadır (Nazarian et.al., 1993).

Bahsi geçen bu alet geliştirildiği günden bu yana farklı çalışmalar kapsamında kullanılmıştır. Hammons et.al. (2006) sıcak karışım asfalt üstyapı kesitlerinde soyulmanın genişliğini ve derinliğini belirlemek için bir prosedür geliştirmişlerdir. Soyulma bölgelerini belirlemede çeşitli tahribatsız araştırma metotlarını (GPR, kızılötesi termografi, PSPA, FWD) analiz etmişlerdir. Bu metotları kalibre etmek için karot numuneleri alınmıştır. Prosedür, seçilen bölgelerde yüzey gerilmelerinin gözlemlenmesini, zemin penetrasyon radarı ile incelemeyi, sismik deneyleri ayrıca karot numunelerinin alınmasını ve karotlar üzerinde laboratuvar deneylerini içermektedir.

İnce yüzeyli sıcak karışım asfalt üstyapılarda geri dönüşümü yapılmış tabakaların modül değerlerini belirlemek için, sismik deney ve analiz sürecinin kullanılmasına dayalı olan tahribatsız bir deney metodu geliştirilmiştir. Bu metot, hasar görmemiş bölgeden karot alınamaması ve bilinmeyen tabakaların var olmasından dolayı, modül değerinin doğru geri hesaplanmasının mümkün olmadığı durumda oldukça kullanışlı

hale gelmektedir. Mallick et.al. (2006), köpük asfalt ve geri dönüşümü yapılan plentte karışım asfalt üstyapı tabakalarını bu metoda göre PSPA ile analiz etmişlerdir. Bu çalışmada, tabaka kalınlıkları GPR ile kontrol edilmiş ve gerekli defleksiyon verileri için çoklu yükleme seviyelerinde FWD kullanılmıştır. Tabaka modüllerini belirlemek için sismik deney verileri analiz edilmiştir. Çalışmanın sonucunda, yeni geliştirilmiş olan bu metodun yüzeyin altındaki tabakaların modüllerini belirlemede etkili bir şekilde kullanılabilirliği sunulmuştur. Büyük miktardaki verilerin toplanması için bu metodun kullanılmasının önemi vurgulanmıştır.

Sıcak karışım asfalt üstyapılarda soyulma en önemli bozulmalardan biri olarak kabul edilmektedir. Soyulmanın belirlenmesi için ya gözlemlerden ya da araziden alınan karot numunelerinin laboratuvar dayanımlarının sonuçlarından yararlanılmaktadır. Celaya and Nazarian (2007) yıkıntısız deney yöntemlerinden olan sismik yöntemlerin soyulmanın belirlenmesindeki etkisini araştırmışlardır. Bu amaçla PSPA deney aletini kullanarak USW ve IE analiz yöntemleri ile iki bölgede soyulma durumunu incelemişlerdir. Çalışmanın sonucunda sıcaklık ve yükleme frekansı düzeltilmesi yapılarak uygulanan USW analizleri, problemli bölgelerde daha düşük sıcak karışım asfalt rijitliği vermiştir. Veriler kontur eğrisi üzerinde incelendiğinde düşük kaliteli tabaka ya da soyulmanın varlığının ve derinliğinin etkili bir şekilde gözlemlenebildiğini göstermiştir.

Steyn and Sadzik (2007), Uzun-Dönem Üstyapı Performans kesimlerinde ve Ağır Araç Simülasyon deney bölgelerini de içeren çeşitli üstyapı tiplerinden PSPA deney aletini kullanarak veri toplamışlardır. Elde edilen verileri tekrarlanabilirlik, değişkenlik, izotropi ve sismik rijitlik oranı parametreleri için analiz etmişlerdir. Yaptıkları çalışma sonucunda, PSPA' nın üstyapı tabaka özelliklerinin davranışını kavramayı sağladığını, üstyapının sismik modülünün çeşitlilik, izotropi ve tekrarlanabilirlik gibi özellikleri hakkında iyi bilgi verdiğini sunmuşlardır.

Sismik yöntemlerle modül tabanlı kalite yönetimi, tahribatsız deney süreci, deneyin hızlı bir şekilde uygulanmasına imkan vermesi, hızlı bir şekilde veri elde edilmesi ve

deneyin ölçüm yapılmak istenilen yerde yani arazide uygulanması gibi yararlarından dolayı, diğer yöntemlere göre çok daha kullanılabilir olduğu düşünülmektedir. Celaya and Nazarian (2008) yaptıkları çalışmada tasarım, laboratuvar ve arazi kalite yönetim süreçlerini birleştirmişlerdir. İlk olarak seçilmiş olan karışımlar için belirli bir sıcaklıkta ve boşluk oranında modül değerini belirlemişlerdir. Sıcaklıkla birlikte modüldeki değişimi gözlemlemişler ve yapısal tasarım için malzemenin modül değerini belirlemişlerdir. Bütün bunlardan sonra arazide kalite kontrol deneylerini yapıp sonuçların geçerliliğini tartışmışlardır. Aynı boşluk oranına sahip olan laboratuvar numuneleri ile arazi örnekleri karşılaştırıldığında elde edilen sonuçlar laboratuvar numunelerinin daha büyük modül değerine sahip olduğunu göstermiştir. PSPA ile ölçümü yapılan modül değerleri ile araziden alınan karot numunelerinin laboratuvar sismik modül değerlerine oldukça benzer olduğunu görülmüştür.

Freeman et.al. (2009), askeri hava alanlarında asfalt betonunun yaşlanmasını incelemişlerdir. Arazide PSPA kullanılarak asfalt betonu yüzey tabakalarının modül değerlerini belirlemişlerdir. Laboratuvar; karışım ve bağlayıcı özelliklerini elde etmiş, alınan karot numuneleri üzerinde dolaylı çekme deneylerini ve kırış yorulma testlerini yapmışlardır. Sonuç olarak, düşük modüllü arazide yaşlanmış numuneler yorulma eğrisi altında hızlı bir şekilde azalma eğilimi gösterirken, yüksek modüllü arazide yaşlanmış numunelerin tekrarlı gerilmelere daha çok dayanma eğiliminde olduğunu sunmuşlardır.

2.4. Tabakalar Arasında Meydana Gelen Ayırışmalar

Üstyapı tabakaları arasındaki yeterli adezyon, bir üstyapının taşıma kapasitesini ve beklenen yapısal durumunu sağlamak için gerekmektedir. Bir esnek üstyapı tüm tabakalarıyla birlikte bir bütün olarak davranmak suretiyle, karşı karşıya kaldığı yükleri bertaraf eder. Ancak bazen üstyapıyı oluşturan tabakalar bütünlüğünü kaybedip kendi başlarına davranma eğilimi gösterebilir. Bu durum esnek üstyapılar için istenmeyen bir durum olup, üstyapının çok kısa bir zamanda bozulmasına sebep olabilir. Üstyapı tabakaları arasındaki adezyon kaybı ve çeşitli diğer faktörler sonucunda, bir bütün oluşturamayan üstyapıda tabakalar arasında meydana gelen ayrı davranma eğilimine delaminasyon denilmektedir. Bir sıcak karışım asfalt üstyapıda meydana gelen delaminasyon bozulması Şekil 2.18’ de gösterilmektedir.



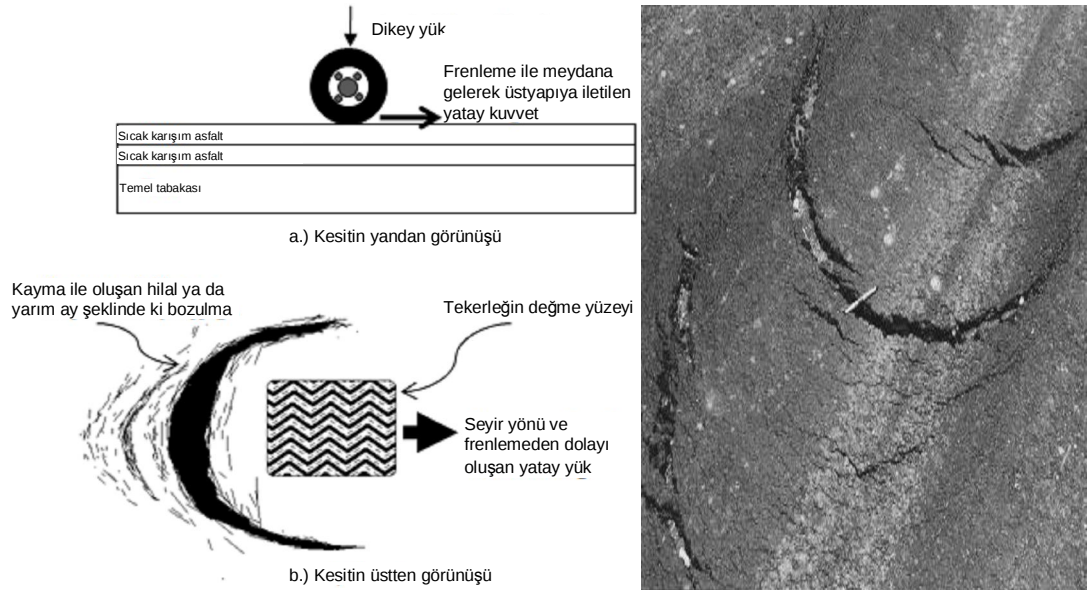
Şekil 2.18. Tabakalar arasında ayırışmanın sebep olduğu tipik bir bozulma örneği

Esnek üstyapılarda oluşan tabakalar arasında ayırışma bozulması üstyapı performansını olumsuz etkilemekte ve yolun servis ömrünü kısaltmaktadır. Ayırışma bitişik üstyapı tabakaları arasındaki gerekli adezyonun olmaması ya da çok düşük olması durumunda tabakalar arasındaki kayma neticesinde oluşmaktadır. Daha ileri seviyelerde ise kayma ve çukur oluşması gibi yolda ciddi bozulmalara sebep olmaktadır. Delaminasyonun oluşmasında farklı sebepler olmasına rağmen en önemli sebep astar tabakasının yetersiz ya da yanlış uygulanmasıdır.

Esnek üstyapılarda iki çeşit delaminasyon oluşmaktadır. Birincisi sıcak karışım asfalt tabakaları arasında oluşan delaminasyon, ikincisi ise temel tabakası ve sıcak karışım asfalt tabakası arasında oluşan delaminasyondur. Her iki tip delaminasyon da üstyapı performansını olumsuz etkilemesine rağmen sıcak karışım asfalt tabakaları arasındaki delaminasyon daha kritiktir. Bazı çalışmalar, ağır taşıt trafiği altında 200 mm ve daha derinde oluşan delaminasyonun daha az yüzey gerilmelerine sebep olarak üstyapıyı nispeten daha az etkilediğini göstermiştir (Hammons et.al., 2005). Bu sebeple yüzeye yakın tabakalarda meydana gelen delaminasyonun belirlenmesi daha büyük öneme sahip olmaktadır.

Delaminasyon asfalt tabakasının yetersiz ya da yanlış uygulanması, astar tabakasında düşük kalitede malzeme kullanılması, uygun olmayan inşaat teknikleri ya da yetersiz sıkıştırma gibi çeşitli sebeplerden dolayı meydana gelmektedir (Mejia et.al., 2008). Daha sonraki aşamalarda tekrarlı yüklerin etkisiyle de giderek ilerlemektedir. Bu durum genellikle araçların yatay etkisinin yoğun olduğu kavşaklarda, dik rampalarda ve çapı dar olan kurbalarda meydana gelmektedir (Romanoschi and Metcalf, 2002). Eğer delaminasyon oluşumu ön safhalarda belirlenemezse bu durum giderek kayma bozulmasının artmasına sebep olmaktadır. Kayma bozulması trafik yönünde iki bitiş noktasına sahip olan hilal ya da yarım ay şeklindeki çatlaklar olarak tanımlanmaktadır. Bu bozulma çeşidi Şekil 2.19' da gösterilmektedir.

Tabakalar arasında olması gereken adezyon ve bitişik tabakalar arasındaki bağın durumunun bütün üstyapı üzerindeki etkisi hakkında sayısı az olmakla birlikte çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Bazı çalışmalarda tabaka kalınlığının delaminasyonu önlemedeki etkisi incelenmiştir. Kulkarni (2004), artan tabaka kalınlığı ile birlikte ara yüzeydeki yatay ve düşey yüklerden dolayı oluşan kesme gerilme miktarının azaldığını tespit etmiştir.



Şekil 2.19. Tipik bir kayma bozulması

Tschegg et.al. (1995) tabaka aderansının kırılma-mekanik davranışını ölçmek için basit bir yöntem geliştirmişlerdir. Küp ya da silindir şeklinde olan numuneleri (numunelerin ara yüzeydeki çatlak başlangıcı ile birlikte) sabit kırılma gelişimi durumu altında, çatlama meydana gelinceye kadar bekletmişlerdir. Deney süreci boyunca, son ayrışma çatlak meydana gelinceye kadar, yükleme-yer değiştirme eğrisinin tamamını elde etmişlerdir. Bu yük-yer değiştirme eğrisi çatlak oluşumunda, malzeme aderansının mekanik davranışını karakterize etmektedir. Aynı zamanda ara yüzey problemlerinin nümerik olarak iyileştirilmesi için önemli bir parametredir. Yapılan deney süreci sonunda, elde edilen eğrilerin ara yüzey aderans kalitesini belirlemede önemli bir kriter olduğunu aynı zamanda bu verilerin sonlu elemanlar metodunda kullanılabileceğini göstermişlerdir.

Kruntcheva et.al. (2004) yaptıkları çalışmada, ince bir yüzey kaplaması (10-50 mm) altındaki aderans durumunu belirlemek için tahribatsız bir deney yöntemi geliştirmişlerdir. Genel bir yüzey kaplama malzemesi kullanılarak aderansı yüksek, tamamen ayrılmış ve yarı ayrılmış ara yüzey durumlarını farklı yüzey kalınlıklarını göz önüne alarak karşılaştırmışlardır. Bir darbe çekici ile kısa süreli darbeler oluşturarak, etki noktasına yakın bir yerde dikey dinamik yansımaları ivme ölçer yardımıyla görüntülemişlerdir. Elde edilen sonuçları aderans durumunu belirlemek

için gerekli olan uygun parametreleri belirlemede kullanmışlardır. Sonuç olarak, deney noktalarından aldıkları karot numuneleri ile deney sonuçlarının uyumluluğunu ve ara yüzey durumu tahmininin doğruluğunu sunmuşlardır.

Gomba (2004), ara yüzey aderansının durumunu belirlemek için FWD aletini kullanmıştır. Çalışmanın sonucunda, farklı aderans durumları altında FWD ile yapılan deneylerden elde edilen yüzey modül değerlerini birbirinden farklı olarak elde etmiştir.

Kruntcheva et.al. (2005), tabakalar arasındaki yetersiz temas ya da yapışma durumunun esnek üstyapı performansı üzerindeki sonuçlarını anlamak için teorik bir çalışma yapmışlardır. Bunun için iki farklı model yaklaşımı üzerinde çalışmışlardır. Birincisinde, üstyapı tabakaları arasındaki farklı dereceli ara yüzey aderansı ve standart çift teker yüklemesine ilave olarak statik yanal yükleme durumu göz önüne alınarak, tabakalı lineer elastik program ile üstyapıyı yapısal olarak analiz etmişlerdir. Bu analiz sonucunda, binder ve temel tabakaları arasındaki aderans durumunun üstyapının yapısal ömrünü % 80' e kadar azaltabildiğini görmüşlerdir. Kaplama tabakası ve binder tabakası arasındaki zayıf aderans için ise, yolun yapısal ömrünün, üzerinden geçen trafikten dolayı meydana gelen yanal gerilmelere çok daha hassas olduğunu bulmuşlardır. Statik lineer iki-boyutlu (2D) sonlu elemanlar modelinin de bu sonuçları doğruladığını görmüşlerdir. Nonlineer 2D sonlu elemanlar modelini de üstyapı tabakaları arasındaki aderans durumunu göstermek için uygulamışlardır.

Kruntcheva et.al. (2006), 20 mm kalınlığında bağlayıcı temel tabakası üzerine, dört farklı özelliğe sahip kaplama tabakasından (10 mm stone mastik asfalt, 35-14 sıcak döküm asfalt, % 20 boşluk oranına sahip poroz asfalt ve % 15 boşluk oranına sahip poroz asfalt) oluşan numuneler hazırlamışlardır. Bu hazırlanan numunelerde ara yüzey malzemesi olarak normal miktarda astar tabakası (0.33 L/m^2), fazla miktarda astar tabakası (1 L/m^2), astar tabakası malzemesi konulmadan ve kil çamuru kullanılarak farklı ara yüzey özelliklerine sahip numuneler hazırlamışlardır. Tekrarlı dinamik ve sabit statik deney şartları altında aderans ve gerilmeleri belirlemişlerdir.

Yapılan bu çalışma sonucunda, ara yüzey özelliklerinin ara yüzeyde uygulanan astar tabakası malzemesi miktarından çok ara yüzey malzemesinin tipine bağlı olduğunu, astar tabakası malzemesi kullanılmadan kuru ve temiz bir ara yüzeyin standart miktarda astar tabakası uygulanmış numunelerle benzer özelliklere sahip olduğunu, dolayısıyla astar tabakası uygulamasına gerek olmadığını göstermişlerdir.

Karayolu üstyapı tabakaları arasındaki aderans üstyapının performansını etkileyen önemli bir faktördür. Tabakalar arasındaki aderans durumunu belirlemek için çeşitli deney aletleri geliştirilmiştir. Amacı aynı olan bu aletler, deney koşullarının değişmesinden dolayı farklı sonuçlar vermektedir. Santagata et.al. (2008) farklı asfalt malzemelerinden farklı teknikte hazırlanan deney numunelerini kullanarak iki farklı kesme kutusu deneyi gerçekleştirerek verilerin değerlendirmesini yapmışlardır. Test metodu tipine bağlı olarak tekrarlanabilirliği göstermişlerdir.

Collap et.al. (2009), yaptıkları çalışmada asfalt tabakaları arasındaki ara yüzey özelliklerini laboratuarda belirlenen kesme direnci değerlerine göre incelemişlerdir. Ara yüzey kesme direnci özelliklerini belirlemek için modifiye edilmiş Leutner deney aletini kullanmışlardır. Laboratuar ortamında hazırladıkları ve araziden çıkarılan karot numuneleri üzerinde Leutner deney aleti ile yaptıkları deney sonuçlarının ara yüzey özelliklerini belirlemek için değerlendirmesini sunmuşlardır.

Karayolu tabakalarının git gide önemli bir hale geldiği günümüz koşullarında, Raab and Partl (2009) üst tabakalara ait (binder ya da temel ile alt temel tabakaları) aderans özelliklerinin üstyapının uzun dönem performansı üzerindeki durumunu incelemişlerdir.

2.5. Tabakalar Arası Ayrışmanın Belirlenmesinde Tahribatsız Deney Metotlarının Kullanılması

Rijit üstyapılarda meydana gelen delaminasyonun belirlenmesi sıcak karışım asfalt üstyapılara göre daha kolaydır. Esnek üstyapılarda delaminasyonun belirlenmesindeki problem daha ince tabakalardan oluşması, homojen bir yapıya

sahip olmaması ve sıcaklıkla bünyesinin değişmesidir. Esnek üstyapılarda delaminasyonun belirlenmesinde seçilecek olan deney ve analiz yöntemi ile istenilen, daha delaminasyonun ilk safhalarında iken ortaya çıkarılmasıdır. Özellikle IE ve USW metotları bu açıdan oldukça başarılı olarak tanımlanmaktadır (Menjia, 2009).

2.5.1. Dalga yayılım prensibi

Bir yüzey üzerine gelen darbe ile yüzey boyunca dalga yayılımları oluşmaktadır. Bu dalgalar gerilme dalgaları olarak adlandırılarak üç farklı tiptedirler; sıkışma dalgaları (P dalgası), kesme dalgaları (S dalgası) ve yüzey dalgaları. Sıkışma ve kesme dalgaları uygulanan yüzey ve kütlesi içerisinde küresel bir biçimde seyrederken, yüzey dalgaları sadece yüzey boyunca ilerlemektedir.

Sonsuz izotrop ve elastik bir ortamda yüzey dalgasının hızı (V_p) aşağıdaki eşitlikte verildiği gibidir.

$$V_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (2.2)$$

Burada E elastisite modülü, ν Poisson oranı ve ρ kütle yoğunludur.

İki yanal doğrultuda hareketi kısıtlanmış bir ortamda, eksenel gerilmenin eksenel şekil değiştirmeye oranı sınırlandırılmış modül olarak bilinmektedir (Baker, 1995). Sınırlandırılmış modül değeri (M) aşağıdaki eşitlikteki gibi hesaplanmaktadır.

$$M = \rho V_p^2 \quad (2.3)$$

Sıkışma dalgasına göre daha yavaş bir hıza sahip olan kesme dalgasının hızı (V_s) aşağıdaki eşitlikteki gibi hesaplanmaktadır.

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{\rho 2(1+\nu)}} \quad (2.4)$$

Bu formüldeki G kesme modülüdür.

Kesme dalgasının sıkışma dalgasına oranı aşağıdaki eşitlikte verilmiştir.

$$\frac{V_s}{V_p} = \sqrt{\frac{0.5 - \nu}{1 - \nu}} \quad (2.5)$$

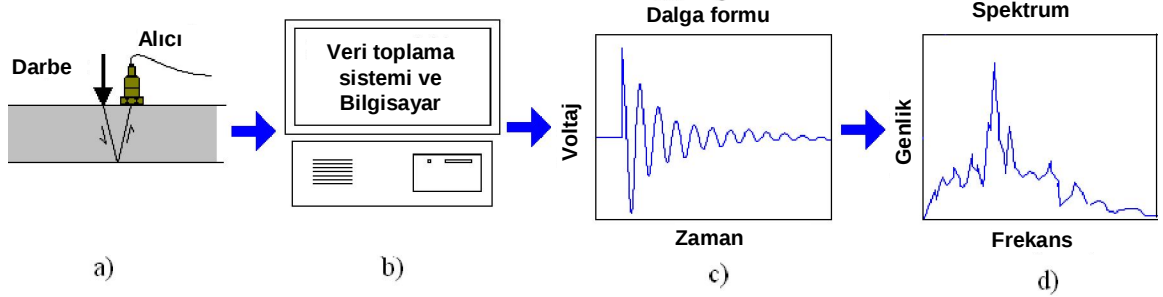
Darbe ile oluşan enerjinin yaklaşık üçte birini taşıyan yüzey dalgaları diğer vücut dalgalarına göre daha yüksek genliğe ve daha düşük oranda sönümlenmeye sahiptir. Yüzey dalgaları kesme dalgalarına göre yaklaşık % 90 daha hızlıdır.

Gerilme dalgası tabakalı bir sistemde oluşturulduğunda, bir kısım dalga her bir tabaka arayüzeyinden yansıyacaktır. Yansıyan dalganın genlik miktarı yansıma açısının bir fonksiyonudur. Yansıma açısı 90 derece ise, yansıyan dalganın genliği maksimum olacaktır.

2.5.2. Darbe-yankı

Sansalone and Carino (1986) tarafından yapılan bir çalışmanın ardından daha yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanılan Darbe-Yankı metodu rijit ve esnek üstyapıların değerlendirilmesinde kullanılan tahribatsız bir deney yöntemidir. Bu yöntem mekanik bir darbe ile gerilme dalgalarının oluşturulmasına dayanmaktadır. Darbe kısa sürelidir ve üstyapı yüzeyine vurulmasıyla oluşturulmaktadır. Alıcı/transdüser bozulmadan ya da arayüzeyden yansıyan gerilme dalgalarının oluşturduğu yüzey yerdeğişmesini kaydetmektedir (Şekil 2.20.a). Sinyal veri toplama sistemine gönderilerek bilgisayar kullanılarak işlenir (Şekil 2.20.b). Eğer alıcı darbeye göre yeterince uzak mesafede ise sıkışma dalgası yansıması dönen etkiyi bastırarak ve zamana göre yerdeğiştirme elde edilecektir (Şekil 2.20.c). Son olarak sinyallerin

analizini kolaylaştırmak için, hızlı Fourier dönüşümleri kullanılarak zaman-alan kayıtları, frekans-alan verilerine dönüştürülecektir (Şekil 2.20.d).



Şekil 2.20. Darbe-Yankı metodunun uygulama ve analiz şeması

Frekans-alan analizi kısaca şu şekilde açıklanabilir; homojen malzemeden oluşan tabakalı bir yüzeyde darbe oluşturulduğunda, sıkışma dalgası darbe uygulanan yüzey ve yansıma oluşan arayüzey arasında çoklu yansımalar oluşturur. Yansıyan dalga formları P dalgasının gidiş-geliş süresine bağlıdır. Her bir ulaşan ve yansıyan P dalgaları arasındaki zaman aralığı dalga hızı ile bölünecek olan gidiş-dönüş mesafesidir. P dalgasının frekansı zaman aralığının tersi olarak ifade edilebilir, bu eşitlik aşağıdaki gibidir (Carino, 2001):

$$f = \frac{V_p}{2h} \quad (2.6)$$

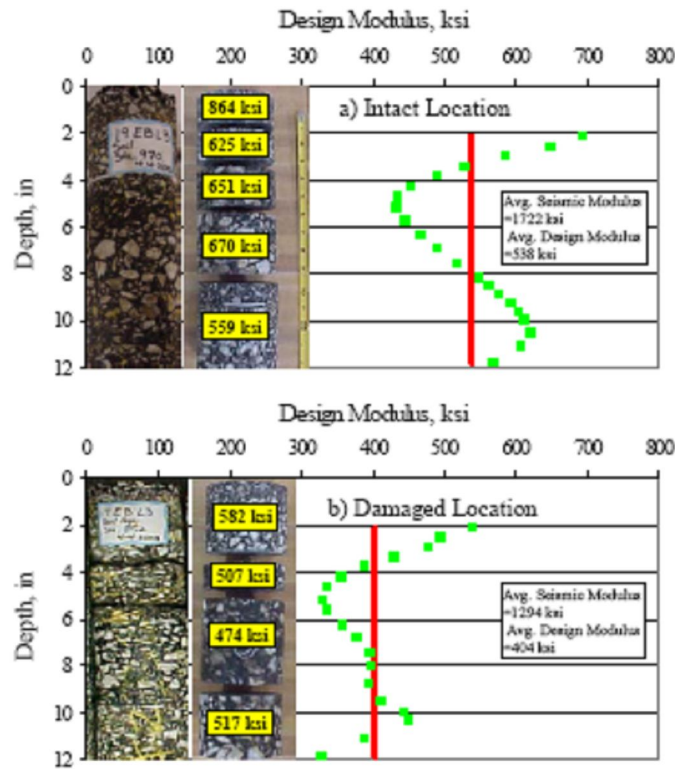
Bu eşitlikte f , P dalgasının dönüş frekansı V_p , P dalgasının hızı ve h , darbe uygulanan yüzey ile yansıyan arayüzey arasındaki mesafedir.

2.5.3. Ultrasonik yüzey dalgaları

Ultrasonik yüzey dalgaları metodu test edilen malzemenin durumunu belirlemek için, yüzey dalgasına ait dağılma karakteristiklerini ya da elastik özellikleri kullanmaktadır. Bu metotta, dalga enerjileri çok yüksek frekanslarla sınırlıdır ve bu sebepten en üst tabakanın kesme dalga hız profilini vermektedir (Nazarian et.al., 1993). Bu metotta dağılma eğrisi olarak adlandırılan, dalga boyu ile faz hızındaki değişim oluşturulmaktadır (Yuan and Nazarian, 2000). Dalga boyunun en üst

tabakanın kalınlığına eşit ya da daha az olduğu durumda, yüzey dalgasının yayılma hızı dalga boyundan bağımsız hale gelmektedir. En üst tabakaların özelliklerinin üniform olduğu kabul edilerek, yüksek frekanslı (düşük dalga boyu) dalgalar oluşturulursa, üst tabakalara ait faz hızı belirlenebilmektedir.

Faz hızı sürekli olmayan dalga boyu en üst tabakanın kalınlığı ile yakından alakalıdır (Nazarian et.al., 1997). Benzer modül değerine sahip adezyonu yüksek iki tabaka için, modül değerindeki değişim derinlikle fazla farklılık göstermektedir. Bununla birlikte iki tabaka arasındaki bağ zayıfsa yani ayrışma söz konusuysa, arayüzeyin altında derinlikle modüldeki değişim önemli derecede azalacaktır. Şekil 2.21’ de yapılan USW analizi sonrasında adezyonlu ve ayrışmalı iki üstyapı kesiti arasındaki modül farklılıkları gösterilmektedir.



Şekil 2.21. Tipik bir üstyapı kesiti ile ayrışma söz konusu olan iki farklı karot numunesi ile dağılma eğrilerinin karşılaştırılması

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Küçük Ölçekli Üstyapının İnşa Edilmesi

Tez çalışması kapsamında El Paso Teksas Üniversitesi bünyesindeki bir alanda küçük ölçekli yol inşaatı gerçekleştirilmiştir. İnşa edilecek yol, esnek üstyapılarda farklı derecelerde görülen tabakalar arası ayrışmaları temsil edeceği için, inşaat sırasında önceden belirlenen kısımlarda farklı ayrıştırma malzemeleri kullanılmıştır. Kullanılacak olan malzemeleri belirlemek için laboratuarda ön bir çalışma gerçekleştirilmiştir.

3.1.1. Üstyapı kesiminde kullanılacak ara yüzey malzemelerinin belirlenmesi

Üstyapı kesiminde kullanılacak olan ara yüzey malzemelerini belirlemek için farklı malzemeler kullanılarak hazırlanan numuneler üzerinde çeşitli deneyler yapılmıştır. Ara yüzey malzemesi olarak öncelikle, benzer bir laboratuvar çalışması yürüten Kruntcheva et.al.'nın (2004) çalışmaları göz önünde bulundurularak kısmi temassızlık durumunu temsil eden kil ve sürekli temassızlık durumunu temsil eden talk pudrası ile hazırlanan numuneler deneylere tabi tutulmuştur. Bu malzemelere ek olarak gres yağı ve motor yağına tamamen bulanmış kağıt ile hazırlanan numuneler üzerinde benzer deneyler yapılmıştır. Aynı zamanda farklı ara yüzey malzemeleri kullanılarak üretilen numuneleri karşılaştırmalı olarak değerlendirmek amacıyla, esnek üstyapıların inşaatı sırasında tabakaların aderansını kuvvetlendiren astar tabakası ile hazırlanan numuneler de üretilmiştir. Bütün üretilen numuneler üzerinde tabakalar arasındaki temas durumunu belirlemek için direk kesme deneyi uygulanmıştır.

Küçük ölçekli yolu inşa etmek için iki farklı sıcak karışım asfalt malzemesi kullanılmıştır. Bu karışımlar Amerika şartnamelerine göre belirlenen P-401 (plentte karışım bitümlü üstyapılar) ve P-403 (temel ya da yüzey tabakası) karışımlarıdır. Bu malzemelerin özellikleri Çizelge 3.1' de gösterilmektedir.

Çizelge 3.1. Çalışmada kullanılan karışımların özellikleri

	P 403	P 401
Elek Açıklığı (inç)	Standart Değerleri %	
1"	100	100
3/4"	76-98	76-98
1/2"	66-86	66-86
3/8"	57-77	57-77
No.4	40-60	40-60
No.8	26-46	26-46
No.16	17-37	17-37
No.30	11-27	11-27
No.50	7-19	7-19
No.100	6-16	6-16
No.200	3-6	3-6
Asfalt İçeriği	4,5-7,0	4,5-7,0
Boşluk Oranı	2-5	2.8-4.2
Marshall Stabilitate	1800-2780	2150-2800
Asfaltla Dolu Bosluk	65-78	65-78
Akma	8-16	10-14
Karışım Sıcaklığı	160 °C	168 °C
Laboratuvar Karışım Sıcaklığı	145 °C	151 °C

Laboratuarda deney numunelerinin hazırlanma süreci Şekil 3.1' de gösterilmektedir. Deney numuneleri;

- Alt tabaka karışımının hazırlanması ve sıkıştırılması,
- Arayüzey malzemesinin uygulanması,
- Üst tabaka karışımının hazırlanması ve üst tabakanın arayüzey malzemesi uygulanmış olan alt tabakanın üzerine yerleştirilerek sıkıştırılması

aşamaları uygulanarak hazırlanmışlardır. Alt tabaka, yoğurmalı pres kullanılarak, rölatif kompaksiyon değeri yaklaşık %90 olacak şekilde sıkıştırılmıştır. Karışım sıcaklığında olan alt tabakanın oda sıcaklığına düşmesi beklendikten sonra ara yüzey malzemesi uygulanmıştır. Son olarak üst tabakanın hazırlanan karışımı kalıp içerisinde bulunan ve üzerine ara yüzey malzemesi uygulanmış alt tabakanın üzerine yerleştirilip Marshall tokmağı kullanılarak (75 vuruş) sıkıştırılmıştır (ASTM D6926-04) (Şekil 3.1c). Hazırlanan numunelerin çapı yaklaşık olarak 100 mm ve yükseklikleri 105 mm' dir.



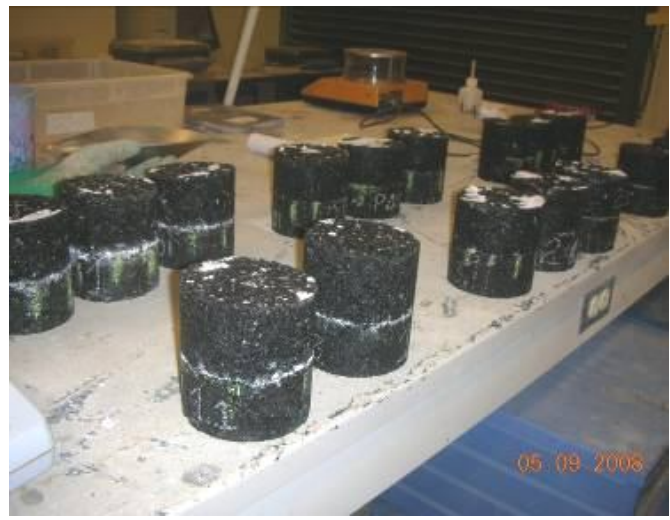
a) Astar tabakası



b) Kil



c) Marshall Kompaksiyonu

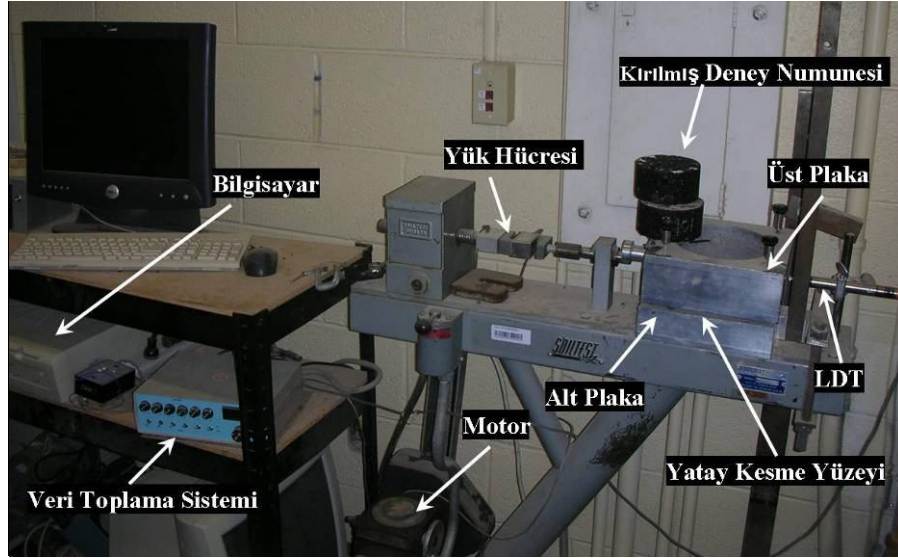


d) Numuneler

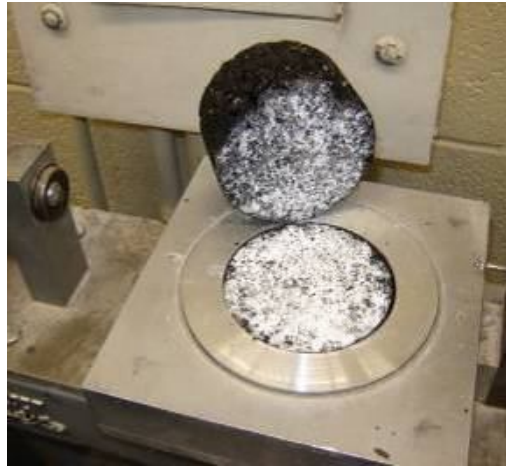
Şekil 3.1. Laboratuar numunelerinin hazırlanması

Hazırlanan numuneler üzerinde, tabakalar arasındaki aderansı değerlendirmek için doğrudan kesme deneyi yapılmıştır. Doğrudan kesme deney aleti genel olarak bilgisayar kontrollü veri toplama ünitesi ve numune üzerine yük uygulanmasını sağlayan bir motordan oluşmaktadır (Şekil 3.2). Sisteme bağlı olan yükleme hücresi ile deney süreci boyunca herhangi bir andaki uygulanan yük miktarı ölçülebilmektedir. Yükün uygulanmasıyla birlikte iki tabaka arasındaki yer değiştirme miktarı lineer deformasyon transduseri (LDT) vasıtasıyla belirlenmektedir. Hazırlanan numunelerin doğrudan kesme deney aletine düzgün bir şekilde yerleşmesini ve tabakaların ara yüzeylerinin kesme seviyesine paralel olmasını sağlamak amacıyla numunelerin alt tabakası bir miktar tıraşlanmıştır. Ön hazırlıkları tamamlanan numuneler, 1.3 mm/dk'lık bir hızla kesme deneyine tabi

tutulmuştur. Şekil 3.3' te kesme deneyine tabi tutulmuş talk pudralı bir numunenin deney sonrasındaki durumu gösterilmektedir. Bütün deneyler 22 °C laboratuar sıcaklığında gerçekleştirilmiştir.



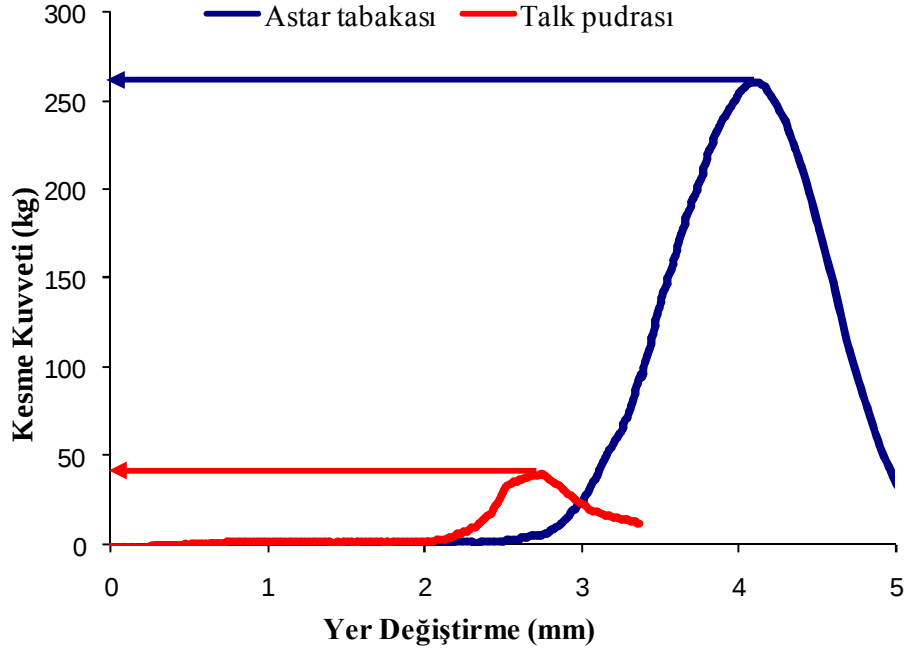
Şekil 3.2. Kesme deney aleti



Şekil 3.3. Kesme deneyi sonrasında kırılmış bir numune (talk pudralı)

Aderansın belirlenmesinde doğrudan kesme deneyi sonuçlarının etkinliğini göstermek amacıyla, astar tabakalı bir numune ile talk pudrası kullanılarak hazırlanan başka bir numuneye ait deney sonuçları Şekil 3.4' te karşılaştırmalı olarak

gösterilmektedir. Kesme kuvveti değeri, maksimum uygulanan yük değerinin numunenin alanına bölünmesiyle bulunmaktadır.



Şekil 3.4. Kesme deneyinden elde edilen sonuçlar

Farklı ara yüzey malzemeleri ile laboratuarda hazırlanan numunelerden elde edilen kesme direnci sonuçları Çizelge 3.2’ de özetlenmektedir. Hazırlanan bu numuneler alt ve üst tabakalarda kullanılan asfalt karışım tipine göre iki seri olarak hazırlanmıştır. İlk seri için alt tabakada P-403, üst tabakada P-401 asfalt karışımı kullanılmıştır. İkinci seri numunelerde ise hem alt hem de üst tabakada P-401 karışımı kullanılmıştır. Her bir ara yüzey malzemesi kullanılarak 3 ile 7 arasında örnek numuneler hazırlanmıştır. Her iki farklı seri numuneleri üzerinde yapılan kesme direnci deney sonuçlarına göre en yüksek değeri, beklenildiği gibi astar tabakası kullanılarak hazırlanan numuneler vermiştir. Talk pudrası kullanılarak hazırlanan numunelerin ortalama kesme direnci değeri astar tabakalı numunelere göre % 60 oranında daha düşük değerler vermiştir. Kil kullanılarak hazırlanan numunelerin kesme direnci değerleri, astar tabakalı ve talk pudralı numunelerin kesme direnci değerlerinin arasındadır. Bununla birlikte sonuçlardan elde edilen varyasyon katsayısı ayrıştırma malzemelerinin bir çoğu için oldukça yüksek değerler

vermiştir. Deneysel hatalar bir tarafa bırakılırsa, sonuçlardan elde edilen yüksek varyasyon katsayıları agregalar arasındaki etkileşimle açıklanabilmektedir.

Çizelge 3.2. Laboratuarda hazırlanan numunelerin kesme direnci sonuçları (psi)

Numune #	P-401/P-401 Karışımları					P-403/P-401 Karışımları			
	Astar tabakası	Talk Pudrası	Kil	Gres	Motor yağı kağıt	Astar tabakası	Talk Pudrası	Kil	Motor yağı kağıt
1	21	14	35	18	5	31	16	24	1.1
2	46	10	49	21	3	39	16	25	8.3
3	40	7	32	21	4	24	17	33	5.3
4		35	6	19	6				6.6
5		30	8	16	6				4.2
6		22	12	17	4				6.9
7		23	13	18	2				1.1
Ortalama	35	20	22	19	5	32	17	27	5
Varyasyon Kat.	36%	51%	75%	19%	34%	24%	5%	19%	47%

Ara yüzey malzemesi olarak motor yağı ile tamamen kaplanmış kağıt kullanıldığında, ortalama kesme direnci uygun varyasyon değeri ile en düşük değeri vermiştir. Gres yağı ile hazırlanan numunelerden ise killi numunelere göre daha düşük değerler elde edilmiştir.

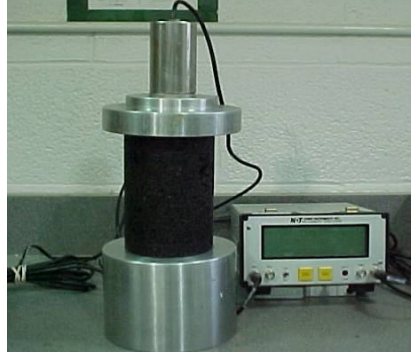
Bütün bu deneylerden elde edilen sonuçlar doğrultusunda, inşa edilecek olan küçük ölçekli yol çalışmasında kullanılacak olan ara yüzey malzemeleri Çizelge 3.3’ te özetlenmektedir. Bu bahsedilen malzemelerin dışında, ileri derecede temassızlık durumunu temsil etmesi için belirli bölgelerde kalın karton kullanılmıştır.

Çizelge 3.3. Küçük ölçekli yol çalışmasında kullanılacak olan ara yüzey malzemeleri

Kısmi Temassızlık	Tamamen Ayrışmış	Bütünlük Sağlanmış
Kil	Motor Yağı Kağıt	Uygun Miktarda Astar Tabakası
Talk Pudrası		
Gres		

Farklı ara yüzey malzemeleri ile hazırlanan numunelerin, Şekil 3.5’ te gösterilen ultrasonik alet kullanılarak sıkışma hızları (P dalgası) belirlenmiştir. Her bir numunenin P dalgası hızlarının belirlenmesi için ultrasonik deney, hem kesme

deneyinden önce bütün numune üzerinde hem de kesme deneyinden sonra alt ve üst tabakalar üzerinde tekrar yapılmıştır. Genel olarak bir çok numunenin kesme deneyinden sonraki ortalama hızları, ara yüzey malzemelerinin varlığından dolayı kesme deneyinden önceki değerlere göre daha büyük sonuçlar vermiştir.



Şekil 3.5. Ultrasonik deney aleti

Kullanılan her bir ara yüzey malzemesi için, sıkışma hızlarındaki ortalama farklılıklar yüzde olarak Çizelge 3.4’ te özetlenmiştir. Elde edilen bu sonuçlara göre, motor yağı ile tamamen kaplanmış kağıt kullanılarak hazırlanan numuneler en yüksek değerleri verdiği görülmektedir. Bu numuneleri sırasıyla kil, astar tabakası, talk pudrası ve gres yağı kullanılarak hazırlanan numuneler takip etmektedir. Çizelgeden de görülebileceği gibi talk pudrasının varyasyon katsayısı oldukça yüksektir. Diğer numuneler için varyasyon katsayısı %50 civarında ve birbirine yakın değerlerdedir.

Çizelge 3.4. Hazırlanan numunelerin sıkışma hızlarındaki ortalama farklar

Ortalama Fark (%)*	Astar Tabakası	Talk Pudrası	Kil	Gres	Motor Yağlı Kağıt
	7.8%	6.6%	10.0%	5.9%	12.4%
Varyasyon K.	52%	166%	50%	58%	47%

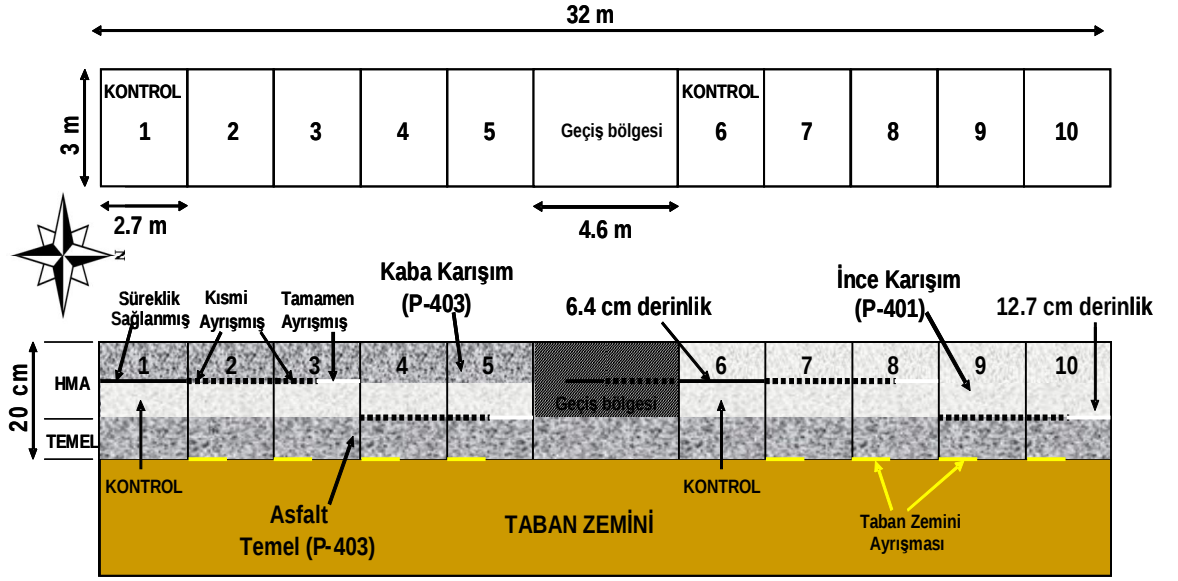
*(Kesme deneyinden sonraki hız – Kesme deneyinden önceki hız) / Kesme deneyinden sonraki hız

3.1.2. Küçük ölçekli yol üstyapısının inşa edilmesi

Çalışma kapsamında El Paso Teksas Üniversitesi (UTEP) bünyesindeki bir bölgede küçük ölçekli bir yol üstyapısı inşaatı gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.6). On farklı kesit ve üç geçiş bölgesinden oluşan bu üstyapının şematik görünümü Şekil 3.7’ de verilmektedir. Şekilden de anlaşılabacağı gibi her bir kesit 2.7 m (9 ft) uzunluğunda 3.1 m (10 ft) genişliğinde olacak şekilde planlanarak inşa edilmiştir. Bu yapı 3.1 m (10 ft) uzunluğunda Kesit 1’ den önce, 4.6 m (15 ft) uzunluğunda Kesit 5 ile 6 arasında ve 3.1 m (10 ft) uzunluğunda Kesit 10’ dan sonra olacak şekilde üç farklı geçiş bölgesi içermektedir. Bu geçiş bölgeleri, yolun inşa edilmesi sırasında iki farklı karışımın uygulandığı üst tabakada, kesitlere (1-5 Kesitleri / 6-10 Kesitleri) tek bir karışımın uygulanmasını sağlamak ve ana kesitler üzerinde araçların etkilerini (durma – kalkma) minimuma indirmek için inşa edilmiştir.



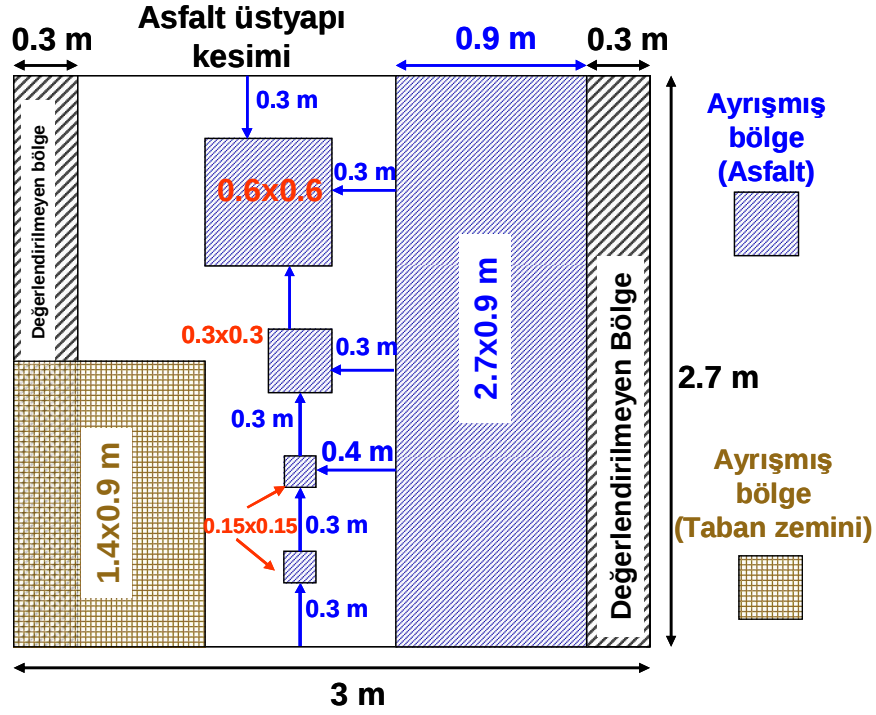
Şekil 3.6. UTEP’ te asfalt kesitlerin inşa edileceği bölge



Şekil 3.7. Küçük ölçekli kesitlerin şematik gösterimi

Küçük ölçekli yol inşaatının taban zeminini oluşturan zemin kumlu-killi bir zemindir. Üstyapı kumlu-killi taban zemin üzerine 20 cm (8 inç) kalınlığında üç tabakalı olarak inşa edilecek bir sistemden oluşmaktadır. Temel tabakası yaklaşık 8 cm (3 inç) kalınlığında P-403 (iri malzeme) sıcak karışımı kullanılarak inşa edilmiştir. Yüzey kaplamasının ilk tabakası yaklaşık 6 cm (2.5 inç) kalınlığında P-401 (ince) sıcak karışımı kullanılarak inşa edilmiştir. Üst yüzey tabakası yaklaşık 6 cm (2.5 inç) kalınlığında, 1 ile 5 kesitleri boyunca P-403 sıcak karışımı kullanılarak 6 ile 10 Kesitleri boyunca P-401 malzemesi kullanılarak inşa edilmiştir.

Her bir kesite ait genel görünüş Şekil 3.8' de verilmektedir. Bütün kesitlere ait özellikler Çizelge 3.5' te özetlenmiştir.



Şekil 3.8. Kısmi ve tamamen temassız kesitlerin görünümü

Çizelge 3.5. Kesitlere ait karakteristikler

Kesit	Yüzey Karışımı	Atanan Özellik	Ayrıştırma Malzemesi				
			Astar Tabakası	Gres	Kil	Talk Pudrası	Motor Yağlı Kağıt
1	Kaba Malzemeli	Kontrol	✓				
2		Sığ Kısmi Ayrışma		✓	✓		
3		Sığ Tamamen Ayrışma				✓*	✓
4		Derin Kısmi Ayrışma		✓	✓		
5		Derin Tamamen Ayrışma				✓*	✓
6	İnce Malzemeli	Kontrol	✓				
7		Sığ Kısmi Ayrışma		✓	✓		
8		Sığ Tamamen Ayrışma				✓*	✓
9		Derin Kısmi Ayrışma		✓	✓		
10		Derin Tamamen Ayrışma				✓*	✓

* Kısmi Ayrışma

Kısmi temassızlık ve temassızlık durumunu temsil etmeleri için farklı malzemelerin kullanılmasından dolayı (kil, talk pudrası, yağlı kağıt, gres yağı), bu malzemeler her bir kesite dağıtılmıştır. Genel olarak 10' a 23 cm' lik (4'e 9 inç) olan ayrışma bölgesinin yarısında farklı bir ayrıştırma malzemesi diğer yarısında farklı bir

ayırıştırma malzemesi kullanılmıştır. Küçük ayırışma bölgelerinde ise, ayırıştırma malzemelerinin farklı kombinasyonları uygulanmıştır.

Küçük ölçekli üstyapının inşa edilmesi yaklaşık üç günde tamamlanmıştır. İlk gün taban zemini, üzerinde bulunan yabancı maddelerden temizlenerek istenilen su muhtevasına getirilmesi için bir miktar su ilave edilerek sıkıştırılmıştır (Şekil 3.9).



Şekil 3.9. Seçilen arazinin temizlenip, uygun su muhtevasına getirilip sıkıştırılması

İkinci gün, hazırlanmış olan taban zemini üzerinde 1 ve 6 kontrol kesitleri hariç, taban zemini ile temel tabakası arasındaki ayırışma durumunu temsil etmesi için 1,4×0.9 m (4.5×3 ft) büyüklüğünde motor yağı ile tamamen yağlanmış kartonlar yerleştirilmiştir (Şekil 3.10a). Kartonların yerlerinden kımıldamamasına özen gösterilerek 25 cm (10 inç) yüksekliğinde temel tabakası P-403 karışımı kullanılarak serimi gerçekleştirilmiş ve vibrasyonlu silindir yardımıyla 8 cm (3 inç) kalınlığında olacak şekilde sıkıştırılmıştır (Şekil 3.10b-c).



a)



b)



c)



d)



e)



f)

Şekil 3.10. Asfalt temel tabakasının inşa edilmesi

Temel tabakasının inşa edilmesinden sonra yüzeyin yeterince soğuması için bir miktar beklenilmiştir. Yüzey yeterince soğuduktan sonra 4, 5, 9 ve 10 kesitlerinde kullanılacak olan farklı ayrıştırma malzemeleri yerleri belirlenerek ara yüzey malzemeleri yerleştirilmiştir (Şekil 3.11a-d). Yerleştirilen ara yüzey malzemeleri kuruduktan sonra, bu kısımların üzerine uygulanacak olan astar tabakasından ve araçların etkisinden korunması amacıyla karton ve kontrplaklar yerleştirilmiştir. Standart miktardaki astar tabakası bütün kesimler boyunca uygulanmıştır.



a)



b)



c)



d)

Şekil 3.11. Asfalt temelin üzerine ayrıştırma malzemelerinin yerleştirilmesi (derin ayrışma durumu için)

Asfalt tabakanın deney sırasındaki sıcaklığının ölçülmesi amacıyla Kesit 1' e ısı ileten teller yerleştirilmiştir. Bunun için Kesit 1 genişliğinin yarısına kadar gelecek şekilde küçük bir kanal açılarak ısı ileten kablo bu kısma üstyapıya temas edecek şekilde yerleştirilmiştir (Şekil 3.12).



Şekil 3.12. Asfalt temel üzerine ısı ileten tellerin yerleştirilmesi

Uygulanan astar tabakasının soğuması için bir süre bekletildikten sonra (1 saat kadar) iki tabaka halinde inşa edilecek olan yüzey tabakasının ilkinin serim işlemine P-401 karışımı kullanılarak başlanmıştır (Şekil 3.13a ve Şekil 3.13b). Serim işlemi sırasında astar tabakasından ve araçların etkisinden korumak için uygulanmış olan koruyucu malzemeler kaldırılmış ve ayrışma bölgelerine özen gösterilerek ilk yüzey tabakasının serim işlemi tamamlanmıştır (Şekil 3.14a, Şekil 3.14b ve Şekil 3.14c). Serim işlemi tamamlanan yüzey tabakası öncekine benzer şekilde vibrasyonlu silindir yardımıyla sıkıştırılmıştır. Bu tabakada ısı ileten tel ara geçiş bölgesine yerleştirilmiştir (Şekil 3.14d).

Üçüncü gün inşa edilen ilk kat yüzey tabakasından sonra bir önceki tabakada olduğu gibi deney kesimleri belirlenmiştir. Daha sonrasında 2, 3, 7 ve 8 kesitlerinde yüzey tabakaları arasındaki ayrışmayı temsil edecek olan ayrışma malzemeleri bir önceki tabakada olduğu gibi yerleştirilmiştir (Şekil 3.15). Ayrışma malzemelerinin hasar görmemesine özen gösterilerek son yüzey tabakası serilmiş ve titreşimli silindir ve arkasından lastik tekerlekli silindir kullanılarak son tabaka sıkıştırılmıştır.



a)



b)

Şekil 3.13. Sıcak karışım asfaltın inşaat sahasına getirilmesi



a)



b)



c)



d)

Şekil 3.14. Sıcak karışım ilk yüzey tabakasının inşa edilmesi

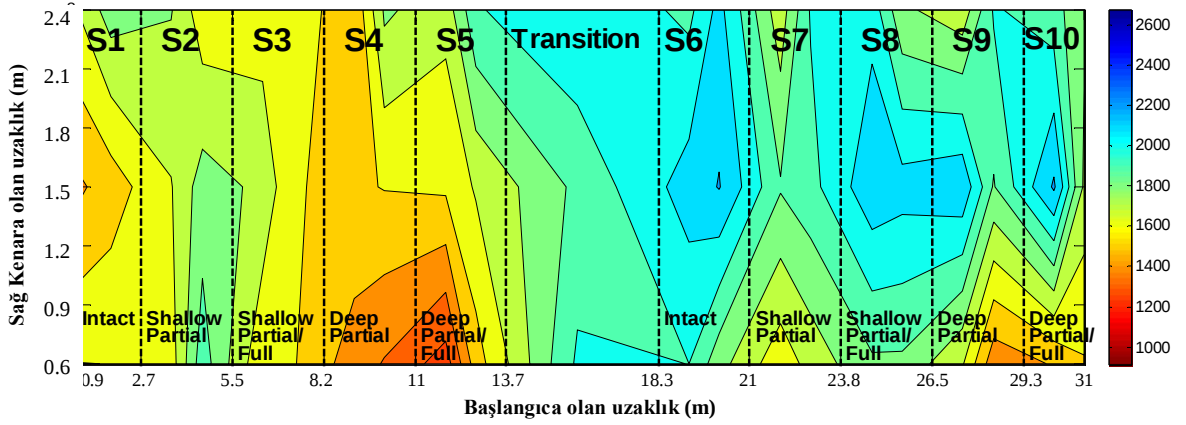
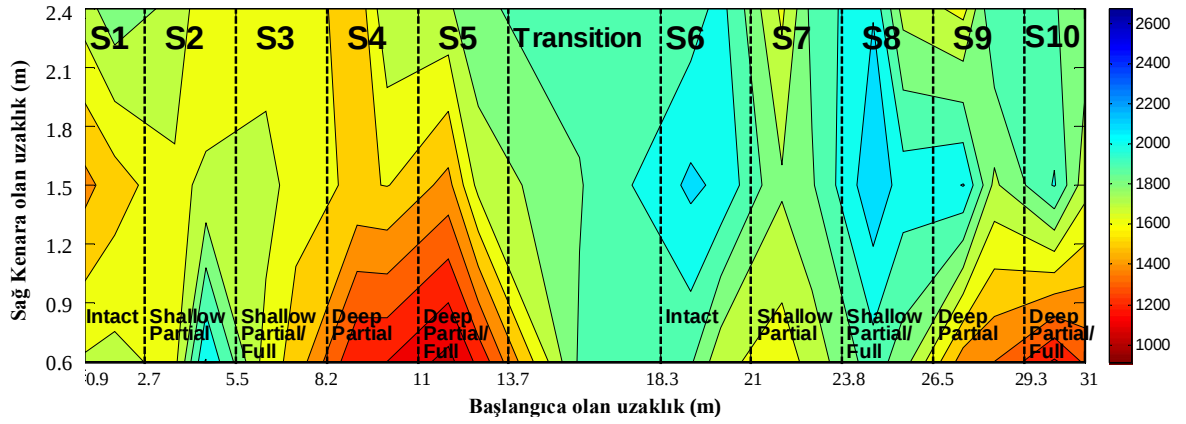


Şekil 3.15. Sıcak karışım üst yüzey tabakanın inşa edilmesi

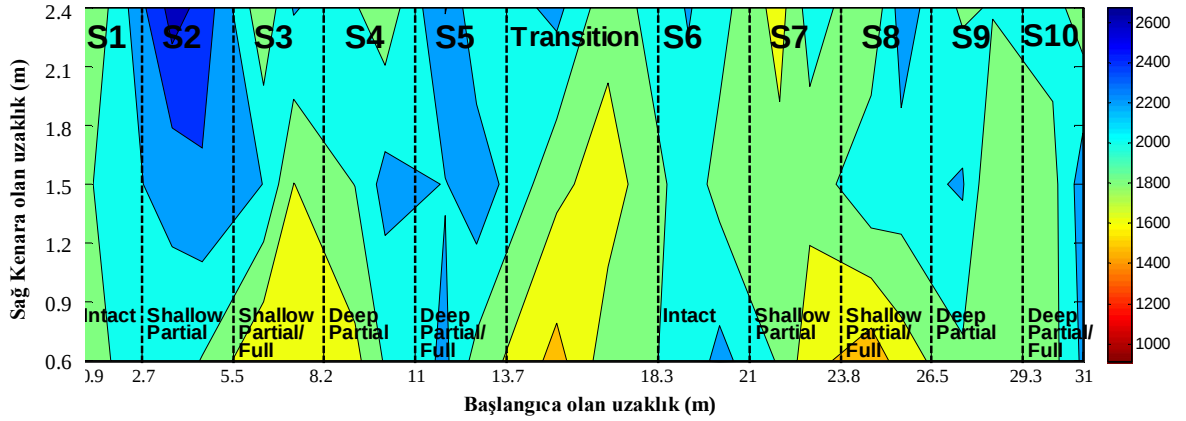
İnşaat sürecinde ve hemen sonrasında PSPA kullanılarak çeşitli sismik ölçümler alınmıştır. Birinci sıcak karışım asfalt tabakasının inşasından sonra bu tabaka üzerinde yapılan PSPA deneyine ait sonuçlar Şekil 3.16’ da gösterilmektedir. Deney süreci boyunca yüzey sıcaklığı (T) lazer sıcaklık ölçme aleti ile belirli aralıklarla ölçülmüştür. Farklı sıcaklıkta ölçülmüş olan modül değerleri, referans sıcaklığı olan 25 °C’ye (77 °F) aşağıdaki eşitlik kullanılarak düzeltilmiştir (Li and Nazarian, 1994):

$$Modulus_{77F} = \frac{Modulus_T}{(-0.00307 * T + 1.2627)} \quad (3.1)$$

Birinci sıcak karışım asfalt tabakasına ait referans sıcaklığa dönüştürülmüş ortalama PSPA modül değeri 12 GPa (1733 ksi) ve temel tabakası ile birinci sıcak karışım asfalt tabakalarının ortalama birleşik modül değeri ise 12.3 GPa’ dır (1791 ksi). Son asfalt tabakasının inşa edilmesinden yaklaşık 24 saat sonra benzer noktalarda tekrar PSPA deneyi gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.17). Son tabakanın ortalama modül değeri 14 GPa (2047 ksi) ve üç tabakaya ait ortalama birleşik modül değeri 12 GPa’ dır (1753 ksi).



Şekil 3.16. İnşaatın ikinci günü sonunda elde edilen PSPA deneyi sonuçları sonuçları

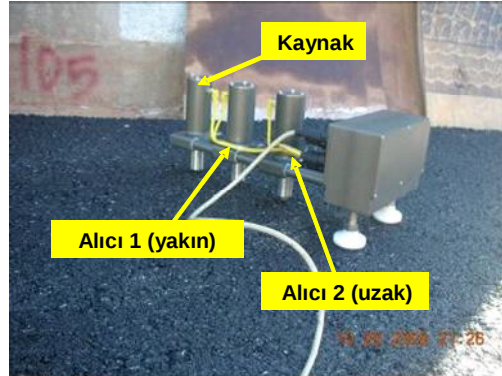


Şekil 3.17. Üstyapı kesiti inşaatının tamamlanmasından sonra kaplama tabakası üzerinde yapılan PSPA deneyi sonuçları

4.1.2. Ses/sesüstü simik metotlar

4.1.2.1. Darbe yankı (IE) ve ultrasonik yüzey dalgaları (USW)

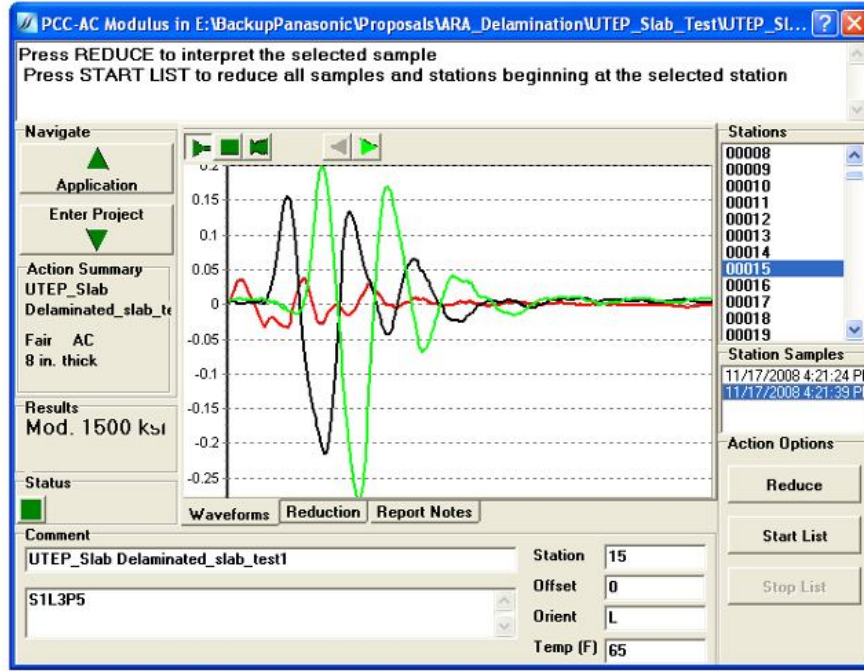
Sismik deney yönteminin uygulanabilirliğinin araştırılması için taşınabilir üstyapı analizcisi (PSPA) kullanılmıştır. PSPA kullanılarak, arazide yüzey tabakalarının ortalama modülleri bir kaç saniye içinde tahmin edilebilmektedir. Buna ek olarak derinlikle modüldeki değişim gözlenebilmektedir. PSPA taşınabilir sistem içinde iki alıcıdan ve bir kaynaktan oluşmaktadır (Şekil 4.2). Bu alet bir kablo ile taşınan transdüser birimine bağlanan bir bilgisayar ile kontrol edilmektedir. PSPA' nın çalışma prensibi, bir ortamda gerilme dalgaları oluşturulması ve bu dalgaların belirlenmesine dayanmaktadır (Hammons and Quintus, 2005). Sismik üstyapı analizcisinin (SPA) küçültülmüş bir modeli olarak tasarlanan PSPA ile ilgili ayrıntılı bilgi daha önceki bölümlerde verilmiştir.



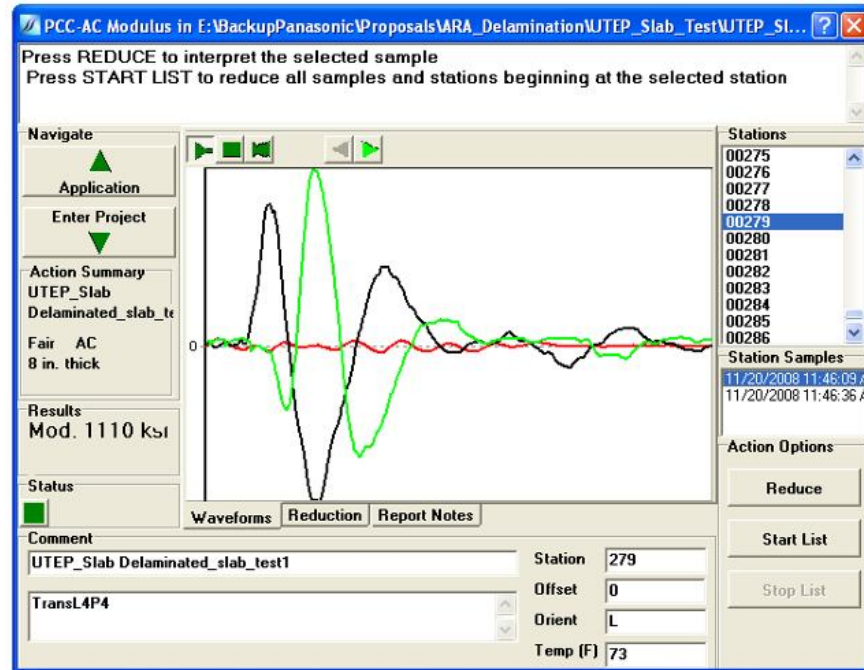
Şekil 4.2. Taşınabilir sismik üstyapı analizcisi detayı

PSPA, eş zamanlı olarak darbe yankı (IE) ve ultrasonik yüzey dalgaları (USW) yöntemlerini uygulamak için kullanılmıştır. Deneyin uygulanması ve arazideki analizi yaklaşık 15 saniye sürmektedir.

Arazide operatör yardımıyla üç PSPA sensöründen elde edilen tipik voltaj çıktısının örnekleri intak bölgesi ve ayrışma bölgesi için ayrı ayrı olmak üzere Şekil 4.3'te gösterilmektedir. İki alıcıdan elde edilen zaman kayıtlarının (siyah ve yeşil çizgiler) gözle görülür bir şekilde farklılık gösterdiği aşıkardır.



a) İntak bölgesi



b) Ayrışma bölgesi

Şekil 4.3. Küçük ölçekli yol çalışmasından PSPA ile elde edilen zaman kayıtları

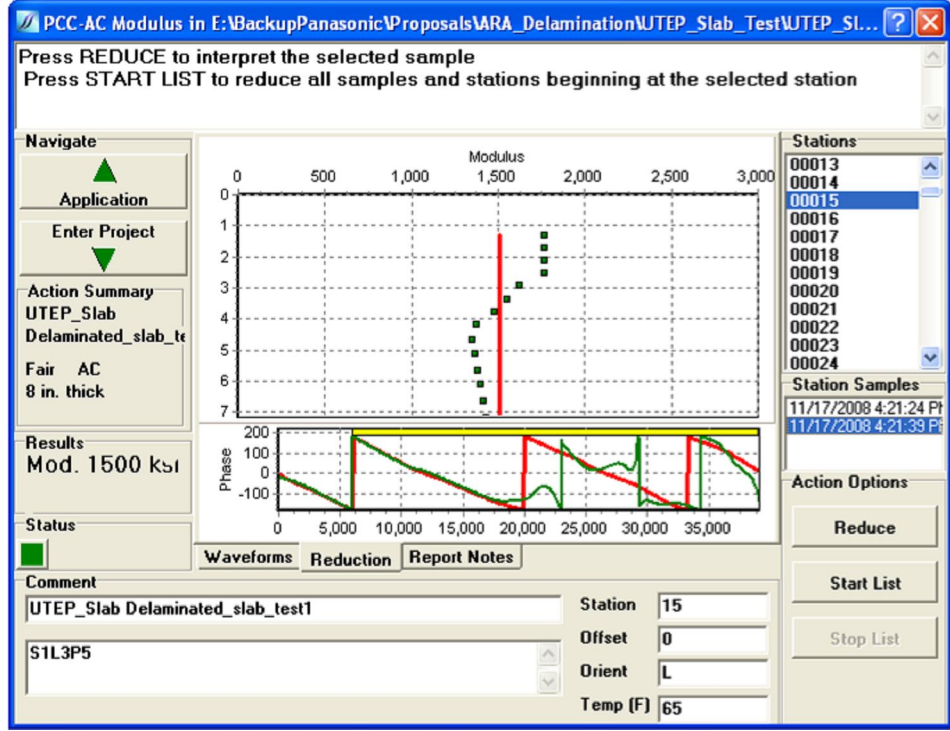
Ayrışmanın bulunduğu bölgelerdeki darbe kayıtları daha geniştir. İntak bölgesinden elde edilen kayıtlar incelendiğinde ise darbe kayıtları ayrışma bölgesindeki göre birbirlerine oldukça yakındır.

USW Sonuçları

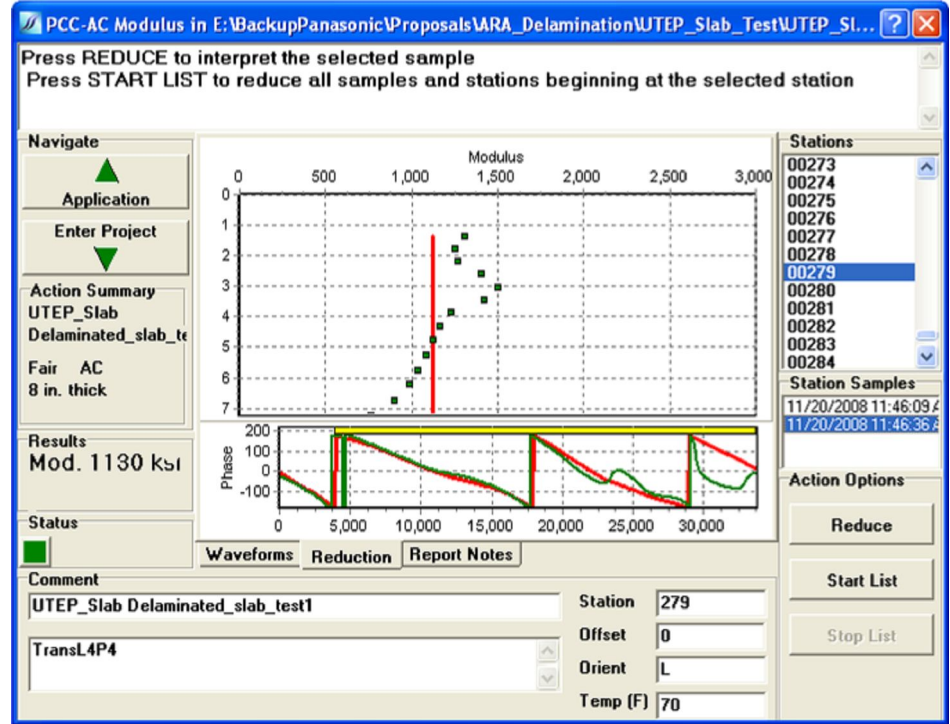
Şekil 4.3' teki zaman kayıtları için, operatör aracılığı ile elde edilen USW analiz sayfası Şekil 4.4' te gösterilmektedir. Şekilde görülen grafikler dağılma eğrisi olarak tanımlanan dalga boyu ile modüllerdeki değişimi göstermektedir. İntak bölgesi için dağılma eğrileri nispeten daha üniform bir şekle sahiptir. Oysa 63 mm' lik dalgaboyu altında (hasar bölgesinin derinliği) hasarlı bir noktadaki dağılma eğrileri için, modül değerlerinde daha keskin bir düşüş olduğu açık bir şekilde görülmektedir.

Şekillerdeki kırmızı dikey çizgiler, yüzeye çok yakın mesafeden (25 mm) itibaren, nominal 20 cm' lik tabaka kalınlığına kadar sıcak karışım asfalt tabakasının ortalama modül değerini göstermektedir. İki grafiğin sol tarafında gösterildiği gibi intak bölgesi için ortalama modül 10 GPa (1500 ksi) ve problemlı bölge için 7.8 GPa (1230 ksi) değerindedir.

On kesit boyunca ortalama modül değerlerindeki değişim Şekil 4.5' te gösterilmiştir. Modül değerleri Eşitlik 3.1 kullanılarak referans sıcaklık değerine göre yeniden hesaplanmıştır. Modül değerlerindeki değişimlerin daha kolay anlaşılması için üç farklı renk kullanılarak tanımlamalar kodlanmıştır (Çizelge 4.1). Ortalama ve standart sapma değerlerini elde etmek için kontrol kesimleri (1 ve 6) referans bölgeler olarak kullanılmıştır. İri daneli yüzey kaplaması ile inşa edilmiş olan ve Şekil 4.5a'da gösterilen şekilde, Kesit 2'den başlayarak Kesit 5'e kadar olan bölge boyunca beklenildiği gibi düşük modül değerleri elde edilmiştir. Bununla birlikte kısmi ayrışma bölümleri olan 2 ve 4 Kesitlerinde normal değere yakın modüller elde edilmiştir. İnce daneli yüzey kaplaması ile inşa edilmiş olan kısımda da benzer durum gözlemlenmiştir (Şekil 4.5b). Ancak derin ayrışma bölgelerinde, iri daneli kısımda olduğu gibi belirgin modül değişimi görülmemiştir.



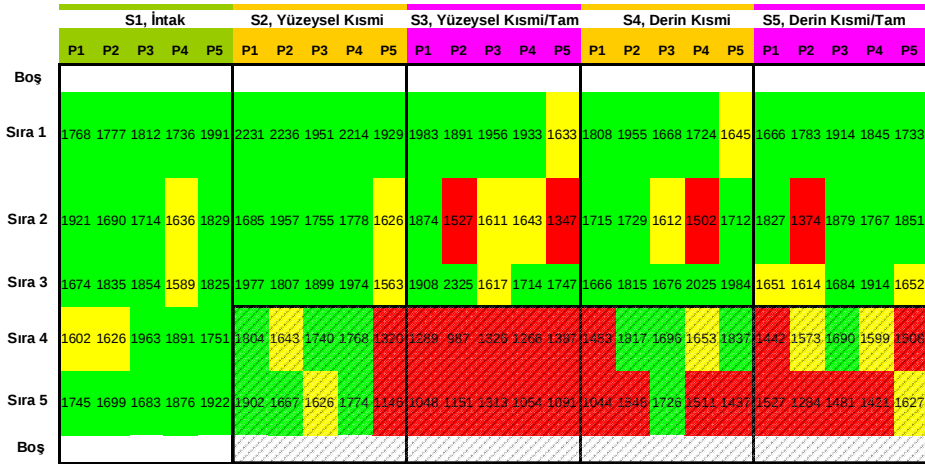
a) İntak bölgesi



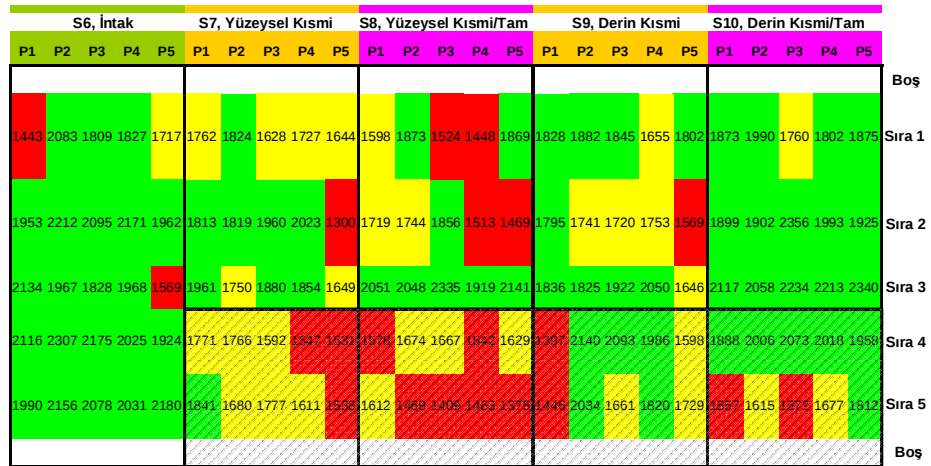
b) Ayrışma bölgesi

Şekil 4.4. PSPA ile elde edilen dağılma eğrisi sonuçları

10 kesite boyunca 63 mm' lik üst yüzey tabakasına ait ortalama modüllerinin düzey eğrili şekli Şekil 4.6a' da gösterilmiştir. Ayırıştırma malzemeleri kullanılarak oluşturulmuş bozulma bölgelerinde, özellikle 3 ve 5 Kesitlerinde (iri daneli karışım) ayrışma durumu gözlenmiştir. İnce daneli yüzey karışımı ile hazırlanmış kısımlarda ayrışma bölgelerindeki modül değerlerindeki azalma daha düşüktür. Üstyapının 200 mm olan toplam kalınlığı göz önünde bulundurulduğunda, Şekil 4.6b' de gösterildiği gibi hazırlanmış bozulma bölgelerindeki ayrışmanın varlığını gösteren işaretler daha belirgin hale gelmiştir. Bu sonuçlar doğrultusunda USW analizinin tabakalar arasındaki ayrışmanın belirlenmesinde etkili olabileceği görülmüştür.



a) Kesitler 1 - 5

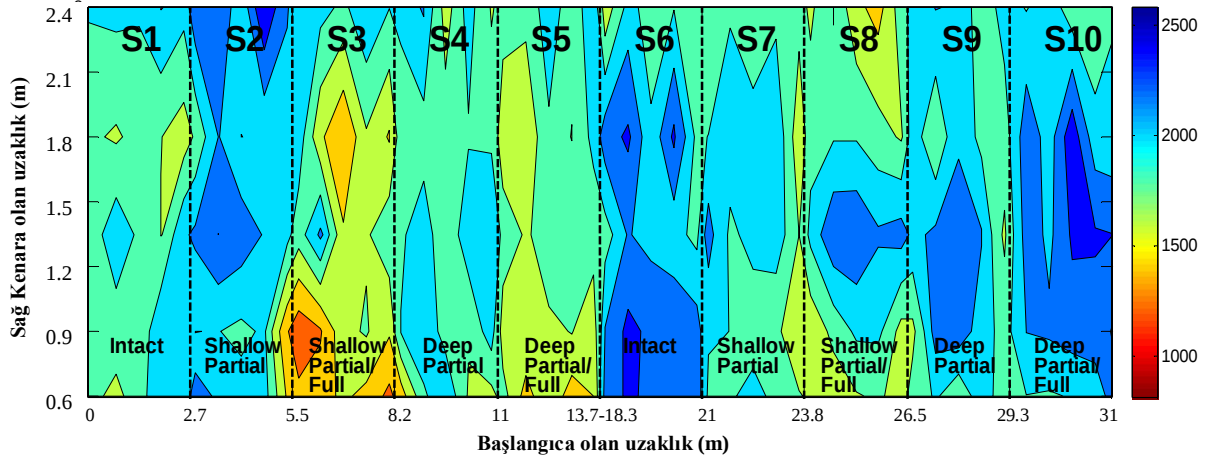


b) Kesitler 6 - 10

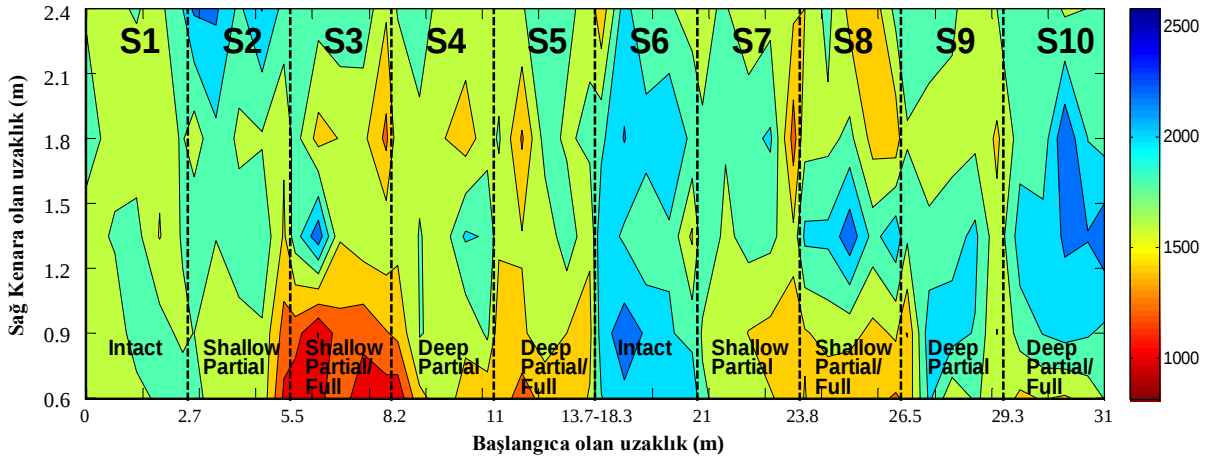
Şekil 4.5. Küçük ölçekli yol çalışmasında PSPA modül değerlerinin istatistiksel analizi

Çizelge 4.1. Modül değerlerinin analizinde kullanılan kriterler

Renk	Modül Değeri	Yorumlama
Yeşil	$E > E_{\text{kontrol}} - \sigma_{\text{kontrol}}$	Ölçülen modül değeri kontrol bölgesi ile benzerdir ya da daha fazladır
Sarı	$E_{\text{kontrol}} - \sigma_{\text{kontrol}} > E > E_{\text{kontrol}} - 2 \sigma_{\text{kontrol}}$	Ölçülen modül değerleri kontrol bölgesinden bir miktar düşüktür
Kırmızı	$E < E_{\text{kontrol}} - 2 \sigma_{\text{kontrol}}$	Ölçülen modül değerleri kontrol bölgesinden oldukça düşüktür



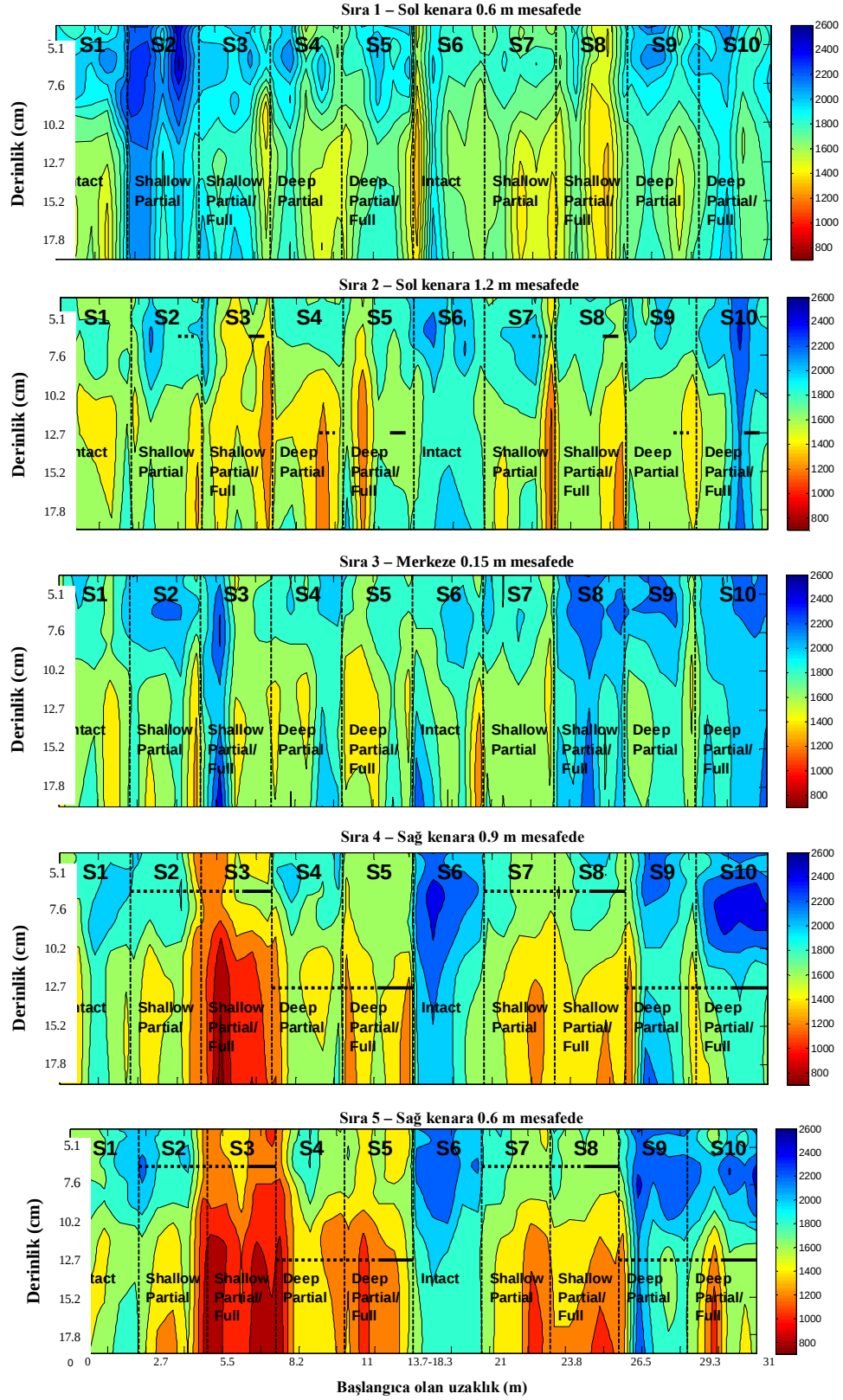
a) 63 mm



b) 200 mm

Şekil 4.6. Küçük ölçekli yol çalışmasında genel modül değerleri

10 kesit için beş şerit boyunca elde edilmiş olan ayrıntılı dağılıma eğrileri Şekil 4.7' de gösterilmiştir.

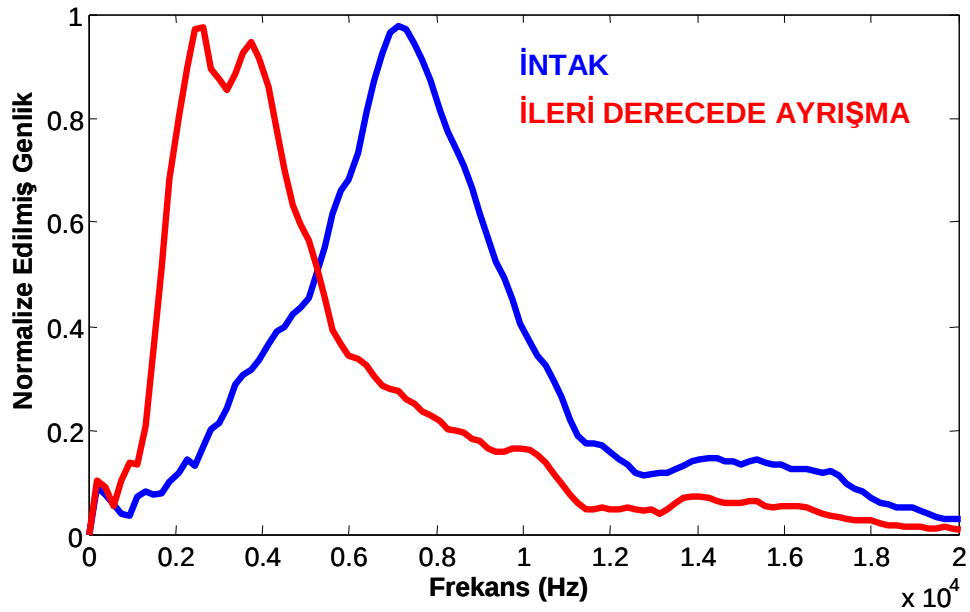


Şekil 4.7. Beş şerit için dağılma eğrisi sonuçları

Bu şekiller üzerinde ayrıştırma bölgeleri belirtilmiştir. Modül değerlerindeki düşüş Kesit 9 haricinde rahatlıkla görülebilmektedir.

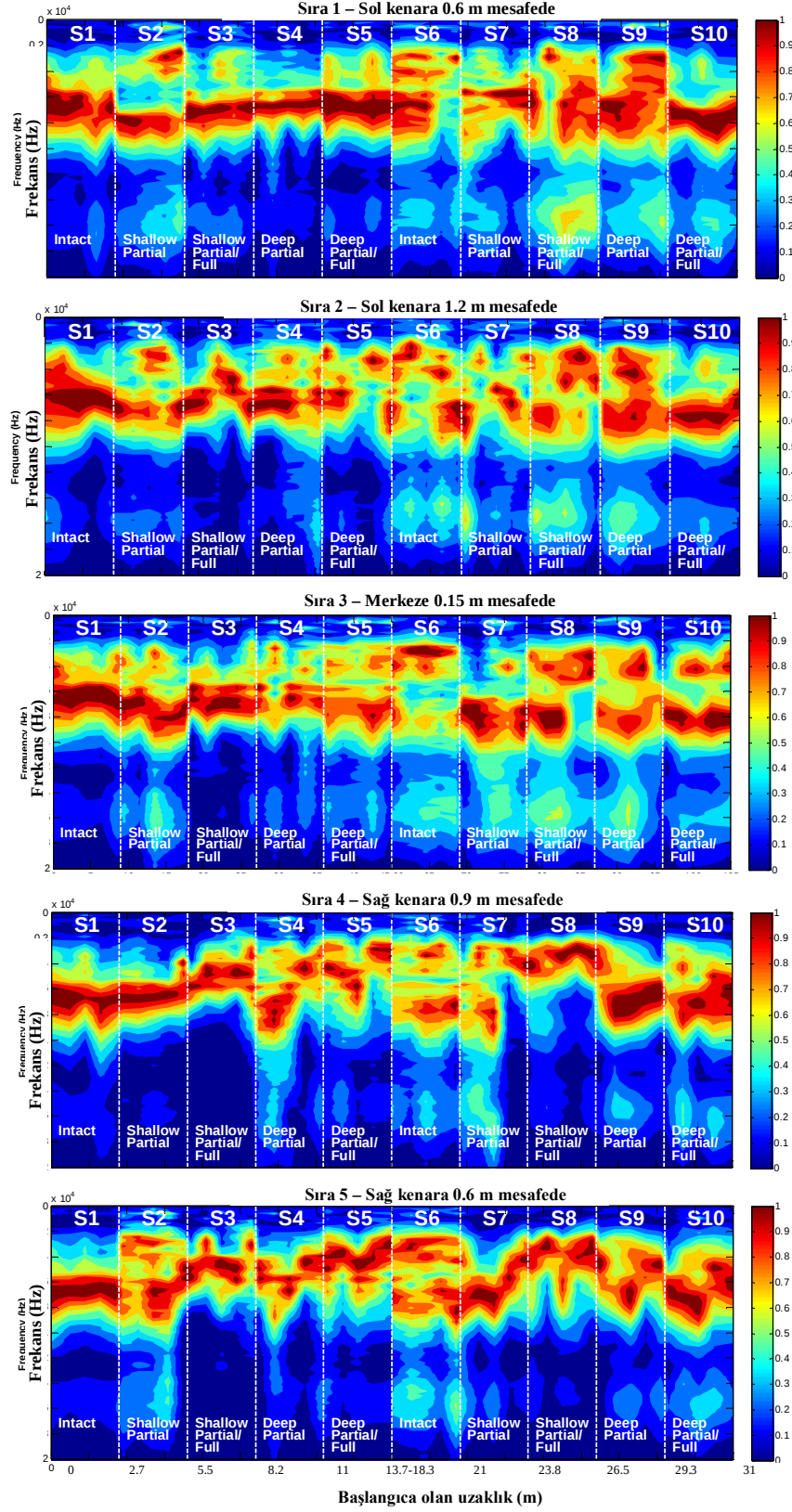
Darbe Yankı Metodu (IE)

Darbe yankı metodu bir üstyapı tabakasının alt ve üst sınırlarından yansıyan dalganın frekans rezonansının belirlenmesine dayanmaktadır. İntak bölgesi ve aşırı ayrışmanın var olduğu bir bölge için elde edilmiş değerlere göre hazırlanmış grafik Şekil 4.8’ de gösterilmiştir. PSPA’ nın kaynağa daha yakın olan alıcısındaki frekans tepkisinin normalize edilmiş genlik değeri kullanılmıştır. Frekans tepkisini elde etmek için, PSPA’ dan elde edilen zaman kayıtlarına Hızlı Fourier Dönüşüm (FFT) algoritması uygulanmıştır. İntak bölgesinde 6800 Hz frekans spektrumunda sadece bir pik değeri olması daha genel ve beklenen bir durumdur. Aşırı ayrışma durumu için ise, asfalttaki ani dalganın frekans tepkisinden dolayı iki pik değeri gözlemlenmektedir.



Şekil 4.8. PSPA ile elde edilmiş olan IE sonuçları

Spektrum genliklerine ait olan düzey çizgili şekilleri Şekil 4.9’ da gösterilmiştir.



Şekil 4.9. PSPA ile elde edilen IE sonuçları (boy kesit için)

İntak bölgelerindeki bütün noktalarda baskın frekans rezonansı görülmektedir. Bazı yüzeysel ayrışma bölgelerinde ayrışma durumu belirtileri gözlenmesine rağmen, kısmi ayrışma bölgeleri ile intak bölgeleri arasındaki fark güçlükle belirlenebilmektedir. Bu sonuçlar göz önünde bulundurularak PSPA aleti kullanılarak elde edilen IE sonuçlarının, ayrışmanın belirlenmesinde başarılı olmadığı görülmüştür.

4.1.3. Defleksiyon metotları

4.1.3.1. D   en ağırlık deflektometresi (FWD)

K    k  l  ekli yol çalışmasının değerlendirilmesi için seçilen defleksiyon yönteminde, bir darbe çekici ve yedi jeofondan olu mu  d   en ağırlık deflektometresi (FWD) kullanılmıştır. Bu sistem  ekil 4.10a’ da gösterildiği gibi bir treylere monte edilmiş şekildedir. İlk jeofon (SD1) y k tablasının hemen sağ altında olup diğer jeofonlar 300 mm aralıklıdır ( ekil 4.10b). Yük uygulama sistemi 300 mm çapında bir yük tablasından oluşmakta ve belirli bir üstyapı kesitine 27 kN eşdeğer yük uygulamaktadır. K    k  l  ekli yolda 90 noktada, 1, 3 ve 5 sırası boyunca ve 1, 3 ve 5 noktaları üzerinde FWD deneyi gerçekleştirilmiştir. Her bir deney seti, oturtma vuru u ve üç ek vuruş sürecinden oluşup, uygulanan deney setinin sonunda her bir jeofon yardımıyla  l   len son üç vuru a ait ortalama defleksiyon değerleri kaydedilmektedir.

İntak ve aşırı ayrışma bölgelerinde yapılan defleksiyon  l   mleri  ekil 4.11’ de gösterilmiştir. 1 ve 2 jeofonlarından (SD1 ve SD2) elde edilen defleksiyon verileri göz önünde bulundurulduğunda aşırı ayrışma bölgesindeki defleksiyon değerinin oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Diğer jeofonlardan elde edilen defleksiyon verileri arasındaki fark oldukça azdır.



a) Treylere bağlı FWD

b) Yükleme plakası detayı

Şekil 4.10. Çalışmada kullanılan düşen ağırlık deflektometresi



Şekil 4.11 Çalışmadan elde edilen defleksiyon örnekleri

On kesit boyunca defleksiyon değerlerindeki değişim Şekil 4.12' de gösterilmektedir. Renk kodları ile ilgili bilgi

Çizelge 4.1' de verilmiştir. Defleksiyon verileri göz önüne alındığında daha düşük rijitlik daha yüksek defleksiyonu verdiği için, standart sapma değeri çıkartılmak yerine eklenmiştir.

	S1, İntak			S2, Yüzeysel Kısmı			S3, Yüzeysel Kısmı/Tam			S4, Derin Kısmı			S5, Derin Kısmı/Tam		
	P1	P3	P5	P1	P3	P5	P1	P3	P5	P1	P3	P5	P1	P3	P5
Boş															
Sıra 1	4.9	4.6	4.7	5.6	5.7	5.2	5.4	5.5	4.7	5.0	4.1	3.9	4.2	4.1	4.5
Sıra 2	5.1	5.0	5.1	5.6	6.0	5.7	5.6	6.3	6.8	5.9	5.3	4.7	4.7	5.1	5.2
Sıra 3	7.0	6.7	5.9	6.9	6.9	7.6	8.9	10.0	11.6	8.1	6.3	7.0	7.4	7.6	6.7
Boş															

a) Kesitler 1 - 5

	S6, İntak			S7, Yüzeysel Kısmı			S8, Yüzeysel Kısmı/Tam			S9, Derin Kısmı			S10, Derin Kısmı/Tam		
	P1	P3	P5	P1	P3	P5	P1	P3	P5	P1	P3	P5	P1	P3	P5
Boş															
Sıra 1	5.2	5.7	5.6	5.5	5.2	5.2	5.5	5.3	5.1	5.2	4.4	4.9	5.3	5.5	5.0
Sıra 2	5.0	4.9	5.2	5.3	6.5	6.4	5.7	5.5	6.8	4.8	4.8	5.4	5.1	5.1	5.1
Sıra 3	5.2	5.8	5.3	5.7	5.7	6.0	5.6	6.4	8.2	5.6	6.7	7.3	9.3	9.8	8.7
Boş															

b) Kesitler 6 – 10

Şekil 4.12. FWD’ den elde edilen defleksiyon verilerinin istatistiksel analizi

Şekil 4.12’ den de görülebileceği gibi, defleksiyonlar ayrışma bölgelerini belirlemede oldukça başarılı olmuştur. Elde edilmiş olan defleksiyon değerleri MODULUS 6.0 programı kullanılarak modül değerlerine dönüştürülmüştür (Liu and Scullion, 2001). Bütün üstyapı (kalınlığı 200 mm) ve taban zemini olmak üzere 2 tabakalı analiz yapılmıştır. MODULUS programından elde edilen asfalt modül değerleri Şekil 4.13’ te gösterilmektedir. Genel anlamda FWD ayrışma bölgelerini belirlemede oldukça başarılıdır.

	S1, İntak			S2, Yüzeysel Kısmı			S3, Yüzeysel Kısmı/Tam			S4, Derin Kısmı			S5, Derin Kısmı/Tam		
	P1	P3	P5	P1	P3	P5	P1	P3	P5	P1	P3	P5	P1	P3	P5
Boş															
Sıra 1	1093	1289	1306	812	757	916	918	783	1091	912	1375	1606	1273	1279	1008
Sıra 2	989	1080	1108	877	749	846	870	672	524	763	920	1184	1081	871	786
Sıra 3	692	769	1046	675	660	493	328	294	195	405	741	527	374	346	487
Boş															

a) Kesitler 1 - 5

	S6, İntak			S7, Yüzeysel Kısmı			S8, Yüzeysel Kısmı/Tam			S9, Derin Kısmı			S10, Derin Kısmı/Tam		
	P1	P3	P5	P1	P3	P5	P1	P3	P5	P1	P3	P5	P1	P3	P5
Boş															
Sıra 1	876	749	804	856	862	784	697	749	849	759	1085	898	835	741	990
Sıra 2	927	1073	946	903	282	451	598	628	380	856	881	689	876	899	914
Sıra 3	869	619	815	695	619	489	455	357	225	692	488	409	285	252	307
Boş															

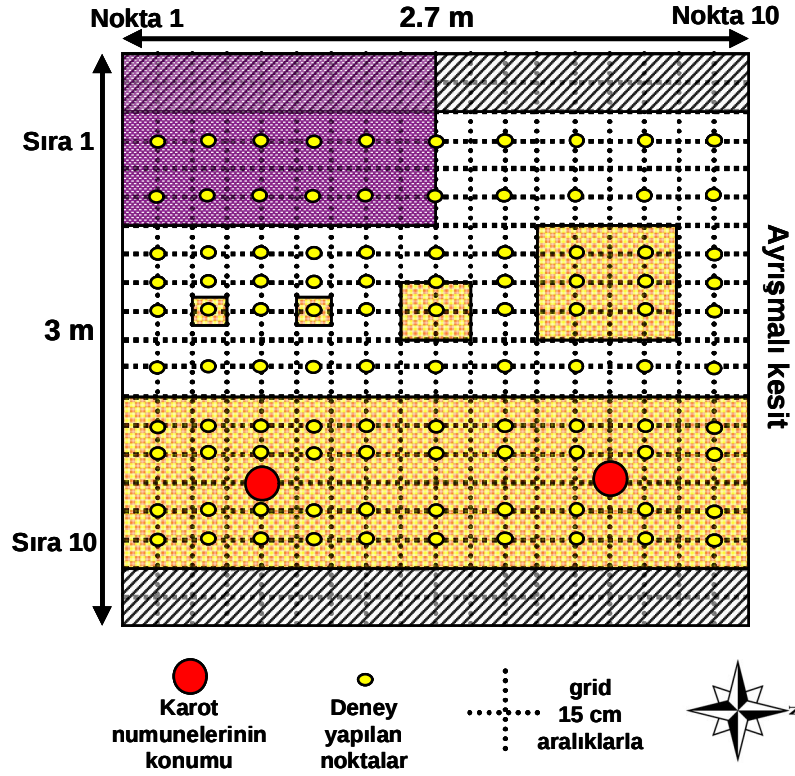
b) Kesitler 6 - 10

Şekil 4.13. FWD modül değerleri

4.2. NDT Deney Metotlarının Uygulanabilirliğinin Kanıtlanması

4.2.1. Deney noktalarının konumlarının belirlenmesi

Kesit başına 25 noktada yapılan USW analizinin başarılı sonuç vermesinin ardından, ayrışmaların meydana geldiği çeşitli durumlarda metodun uygulanabilirliğinin güvenilirliğini araştırmak için, aynı kesitler üzerinde daha yoğun olarak deneyin uygulanmasına karar verilmiştir. Ayrışma bölgelerine daha fazla deney noktası gelecek şekilde her bir kesitte 100 deney noktası tespit edilmiştir (Şekil 4.14).



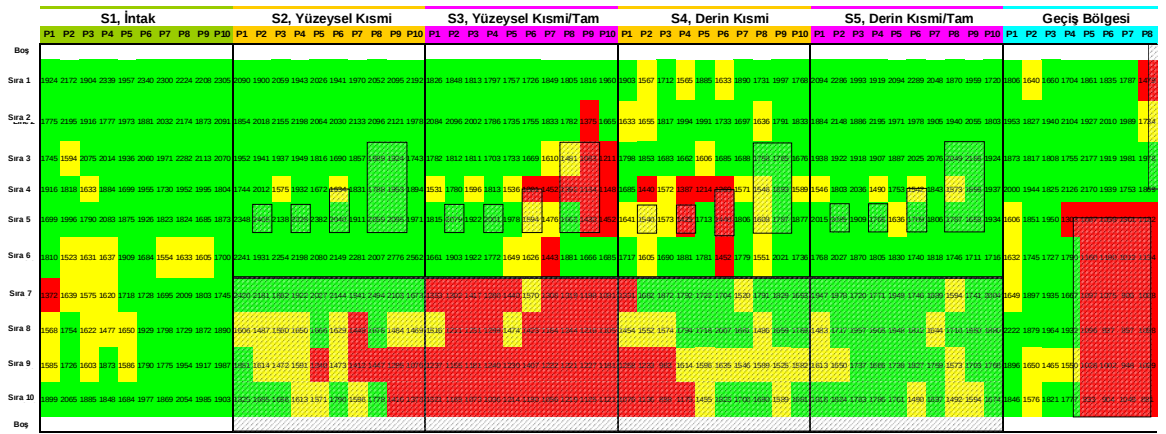
Şekil 4.14. Her bir kesitte kullanılan deney noktalarının yerleri

4.2.2. Ultrasonik yüzey dalgası (USW) sonuçları

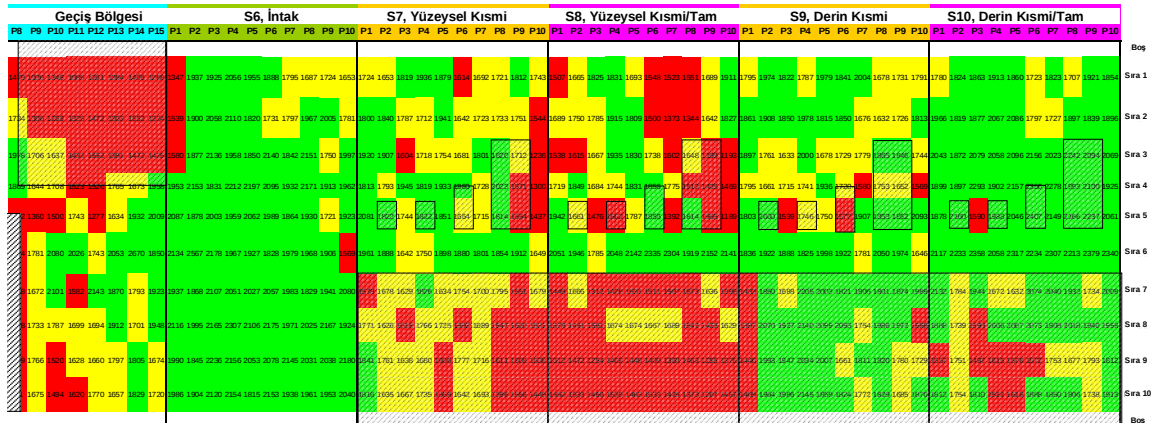
PSPA deney aleti kullanılarak gerçekleştirilen USW deneyleri, soğuk hava koşulları altındaki üstyapı durumunu değerlendirmek için Mart ayında ve sıcak hava koşulları altındaki üstyapının durumunu değerlendirmek için Haziran ayında yapılmıştır. Daha önce ayrıntılı olarak açıklanmış olan prosedüre uygun olarak gerçekleştirilen PSPA ile yapılan soğuk hava deneylerinin sonuçlarına bağlı olarak elde edilen, 10 kesit boyunca üç sıcak karışım asfalt tabakasının ortalama modül değerlerindeki değişim Şekil 4.15a'da gösterilmiştir. 2 ve 3 Kesitleri (iri karışım için yüzeysel kısmi ayrılmış ve tamamen ayrılmış bölge) genel olarak beklenen düşük modül değerlerini vermiştir. Kesit 4'ün bazı kısımlarında (derin kısmi ayrışma durumu) düşük modül değeri elde edilmiştir. Ancak Kesit 5'in (derin tamamen ayrışma durumu) çoğunda normal modül değerleri elde edilmiştir. Benzer bir durum ince karışım yüzey kaplaması kesitlerinde de gözlenmiştir (Şekil 4.15b). Yüzeysel ayrışma bölgeleri ile tamamen ayrılmış bölgelerin çoğunda (7 ve 8 Kesitleri) düşük modül değerleri elde edilmiştir. Derin ayrışma bölgelerinde ise (9 ve 10 Kesitleri)

normal değerlere yakın modül değerleri gözlenmiştir. 2 Kesiti haricindeki diğer yüzeysel ayrışmanın var olduğu 0.6 m' ye 0.6 m' lik kare şeklinde olan alanlarda, ayrışmalar belirlenebilmiştir. Daha küçük boyuttaki ayrışma bölgelerinde bu durum gözlenememiştir.

Soğuk hava koşullarında gerçekleştirilen genişletilmiş deney noktaları ile aynı noktalar üzerinde yapılan sıcak hava koşulları altında gerçekleştirilen deney sonuçları Şekil 4.16' da gösterilmiştir. İki farklı mevsimde gerçekleştirilen deneylerin sonuçları karşılaştırıldığında, soğuk hava koşulları altında gerçekleştirilmiş olan deney sonuçlarının ayrışma bölgelerinin belirlenmesinde daha etkili olduğu görülmüştür. Bu duruma sebep olarak, sıcak hava koşulları altında tabakalar arasındaki ayrıştırma malzemelerinin aderansı artırdığı düşünülmektedir.



a) Kesitler 1 - 5



b) Kesitler 6 - 10

Şekil 4.15. Soğuk hava için genişletilmiş PSPA modül değerleri

Deneye tabi tutulan noktaların sayısının çok olması dolayısıyla, deneyler sabahın erken saatlerinde başlayıp akşam saatlerine kadar devam etmiştir. İki farklı karışım üzerinde sismik modüllerindeki günlük sıcaklık değişiminden (13 °C ile 25 °C) dolayı meydana gelen dalgalanmanın etkisini belirlemek için, bir kaç deney noktasında değişik sıcaklıklara tekabül eden farklı zamanlarda deneyler tekrarlanmıştır. 1 ve 6 Kesitlerinden günün farklı saatlerinde elde edilen modül değerleri, referans sıcaklık değeri olan 25 °C’ de normalize edilmiş ve bu değerlerdeki değişim Şekil 4.17’ de gösterilmiştir. Her iki kesitin normalize edilmiş modül değerleri ve sıcaklıklar arasında yüksek R^2 değeri ile lineer bir ilişki elde edilmiştir. Sıcaklığın değişimi göz önünde bulundurularak, sismik modül değerine göre ayarlanmış genel eşitlikler aşağıdaki gibidir.

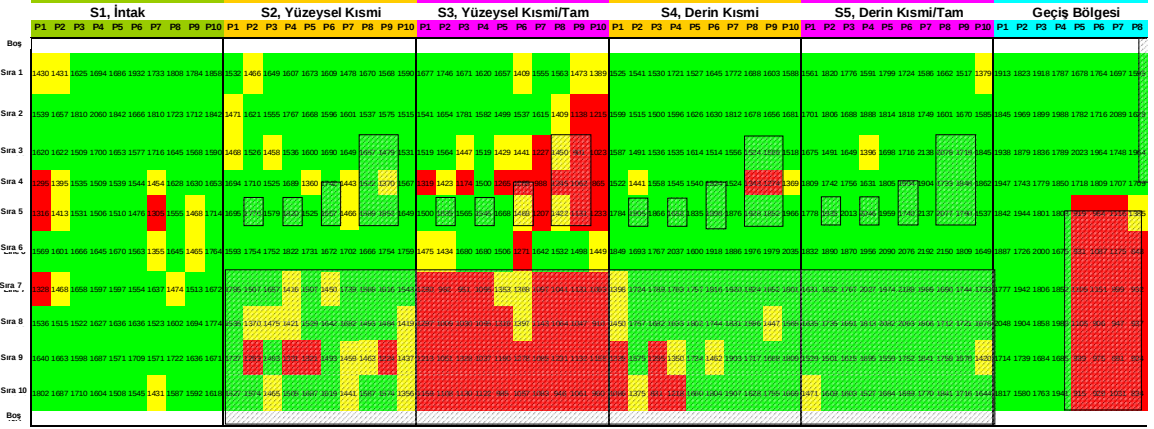
$$E_{77^{\circ}F} = \frac{E_{T^{\circ}F}}{-0.0085 \cdot T + 1.651}, \text{ iri daneli yüzey karışımı} \quad (4.1)$$

$$E_{77^{\circ}F} = \frac{E_{T^{\circ}F}}{-0.0107 \cdot T + 1.823}, \text{ ince daneli yüzey karışımı} \quad (4.2)$$

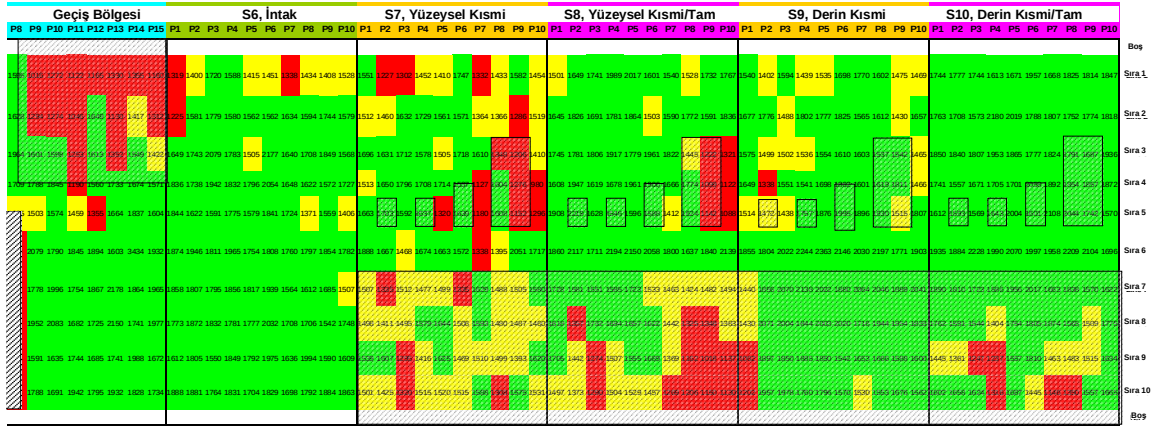
Bu eşitliklerde kullanılan T, PSPA deneyleriyle eş zamanlı elde edilen (°F cinsinden) yüzey sıcaklığıdır. Bu eşitlikler Eşitlik 3.1’e göre bir miktar daha yüksek bir düzenleme sağlamıştır.

Eşitlik 4.1 ve 4.2 kullanılarak yeniden düzenlenen modül değerlerine göre düzenlenmiş sonuçlar Şekil 4.18 ve Şekil 4.19’ da gösterilmiştir. Elde edilen sonuçların Şekil 4.16 ve Şekil 4.17’ de elde edilmiş olan sonuçlarla oldukça yakın olduğu görülmektedir. Soğuk hava koşulları altında elde edilen sonuçlar için (Şekil 4.18) ince karışımın kullanıldığı bölgede formülasyonun etkinliği 9 ve 10 Kesitleri için daha yüksektir (derin ayrışma durumu göz önünde bulundurulduğunda). Diğer taraftan, sıcak hava koşulları altında elde edilen modül değerlerinin sıcaklığa göre düzenlenmesinin ardından Kesit 7’ de yüzeysel kısmi ayrışma durumunda herhangi bir belirginlik görülmemiştir (Şekil 4.19). Bu durum daha önce kullanılan Eşitlik 3.1’ deki referans sıcaklığa göre düzenleme formülünün yeterli olduğunu ve bazı kesitlerde ayrışmanın belirlenmesindeki yetersizliğin metottaki bazı eksikliklerden kaynaklandığını göstermektedir. Bununla birlikte PSPA deneyleri için sıcaklık-

modül düzenleme eşitliğinde bir miktar değişikliğin yapılması da uygun olabilecektir.

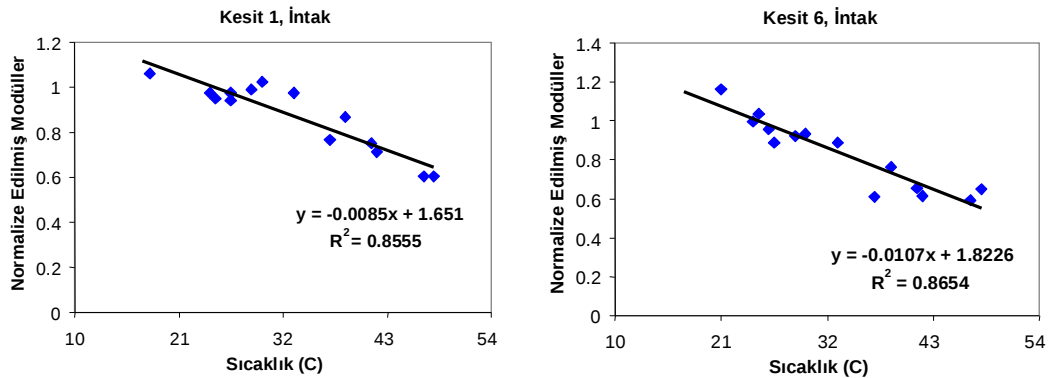


a) Kesitler 1 - 5



b) Kesitler 6 - 10

Şekil 4.16. Sıcak hava için genişletilmiş PSPA modül değerleri



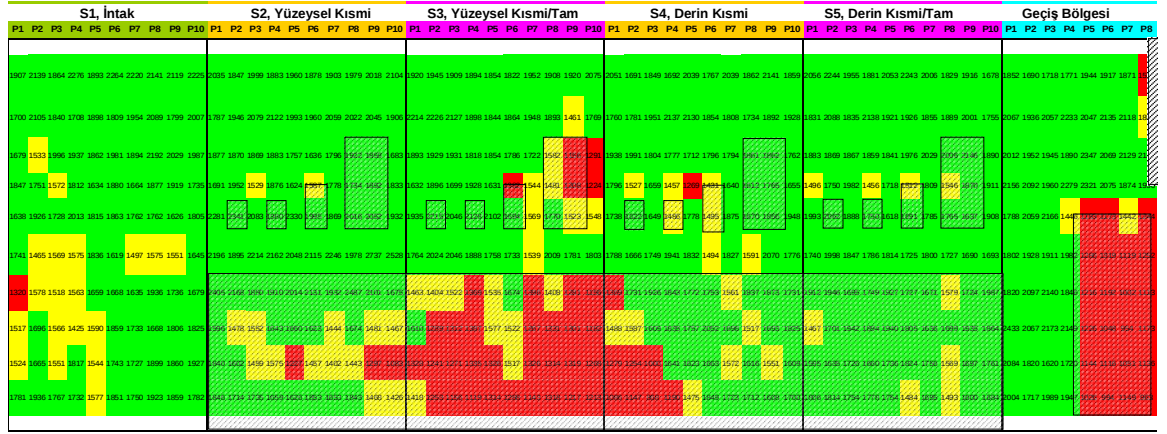
a) Kaba karışım yüzey kaplaması

b) İnce karışım yüzey kaplaması

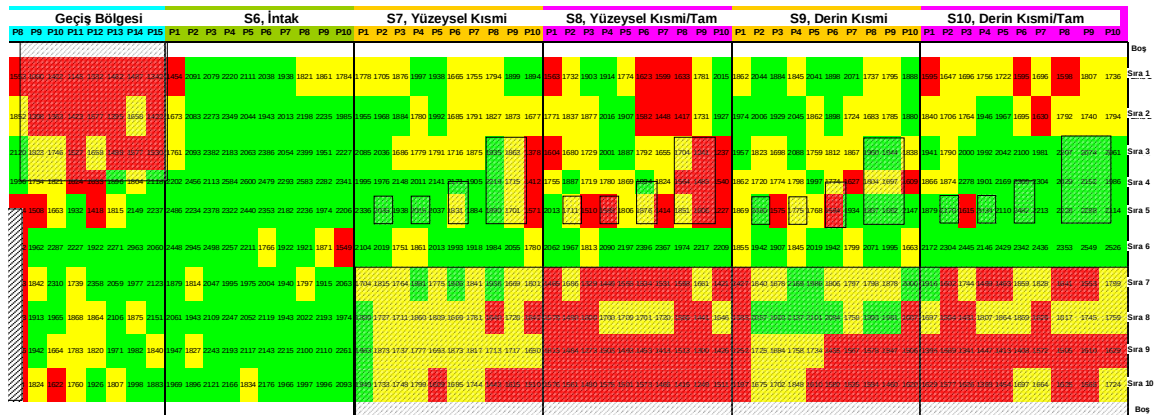
Şekil 4.17. PSPA modüllerinin sıcaklıkla değişimi

Şimdiye kadar, tabakalar arasındaki ayrışmanın değerlendirilmesi kontrol kesimlerinin (1 ve 6 Kesitleri) ortalamalarına ve standart sapma değerlerine göre yapılmıştı. Yerinde gerçekleştirilen arazi çalışmalarında, belirli bir kontrol alanının bulunması mümkün olmadığından analiz için farklı bir değerlendirme tekniğinin geliştirilmesi gerekmektedir. Bu amaçla tekrar ortalama ve standart sapma değerleri kullanılarak hem tabakalar arası bütünlüğün hem de ayrışma durumunun belirlenmesine gidilecektir. Fakat tabakalar arasındaki aderansın yüksek olduğu durum ile ayrışmanın gerçekleştiği durumlara ait özellikler arasındaki ciddi farktan dolayı, Çizelge 4.2' de gösterildiği gibi belirsizlik derecesi artırılmıştır. Geliştirilmiş olan bu protokolda sonuçları değerlendirmek için $\frac{1}{2}$ standart sapma ve 1 standart sapma değerleri kullanılmıştır. Kriterleri açıklayıcı bir örnek Çizelge 4.3' de gösterilmiştir. Bu çizelgede FWD' den elde edilmiş olan modül değerlerinin geliştirilmiş kriterlere göre renk kodlarına yerleştirilmesi daha net bir şekilde açıklanmaktadır. Benzer işlemler her bir deney metodu verileri için ayrı ayrı uygulanmıştır.

Geliştirilmiş olan kriterlere ve renklere göre kodlanmış modül değerleri Şekil 4.20 ve Şekil 4.21' de verilmiştir. Bu sonuçlar Şekil 4.18 ve Şekil 4.19 ile benzerlik göstermektedir. Bu durum göz önünde bulundurularak geliştirilmiş olan söz konusu kriter bundan sonraki bütün sonuçlara uygulanacaktır.



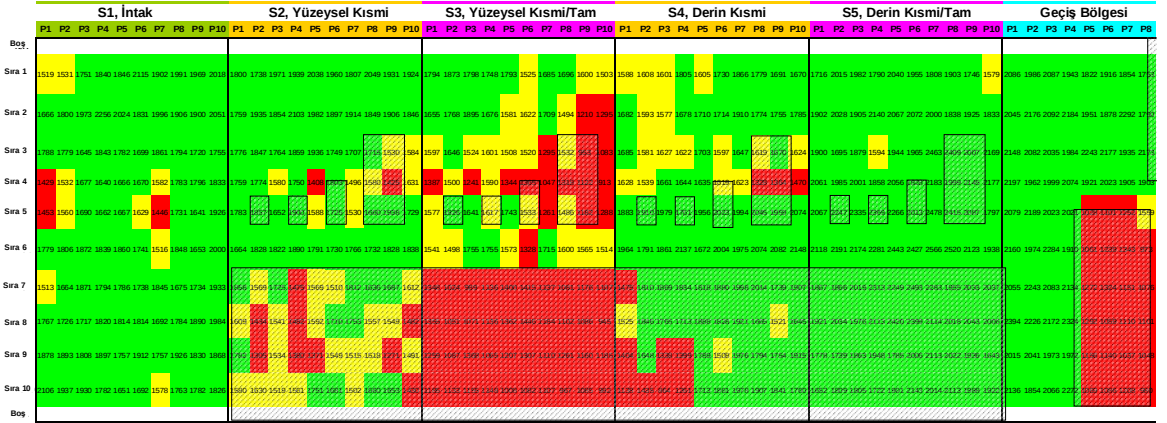
a) Kesitler 1 - 5



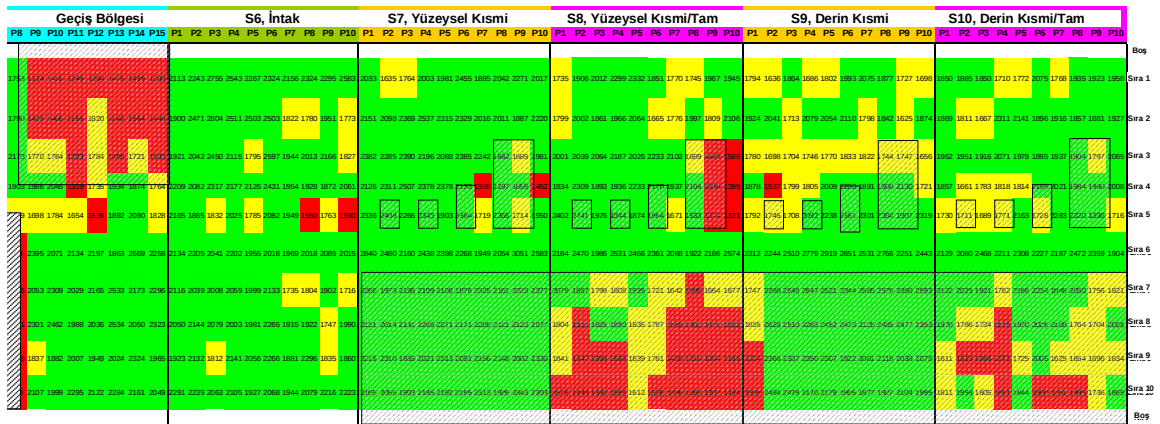
b) Kesitler 6 – 10

Şekil 4.18. Soğuk havada PSPA modüllerinin ısı farklılıklarına göre düzenlenmesi

Soğuk hava koşulları altında yapılmış olan PSPA deneyinin bütün kesitler için 63 mm' lik üst yüzey tabakasına göre analiz edilmiş ortalama modül değerlerine ait düzey eğrili çizimi Şekil 4.22' de gösterilmiştir. 3 ve 8 Kesitleri için nispeten daha düşük modül değerleri elde edilmiştir (yüzeysel ve tamamen ayrışma durumu). Yüzeysel ve kısmi ayrışma durumunda da benzer şekilde modül değerinde düşüş gözlenmiştir. Bu model, iki bitişik tabaka arasında ayrışma söz konusu olduğu zaman sıcak karışım asfalt tabakalarının rijitliğinin düşebileceğini göstermektedir.



a) Kesitler 1 - 5



b) Kesitler 6 - 10

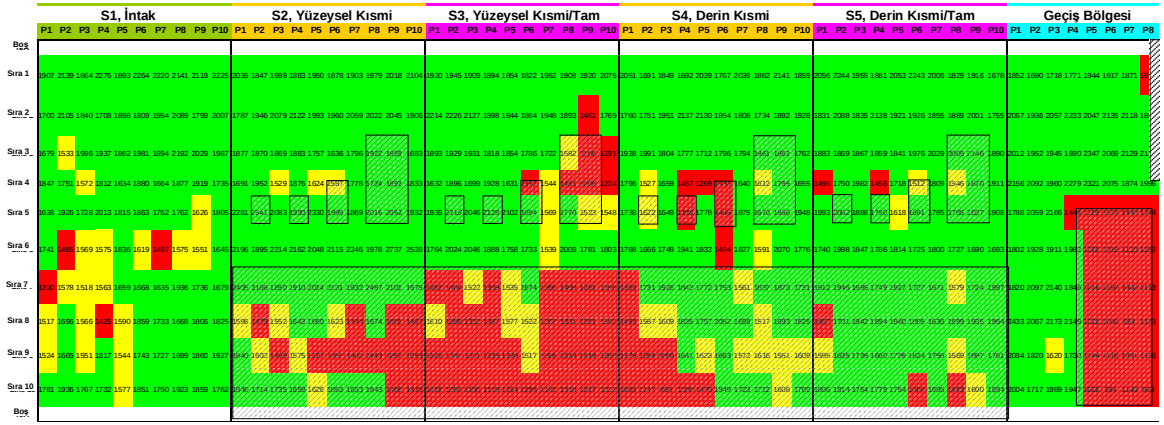
Şekil 4.19. Sıcak havada PSPA modüllerinin ısı farklılıklarına göre düzenlenmesi

Çizelge 4.2. Modül değerlerini analiz etmekte kullanılan geliştirilmiş kriterler

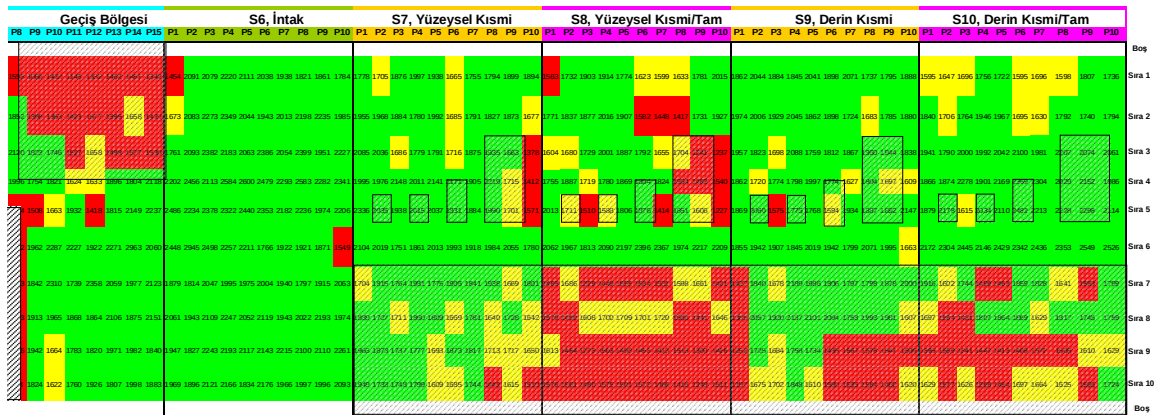
Renk	Modül Değeri	Yorumlama
Yeşil	$E > E_{\text{control}} - \frac{1}{2} \sigma_{\text{control}}$	Ölçülen modül değeri kontrol bölgesi ile benzerdir ya da daha fazladır
Sarı	$E_{\text{control}} - \frac{1}{2} \sigma_{\text{control}} > E > E_{\text{control}} - \sigma_{\text{control}}$	Ölçülen modül değerleri kontrol bölgesinden bir miktar düşüktür
Kırmızı	$E < E_{\text{control}} - \sigma_{\text{control}}$	Ölçülen modül değerleri kontrol bölgesinden oldukça düşüktür

Çizelge 4.3. Geliştirilmiş kriterin değerlendirildiği bir örnek

	Sıra 1	Sıra 2	Sıra 3	Sıra 4	Sıra 5
Kesit 8 Nokta 3	1216	1283	744	604	302
İnce Daneli Yüzey Kaplaması için (6-10 Kesitleri Arası)		Ortalama Modül	1101	Standart Sapma	465
Değerlendirme	(ortalama-1/2 standart sapma) değerinden büyük (ortalama-1/2 standart sapma) ile (ortalama-1 standart sapma) değerleri arasında (ortalama-1 standart sapma) değerinden küçük				
	ortalama-1/2 standart sapma = 868 ortalama-1 standart sapma = 636				
Sonuç	1216 Rijit	1283 Rijit	744 Kısmi Bozulma	604 Bozulma	302 Bozulma

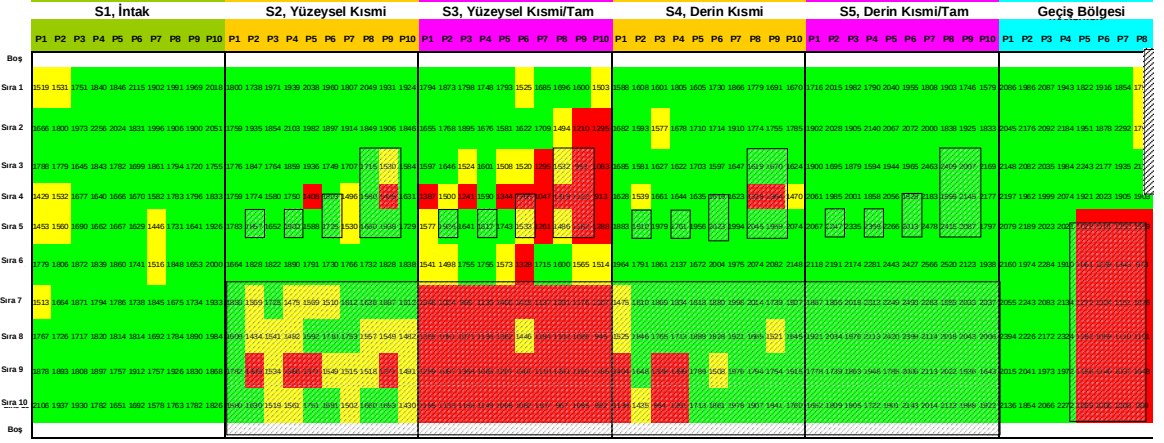


a) Kesitler 1 – 5

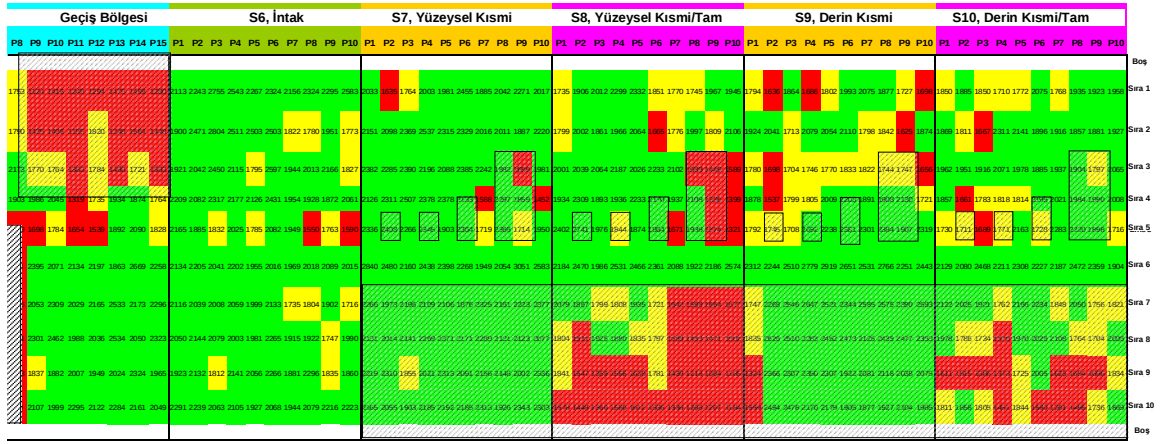


b) Kesitler 6 – 10

Şekil 4.20. Geliştirilmiş olan istatistiksel kritere bağlı olarak soğuk havada PSPA modüllerinin ısı farklılıklarına göre düzenlenmesi



a) Kesitler 1 - 5

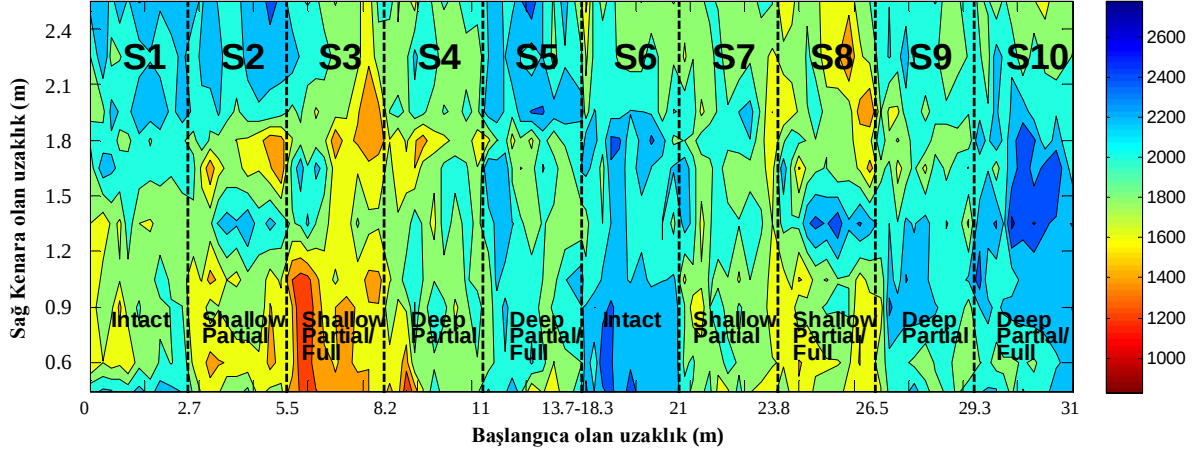


b) Kesitler 6 – 10

Şekil 4.21. Geliştirilmiş olan istatistiksel kritere bağlı olarak sıcak havada PSPA modüllerinin ısı farklılıklarına göre düzenlenmesi

Soğuk hava koşulları altında, bütün kesitler boyunca 10 şerit için dağılma eğrilerinin (derinlikle modüldeki değişime göre) düzey eğrili çizimi Şekil 4.23' te verilmiştir. Derinlikler ve ayrışma bölgelerinin yerleri şekiller üzerinde gösterilmiştir. Şekillerdeki sabit çizgiler tamamen ayrışma durumunu ve noktalı çizgiler kısmi ayrışma durumunu göstermektedir. Ayrışmanın bulunduğu derinlikte ya da bu derinliğin altında birçok ayrışma bölgesinde modül değerlerindeki düşüş gözlenebilmektedir. Bu durum USW metodunun tamamen ayrılmış bölgelerin belirlenmesinde kullanımının mümkün olduğunun kanıtıdır. Dağılma eğrilerinin görünüşü bir miktar düşük kalitede elde edilmiştir, fakat bu durum ayrılmamış tabakada kısmi ayrılmış ara yüzeylerde görülen benzer durumundan kaynaklanmaktadır. Sıcak hava koşulları altında yapılan deneylerin sonuçlarında da,

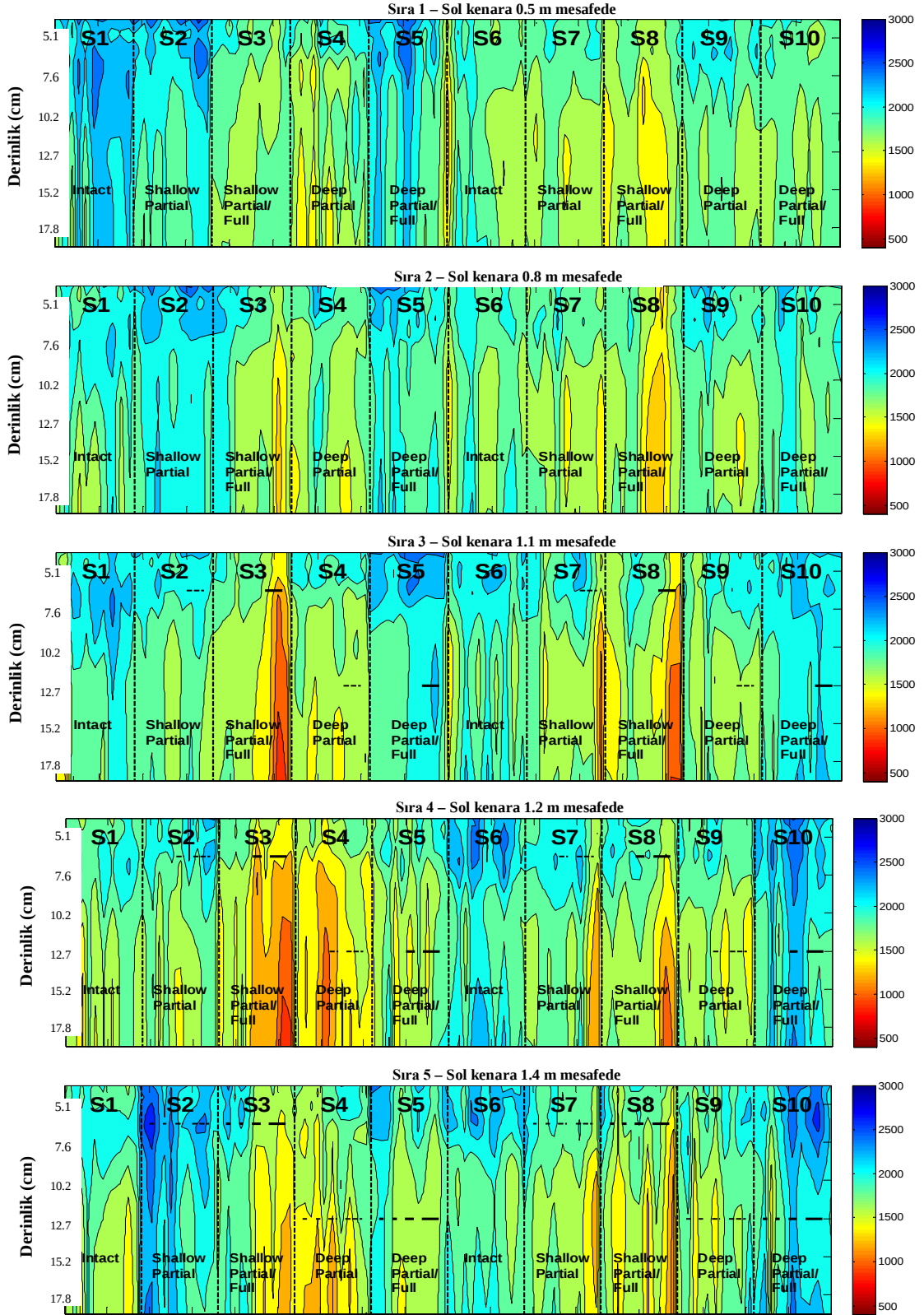
burada sunulan soğuk hava sonuçlarına benzer şekilde, ayrışma bölgeleri belirlenebilmektedir.



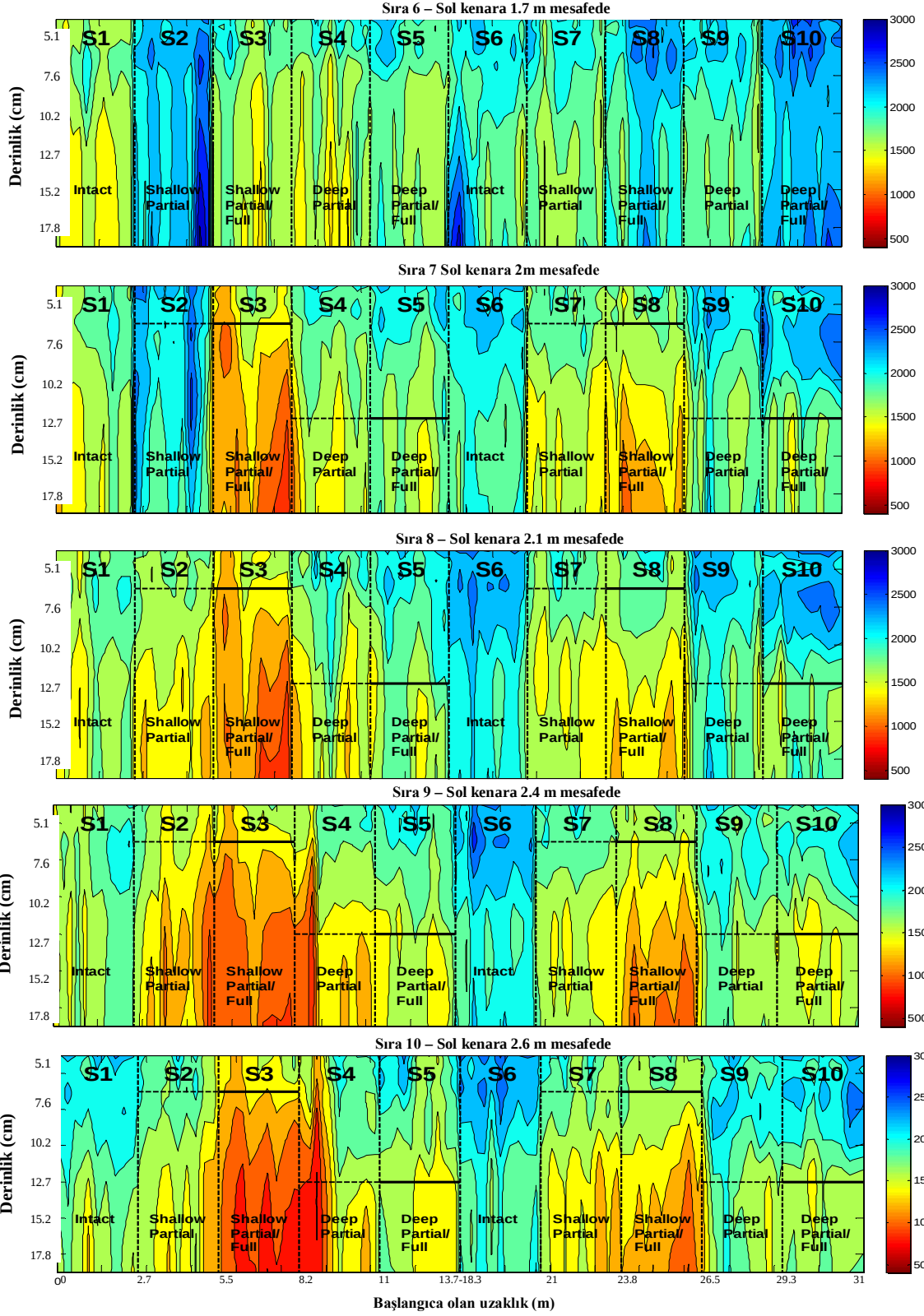
Şekil 4.22. Soğuk hava deneylerinden elde edilen 63 mm üst tabaka için modül grafiği

4.2.3. FWD deneyi

FWD deneyleri soğuk ve sıcak hava koşulları altında her bir kesit başına 25 nokta olacak şekilde iki farklı zamanda uygulanmıştır. Soğuk hava koşulları altında gerçekleştirilen deneyin on kesit boyunca defleksiyon değerleri Şekil 4.24’ te gösterilmektedir. Bu şekillerdeki renk kodları Çizelge 4.2’ de daha önce tanımlanmıştır. FWD ile hemen hemen bütün yüzeysel ileri ayrışma bölgeleri belirlenebilmiştir. Benzer şekilde yüzeysel kısmi ayrışma bölgelerinin çoğunda ayrışmanın varlığı gözlemlenmiştir. Ancak derin ayrışma bölgelerindeki defleksiyon değerleri intak bölgeleri ile oldukça benzer sonuçlar vermiştir. Sıcak hava koşulları altında gerçekleştirilen FWD sonuçları oldukça farklıdır (Şekil 4.25). Bir çok ayrışma bölgesi için bu metodun uygunluğu azalmıştır. Bununla birlikte 9 ve 10 kesitlerindeki belirginlik ön plana çıkmıştır.



Şekil 4.23. Dağılıma eğrisi (Soğuk hava koşulları altında)



Şekil 4.23 Devam. Dağılım eğrisi (Soğuk hava koşulları altında)

	S1, İntak					S2, Yüzeysel Kısmı					S3, Yüzeysel Kısmı/Tam					S4, Derin Kısmı					S5, Derin Kısmı/Tam					Geçiş Bölgesi			
	P1	P2	P3	P4	P5	P1	P2	P3	P4	P5	P1	P2	P3	P4	P5	P1	P2	P3	P4	P5	P1	P2	P3	P4	P5	P1	P2	P3	P4
Boş																													
Sıra 1	7.0	6.4	5.9	5.5	5.4	5.8	6.2	6.2	6.1	6.7	6.9	6.9	6.8	6.2	6.1	6.1	6.3	6.0	5.2	4.7	4.7	4.7	4.8	5.6	5.7	5.7	5.8	6.0	6.3
Sıra 2	7.3	6.6	5.8	5.6	5.6	5.5	5.7	6.0	6.2	6.0	5.8	6.1	7.4	6.9	7.0	6.3	6.5	7.0	5.8	4.8	4.6	4.9	5.2	6.4	6.0	5.8	5.9	8.0	8.1
Sıra 3	7.8	7.5	7.1	6.9	6.6	7.0	7.1	6.9	7.0	7.4	8.3	9.0	9.2	9.9	10.3	8.8	8.3	7.1	6.5	5.8	6.2	6.7	6.2	6.2	5.8	5.0	6.0	16.2	15.3
Sıra 4	9.6	9.5	8.5	8.4	8.1	8.6	8.9	7.9	8.2	9.7	9.7	11.1	10.3	9.9	11.9	9.6	9.0	7.5	7.1	6.5	7.1	7.8	6.6	7.0	6.9	6.2	6.9	16.7	15.1
Sıra 5	11.7	11.4	10.8	9.9	9.6	10.4	11.0	10.7	9.9	11.0	12.2	13.4	12.0	9.9	12.3	12.5	12.1	8.9	7.8	7.9	9.2	9.5	7.4	7.5	7.9	7.4	7.9	16.4	15.9
Boş																													

a) Kesitler 1 - 5

	S1, İntak				S2, Yüzeysel Kısmı					S3, Yüzeysel Kısmı/Tam					S4, Derin Kısmı					S5, Derin Kısmı/Tam					Geçiş Bölgesi				
	P5	P6	P7	P8	P1	P2	P3	P4	P5	P1	P2	P3	P4	P5	P1	P2	P3	P4	P5	P1	P2	P3	P4	P5	P1	P2	P3	P4	P5
Boş																													
Sıra 1	7.3	7.7	7.7	7.5	6.9	7.0	7.5	7.4	7.6	7.0	7.1	6.9	6.8	6.7	6.7	6.8	7.1	6.9	6.0	5.4	5.1	4.7	4.9	4.7	4.8	4.9	4.7	4.3	4.4
Sıra 2	6.7	7.5	6.7	6.6	6.7	6.9	7.2	6.9	7.5	7.4	7.3	7.4	7.7	7.4	6.9	7.0	7.2	8.0	7.3	5.8	5.8	5.1	5.3	5.2	5.1	4.8	4.6	4.3	4.2
Sıra 3	6.8	6.5	6.5	6.7	6.7	7.0	7.4	7.4	7.2	7.7	7.8	7.5	6.8	6.9	7.4	7.9	8.2	9.8	8.9	6.8	6.4	6.0	5.8	5.6	6.2	6.5	6.1	5.8	5.4
Sıra 4	8.0	7.6	7.6	8.0	8.3	9.1	9.2	8.8	8.4	8.8	8.6	8.3	7.8	7.9	8.5	8.5	8.5	9.9	9.9	6.9	7.2	6.8	6.4	8.2	6.9	7.6	8.5	9.3	8.9
Sıra 5	8.4	8.2	8.1	8.3	8.6	9.3	9.4	9.2	8.6	8.6	8.9	8.2	6.6	8.1	9.3	10.4	11.2	9.9	11.9	8.4	7.4	7.3	6.8	8.9	6.9	8.6	7.7	7.1	8.2
Boş																													

b) Kesitler 6 – 10

Şekil 4.24. Revize edilmiş istatistiksel kritere göre soğuk hava koşulları altında FWD defleksiyon verileri

FWD sonuçlarındaki yetersizliğin sıcaklıkla bağlantılı olduğu düşünülürse, USW metodu sonuçlarındaki uygulamaya benzer şekilde bir referans sıcaklığına göre düzeltme yapmanın uygun olduğu görülmektedir. Bu amaçla üstyapıda seçilen belirli noktalar üzerinde, farklı sıcaklıklarda ve dolayısıyla farklı zamanlarda FWD deneyi gerçekleştirilmiştir. 1 ve 6 kesitleri için elde edilen farklı sonuçlar 25 °C referans sıcaklığına göre normalize edilmiştir (Şekil 4.26). Defleksiyon değerlerini düzenlemek için kullanılan genel eşitlikler şu şekildedir;

$$D_{77^{\circ}F} = \frac{D_{T^{\circ}F}}{0.0062 \cdot T + 0.5018}, \text{ iri daneli yüzey karışımı} \quad (4.3)$$

$$D_{77^{\circ}F} = \frac{D_{T^{\circ}F}}{0.0073 \cdot T + 0.4127}, \text{ ince daneli yüzey karışımı} \quad (4.4)$$

	S1, İntak					S2, Yüzeysel Kısmı					S3, Yüzeysel Kısmı/Tam					S4, Derin Kısmı					S5, Derin Kısmı/Tam					Geçiş Bölgesi			
	P1	P2	P3	P4	P5	P1	P2	P3	P4	P5	P1	P2	P3	P4	P5	P1	P2	P3	P4	P5	P1	P2	P3	P4	P5	P1	P2	P3	P4
Boş																													
Sıra 1	10.8	11.3	10.5	#####	9.7	11.7	13.9	12.4	#####	11.9	10.9	12.7	13.7	#####	10.3	10.8	10.8	9.0	8.1	8.2	8.5	8.8	9.1	8.9	9.6	9.3	9.2	9.7	10.3
Sıra 2	11.2	11.4	10.7	#####	10.3	10.7	11.3	13.1	#####	12.4	10.8	11.3	12.9	#####	16.0	13.0	12.3	11.4	10.3	9.5	8.9	9.6	#####	#####	10.6	9.9	9.4	10.6	18.6
Sıra 3	9.9	10.0	9.6	8.8	8.7	9.2	10.2	10.3	#####	10.2	11.2	11.1	11.4	#####	13.5	12.5	9.9	9.3	9.0	8.3	7.7	9.2	9.6	9.1	8.4	7.6	7.2	8.7	17.7
Sıra 4	11.0	11.0	9.8	9.2	8.7	10.1	10.8	10.2	9.7	10.7	12.2	12.2	12.5	#####	16.1	14.6	11.3	9.6	11.1	10.9	9.5	10.8	9.5	9.6	8.3	6.7	6.3	10.0	14.8
Sıra 5	12.7	11.5	11.2	#####	9.8	10.0	11.1	10.5	#####	10.4	12.1	12.5	15.4	#####	15.7	16.4	12.3	10.3	10.2	10.9	9.9	10.5	9.9	6.7	6.3	6.8	6.3	7.5	16.8
Boş																													

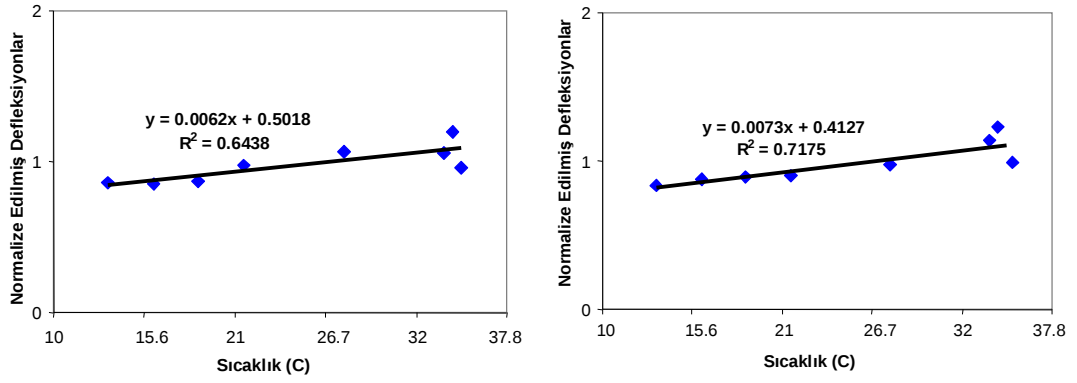
a) Kesitler 1 - 5

	S1, İntak				S2, Yüzeysel Kısmı					S3, Yüzeysel Kısmı/Tam					S4, Derin Kısmı					S5, Derin Kısmı/Tam					Geçiş Bölgesi				
	P5	P6	P7	P8	P1	P2	P3	P4	P5	P1	P2	P3	P4	P5	P1	P2	P3	P4	P5	P1	P2	P3	P4	P5	P1	P2	P3	P4	P5
Boş																													
Sıra 1	13.7	13.2	#####	12.7	9.7	9.2	10.8	#####	11.2	11.0	11.2	11.4	#####	9.8	10.3	10.7	10.5	9.6	9.4	10.2	10.1	7.6	7.1	7.2	9.2	10.4	9.9	8.9	8.5
Sıra 2	10.5	11.3	#####	10.6	9.8	9.2	9.9	#####	12.3	11.5	11.9	12.1	#####	11.6	10.2	10.5	10.1	#####	13.0	9.4	10.0	9.9	9.7	9.7	8.8	9.3	9.0	10.1	9.9
Sıra 3	16.7	9.4	9.8	9.3	8.7	8.6	8.4	9.5	9.9	10.5	10.1	10.1	9.3	8.6	9.0	8.2	8.6	9.7	9.6	8.0	8.2	8.2	8.2	7.9	8.1	9.0	8.9	9.6	9.6
Sıra 4	15.0	8.7	7.9	7.8	7.8	7.2	7.2	7.8	7.7	8.7	8.1	9.3	8.6	8.6	7.8	8.2	7.7	#####	12.4	8.6	9.5	6.1	8.5	10.1	9.6	10.8	9.9	11.3	10.5
Sıra 5	15.3	7.3	7.1	6.9	6.6	6.9	6.5	6.5	6.9	7.5	7.6	7.5	7.5	7.1	7.2	8.1	7.2	#####	13.8	8.9	10.9	11.0	11.3	11.4	12.1	11.0	11.8	14.3	13.5
Boş																													

b) Kesitler 6 – 10

Şekil 4.25. Revize edilmiş istatistiksel kritere göre sıcak hava koşulları altında FWD defleksiyon verileri

Burada D, defleksiyon ve T, FWD deneyinin uygulandığı andaki °F cinsinden sıcaklık derecesidir. Sıcaklığın değişmesiyle defleksiyondaki değişimin az olmasından dolayı bu eğrilerin eğimleri düze yakındır. FWD ile elde edilen defleksiyon değerlerinin büyük çoğunluğu taban zeminin deformasyonunu temsil ettiği düşünülürse sonuçların bu doğrultuda çıkmış olması zaten beklenmektedir.



a) Kaba karışım yüzey kaplaması

b) İnce karışım yüzey kaplaması

Şekil 4.26. FWD defleksiyonlarındaki zamanla değişim

Eşitlik 4.3 ve Eşitlik 4.4 ile referans sıcaklığa göre normalize edildikten sonra sıcak ve soğuk hava koşulları altında elde edilen sonuçlar Şekil 4.27 ve Şekil 4.28’ de verilmiştir. Bu model ile yapılan normalize işlemi ve bu işlemden önceki defleksiyon sonuçları oldukça benzerdir (Şekil 4.24 ve Şekil 4.25).

FWD defleksiyon verileri taban zemini modül değerinden etkilendiği için, bir sonraki adım ayrışma bölgelerine ait sıcak karışım asfalt modüllerindeki değişimin test edilmesidir. Sıcak karışım asfalt modül değerleri MODULUS 6.0 yazılımı kullanılarak geri hesaplanmıştır (Liu and Scullion, 2001). Geri hesaplama sürecinde belirsizliği minimuma indirmek için, taban zemini ve üzerindeki bütün tabakalar tek bir tabaka olarak göz önünde bulundurularak 2 tabakalı analiz yapılmıştır. Soğuk ve sıcak hava koşulları altında gerçekleştirilen deneylere ait sıcaklıkla normalize edilmemiş sonuçlar Şekil 4.29 ve Şekil 4.30’ da gösterilmiştir. Soğuk hava koşulları için modül değerleri intak bölgelerinde normal değerleri vermiş (Şekil 4.29) ve ayrışma bölgeleri gözle görülür bir hale gelmiştir. Bu olumlu sonuçlarını sıcak hava koşulları için geçerli olmadığı Şekil 4.30’ da görülmektedir.

	S1, İntak					S2, Yüzeysel Kısmı					S3, Yüzeysel Kısmı/Tam					S4, Derin Kısmı					S5, Derin Kısmı/Tam					Geçiş Bölgesi			
	P1	P2	P3	P4	P5	P1	P2	P3	P4	P5	P1	P2	P3	P4	P5	P1	P2	P3	P4	P5	P1	P2	P3	P4	P5	P1	P2	P3	P4
Boş																													
Sıra 1	7.3	6.6	6.1	5.8	5.6	6.1	6.5	6.4	6.4	7.0	7.4	7.5	7.3	6.7	6.5	6.8	7.0	6.6	5.7	5.2	5.1	5.1	5.2	6.1	6.2	6.2	6.3	6.5	6.9
Sıra 2	8.0	7.2	6.3	6.1	6.1	6.1	6.3	6.5	6.8	6.6	6.3	6.7	8.1	7.6	7.7	6.9	7.2	7.7	6.4	5.3	5.1	5.3	5.7	7.1	6.6	6.5	6.6	9.0	9.1
Sıra 3	9.1	8.8	8.3	8.1	7.8	8.2	8.3	8.1	8.2	8.6	9.7	10.6	10.7	10.0	12.1	10.3	9.7	8.3	7.6	6.9	7.3	7.9	7.3	7.3	6.9	6.2	7.3	19.9	18.8
Sıra 4	10.8	10.7	9.6	9.5	9.1	9.6	9.6	8.9	9.2	9.8	10.8	11.3	11.2	10.0	12.5	10.9	10.0	8.3	7.8	7.2	7.7	6.3	7.2	7.7	7.4	6.9	7.7	19.7	18.6
Sıra 5	13.7	13.4	12.7	12.0	11.2	12.0	12.6	12.8	10.0	12.7	14.0	15.3	15.0	10.0	15.3	15.0	11.0	8.8	8.1	6.8	9.3	9.5	9.5	8.9	9.0	8.7	9.4	19.5	18.3
Boş																													

a) Kesitler 1 - 5

	S1, İntak				S2, Yüzeysel Kısmı					S3, Yüzeysel Kısmı/Tam					S4, Derin Kısmı					S5, Derin Kısmı/Tam					Geçiş Bölgesi				
	P5	P6	P7	P8	P1	P2	P3	P4	P5	P1	P2	P3	P4	P5	P1	P2	P3	P4	P5	P1	P2	P3	P4	P5	P1	P2	P3	P4	P5
Boş																													
Sıra 1	8.0	8.4	8.4	9.2	7.4	7.5	8.0	8.0	8.1	7.4	7.5	7.3	7.2	7.1	7.0	7.2	7.5	7.3	6.4	5.6	5.3	4.8	5.1	4.9	5.0	5.1	4.8	4.5	4.6
Sıra 2	7.5	8.3	7.5	7.6	7.3	7.5	7.8	7.5	8.2	8.1	8.0	8.1	8.4	8.1	7.5	7.5	7.7	8.6	7.8	6.3	6.2	5.5	5.7	5.6	5.4	5.1	5.0	4.7	4.5
Sıra 3	8.3	8.0	8.0	8.2	8.1	8.5	9.0	9.0	8.8	9.3	9.4	9.1	8.3	8.4	8.9	9.5	9.8	10.0	10.7	8.2	7.7	7.1	6.9	6.7	7.4	7.7	7.2	6.9	6.4
Sıra 4	9.0	8.5	8.5	8.9	8.9	9.8	9.9	9.5	9.1	9.6	9.4	8.1	8.5	8.3	9.5	10.3	10.3	10.0	10.1	7.6	7.7	7.1	8.9	9.7	7.2	7.4	6.9	6.7	6.9
Sıra 5	9.9	9.7	9.6	9.8	10.5	11.4	11.4	11.2	10.4	10.4	10.7	10.0	9.7	9.8	10.2	10.5	10.5	10.0	10.0	10.1	9.0	8.9	8.2	7.9	9.2	9.6	6.3	8.5	7.4
Boş																													

b) Kesitler 6 – 10

Şekil 4.27. Soğuk hava koşullarında FWD defleksiyon değerlerinin sıcaklığa göre düzenlenmesi

1 ve 6 Kesitleri için 25 °C referans sıcaklığına göre normalize edilmiş modül değerleri Şekil 4.31’ de verilmiştir. Modül değerini düzenlemek için kullanılan formül;

$$E_{77^{\circ}F} = \frac{E_{T^{\circ}F}}{-1.8144 \cdot \ln(T) + 8.8812}, \text{ iri daneli yüzey karışımı} \quad (4.5)$$

$$E_{77^{\circ}F} = \frac{E_{T^{\circ}F}}{-1.8218 \cdot \ln(T) + 8.9098}, \text{ ince daneli yüzey karışımı} \quad (4.6)$$

	S1, İntak					S2, Yüzeysel Kısmı					S3, Yüzeysel Kısmı/Tam					S4, Derin Kısmı					S5, Derin Kısmı/Tam					Geçiş Bölgesi			
	P1	P2	P3	P4	P5	P1	P2	P3	P4	P5	P1	P2	P3	P4	P5	P1	P2	P3	P4	P5	P1	P2	P3	P4	P5	P1	P2	P3	P4
Boş																													
Sıra 1	9.0	9.4	8.7	8.3	8.0	10.1	12.0	10.7	#####	10.2	9.3	10.9	11.8	9.0	8.9	9.5	9.5	7.9	7.1	7.2	7.6	7.9	8.1	8.0	8.6	8.1	8.0	8.4	9.0
Sıra 2	8.9	9.0	8.5	8.0	8.2	8.5	9.0	10.4	9.5	9.9	8.9	9.3	10.6	#####	13.1	10.9	10.3	9.6	8.6	7.9	7.4	8.0	9.0	8.6	8.8	8.2	7.8	8.8	15.5
Sıra 3	8.3	8.5	8.1	7.4	7.4	7.7	8.5	8.6	8.4	8.5	9.6	9.6	9.9	#####	11.7	10.8	8.6	8.1	7.8	7.2	6.7	8.1	8.5	7.9	7.3	6.4	6.1	7.4	15.0
Sıra 4	10.0	10.0	8.9	8.3	7.8	9.0	9.8	8.1	8.7	8.8	11.1	11.1	11.4	#####	11.0	10.5	10.4	8.0	#####	10.0	9.7	9.6	8.7	8.8	8.5	6.2	5.7	9.1	13.4
Sıra 5	11.9	10.7	10.4	9.9	9.1	9.3	10.3	9.6	9.9	9.7	11.1	12.3	12.3	#####	15.3	15.3	13.5	10.0	9.6	10.1	8.4	9.7	8.4	9.2	7.9	6.3	5.9	7.9	15.0
Boş																													

a) Kesitler 1 - 5

	S1, İntak				S2, Yüzeysel Kısmı					S3, Yüzeysel Kısmı/Tam					S4, Derin Kısmı					S5, Derin Kısmı/Tam					Geçiş Bölgesi				
	P5	P6	P7	P8	P1	P2	P3	P4	P5	P1	P2	P3	P4	P5	P1	P2	P3	P4	P5	P1	P2	P3	P4	P5	P1	P2	P3	P4	P5
Boş																													
Sıra 1	11.7	11.2	#####	10.9	8.6	8.2	9.6	9.9	10.0	10.1	10.3	10.5	9.5	9.0	9.0	9.4	9.2	8.4	8.2	9.0	8.9	6.7	6.3	6.4	8.1	9.1	8.6	7.8	7.4
Sıra 2	13.2	8.1	9.5	8.5	8.1	7.6	8.1	8.7	10.1	9.3	9.6	9.8	9.2	9.3	8.2	8.4	8.1	9.0	10.5	7.4	7.9	7.8	7.6	7.7	6.9	7.3	7.1	7.9	7.8
Sıra 3	13.7	7.7	8.1	7.7	7.4	7.3	7.1	8.0	8.4	8.8	8.5	8.5	7.9	7.2	7.6	7.0	7.3	8.3	8.2	6.3	6.5	6.5	6.5	6.3	6.5	7.2	7.2	7.7	7.7
Sıra 4	13.6	7.8	7.2	7.0	7.0	6.5	6.5	7.1	7.0	8.1	8.5	8.7	8.1	8.3	7.1	7.4	6.6	#####	11.0	7.8	7.5	7.2	8.3	8.9	9.6	9.5	8.9	9.9	9.9
Sıra 5	14.0	6.7	6.5	6.3	6.1	6.5	6.1	6.1	6.4	7.5	7.6	7.5	7.5	7.2	7.1	8.0	7.1	#####	13.5	9.5	10.1	10.9	#####	11.9	11.3	10.4	12.4	12.3	13.7
Boş																													

b) Kesitler 6 - 10

Şekil 4.28. Sıcak hava koşullarında FWD defleksiyon değerlerinin sıcaklığa göre düzenlenmesi

Sıcaklığa göre normalize edilmiş modül değerleri Şekil 4.32 ve Şekil 4.33’ te gösterilmiştir. Normalizasyon işleminin etkisiyle ayrışma bölgelerinin bir miktar daha belirgin hale geldiği görülmektedir. Bununla birlikte özellikle sıcak hava koşullarındaki modül değerlerindeki yanlış okumaların sayısı artmıştır.

	S1, İntak					S2, Yüzeysel Kısmı					S3, Yüzeysel Kısmı/Tam					S4, Derin Kısmı					S5, Derin Kısmı/Tam					Geçiş Bölgesi			
	P1	P2	P3	P4	P5	P1	P2	P3	P4	P5	P1	P2	P3	P4	P5	P1	P2	P3	P4	P5	P1	P2	P3	P4	P5	P1	P2	P3	P4
Boş																													
Sıra 1	1.709	1.847	2.644	2.492	3.000	2.786	2.007	2.235	2.597	2.211	1.872	1.798	1.836	2.072	2.494	2.089	2.032	2.098	1.547	3.000	1.395	1.871	3.000	2.214	2.585	2.358	2.714	2.168	1.952
Sıra 2	1.967	2.445	2.062	2.319	2.491	2.469	2.628	1.628	880	2.303	2.981	2.893	356	1.259	586	2.465	2.096	1.301	671	1.332	1.474	1.390	3.013	420	1.184	2.818	2.626	1.122	904
Sıra 3	2.170	2.212	2.059	2.283	2.401	2.420	1.892	2.018	2.610	2.273	1.365	1.140	1.070	752	178	1.325	1.515	2.235	2.532	2.921	1.886	927	1.683	795	3.586	988	2.518	89	58
Sıra 4	1.579	1.579	1.495	1.486	2.063	2.171	1.622	1.635	2.096	1.830	1.307	853	730	577	864	961	1.157	1.901	1.806	2.387	1.542	713	1.769	1.458	564	2.159	2.086	79	58
Sıra 5	1.383	1.397	1.405	1.337	2.083	1.519	1.211	1.327	1.208	1.065	984	545	600	502	852	312	589	1.328	1.627	1.704	1.165	815	1.438	1.730	1.415	2.213	1.642	113	100
Boş																													

a) Kesitler 1 - 5

	S1, İntak				S2, Yüzeysel Kısmı					S3, Yüzeysel Kısmı/Tam					S4, Derin Kısmı					S5, Derin Kısmı/Tam					Geçiş Bölgesi				
	P5	P6	P7	P8	P1	P2	P3	P4	P5	P1	P2	P3	P4	P5	P1	P2	P3	P4	P5	P1	P2	P3	P4	P5	P1	P2	P3	P4	P5
Boş																													
Sıra 1	1.292	1.133	1.184	1.250	2.013	1.931	1.664	1.542	1.400	1.655	1.460	1.623	1.596	1.801	1.826	1.730	1.329	1.380	1.839	2.141	2.291	2.066	1.655	2.277	2.037	1.240	839	1.383	=====
Sıra 2	1.676	656	1.944	1.951	2.174	2.210	1.945	1.596	1.590	1.555	1.513	1.496	1.245	1.423	1.744	1.778	1.467	751	1.130	1.790	1.603	2.178	829	1.065	1.031	811	850	3.000	=====
Sıra 3	1.840	2.145	2.234	2.266	2.435	2.113	2.019	1.909	1.818	1.885	1.523	1.563	2.179	2.100	1.559	1.353	1.124	535	517	1.581	1.748	2.126	2.086	2.068	1.413	913	953	603	910
Sıra 4	1.313	1.607	1.746	1.801	1.427	1.221	1.155	1.273	1.337	1.103	1.140	1.264	1.375	1.294	685	781	708	335	454	1.297	1.230	1.519	1.696	1.629	938	979	991	681	782
Sıra 5	1.372	1.503	1.610	1.550	1.488	1.173	1.203	1.232	1.362	1.352	1.364	1.580	1.555	1.400	907	785	465	359	236	930	1.036	1.007	1.229	1.962	1.348	833	838	313	498
Boş																													

b) Kesitler 6 – 10

Şekil 4.29. Soğuk hava koşullarında FWD modül değerlerinin revize edilmiş istatistiksel analizi

FWD deney aleti kullanılarak yapılan bu çalışmanın sonucunda, yüzeysel aşırı ayrışma bölgelerinin ve çok kesin olmamakla birlikte kısmi ayrışma bölgelerinin belirlenmesinde kullanılabilir olduğu görülmüştür. USW metodunda olduğu gibi FWD deneyi de özellikle soğuk hava koşullarında daha uygun sonuçlar vermiştir.

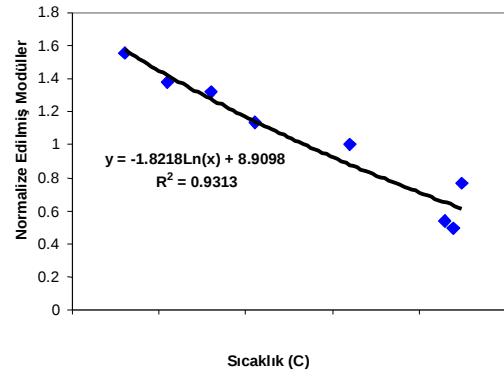
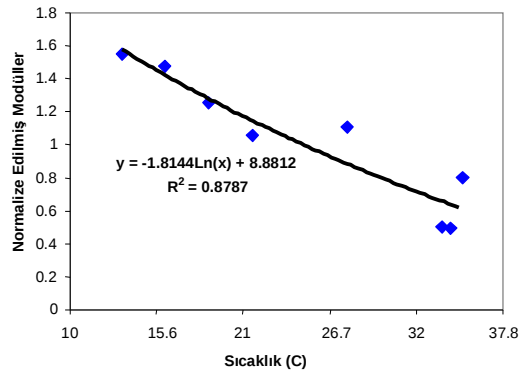
	S1, İntak					S2, Yüzeysel Kısmı					S3, Yüzeysel Kısmı/Tam					S4, Derin Kısmı					S5, Derin Kısmı/Tam					Geçiş Bölgesi			
	P1	P2	P3	P4	P5	P1	P2	P3	P4	P5	P1	P2	P3	P4	P5	P1	P2	P3	P4	P5	P1	P2	P3	P4	P5	P1	P2	P3	P4
Boş																													
Sıra 1	277	215	251	323	300	193	99	144	189	167	206	153	110	245	267	215	184	287	414	414	345	343	280	292	247	280	375	323	292
Sıra 2	282	272	308	327	277	357	311	174	204	191	302	272	148	140	73	147	155	215	314	356	442	344	207	210	191	267	369	234	40
Sıra 3	519	518	584	573	460	715	506	476	531	486	354	355	305	171	214	259	405	619	569	665	893	455	392	434	522	555	683	454	43
Sıra 4	594	542	717	904	991	900	489	636	967	495	297	256	270	114	127	200	405	708	610	407	452	289	438	385	281	287	393	341	83
Sıra 5	624	760	787	879	1.083	625	939	944	758	629	345	356	290	222	168	159	297	730	1498	630	468	694	485	949	257	294	398	700	63
Boş																													

a) Kesitler 1 - 5

S1, İntak				S2, Yüzeysel Kısmı					S3, Yüzeysel Kısmı/Tam					S4, Derin Kısmı					S5, Derin Kısmı/Tam					Geçiş Bölgesi					
P5	P6	P7	P8	P1	P2	P3	P4	P5	P1	P2	P3	P4	P5	P1	P2	P3	P4	P5	P1	P2	P3	P4	P5	P1	P2	P3	P4	P5	
																													Boş
89	93	128	123	304	386	240	213	198	228	186	183	286	301	209	194	192	281	314	200	210	413	186	397	241	208	93	342	376	Sıra 1
37	198	158	231	334	426	379	317	201	265	204	150	186	196	303	229	246	157	58	294	230	217	271	107	490	401	302	328	194	Sıra 2
37	375	332	385	513	562	649	497	424	397	419	350	421	505	441	536	442	325	328	630	566	604	694	752	738	598	575	494	471	Sıra 3
50	567	646	684	709	616	805	812	927	581	570	472	531	441	504	337	596	173	116	558	612	783	437	389	582	890	507	319	375	Sıra 4
50	775	423	544	841	345	527	764	343	1.007	945	861	900	873	940	180	521	132	120	613	431	371	535	930	209	228	218	154	178	Sıra 5
																													Boş

b) Kesitler 6 – 10

Şekil 4.30. Sıcak hava koşullarında FWD modül değerlerinin revize edilmiş istatistiksel analizi



a) Kaba karışım yüzey kaplaması

b) İnce karışım yüzey kaplaması

Şekil 4.31. FWD modül değerlerine sıcaklığın etkisi

	S1, İntak					S2, Yüzeysel Kısmı					S3, Yüzeysel Kısmı/Tam					S4, Derin Kısmı					S5, Derin Kısmı/Tam					Geçiş Bölgesi			
	P1	P2	P3	P4	P5	P1	P2	P3	P4	P5	P1	P2	P3	P4	P5	P1	P2	P3	P4	P5	P1	P2	P3	P4	P5	P1	P2	P3	P4
Boş																													
Sıra 1	1.611	1.681	2.407	2.269	2.731	2.480	1.787	1.989	2.312	1.968	1.525	1.465	1.496	1.688	2.032	1.563	1.520	1.569	1.157	2.244	1.137	1.525	2.445	1.805	2.106	1.964	2.261	1.806	1.626
Sıra 2	1.535	1.908	1.609	1.810	1.944	1.886	2.161	1.244	672	1.760	2.277	2.210	272	962	448	1.844	1.568	973	502	996	1.126	1.062	2.302	321	905	2.200	2.050	876	706
Sıra 3	1.374	1.401	1.303	1.446	1.521	1.532	1.198	1.278	1.653	1.439	864	722	677	476	113	822	940	1.387	1.571	1.812	1.170	575	1.044	493	2.225	613	1.562	55	36
Sıra 4	1.109	1.109	1.050	1.043	1.449	1.596	1.164	1.177	1.504	1.313	957	843	525	111	478	701	823	1.516	1.365	1.756	1.264	854	1.268	1.198	441	1.685	1.628	62	46
Sıra 5	876	885	947	947	1.319	1.002	799	876	856	703	858	354	122	301	864	131	301	1.007	1.074	1.193	785	347	974	1.166	954	1.491	1.106	78	67
Boş																													

a) Kesitler 1 - 5

	S1, İntak				S2, Yüzeysel Kısmı					S3, Yüzeysel Kısmı/Tam					S4, Derin Kısmı					S5, Derin Kısmı/Tam					Geçiş Bölgesi				
	P5	P6	P7	P8	P1	P2	P3	P4	P5	P1	P2	P3	P4	P5	P1	P2	P3	P4	P5	P1	P2	P3	P4	P5	P1	P2	P3	P4	P5
Boş																													
Sıra 1	1.081	948	991	1.046	1.761	1.689	1.455	1.348	1.224	1.514	1.337	1.485	1.461	1.649	1.671	1.583	1.216	1.263	1.683	2.101	2.248	2.027	1.624	2.234	1.953	1.188	804	1.325	1.300
Sıra 2	1.313	514	1.444	1.529	1.819	1.849	1.627	1.335	1.330	1.272	1.239	1.225	1.019	1.165	1.525	1.555	1.283	657	989	1.565	1.403	1.905	725	931	902	709	743	2.628	1.498
Sıra 3	1.144	1.333	1.389	1.409	1.546	1.341	1.281	1.211	1.027	1.203	967	992	1.383	1.333	1.031	895	744	354	342	1.046	1.156	1.406	1.380	1.368	995	610	644	407	615
Sıra 4	1.028	1.259	1.368	1.255	1.220	1.044	988	1.089	1.144	923	884	1.074	1.232	1.046	900	643	641	264	422	1.143	1.101	1.158	1.127	1.278	899	896	907	949	870
Sıra 5	927	1.015	1.087	1.047	932	744	763	782	877	978	707	1.004	1.075	907	808	457	912	211	141	603	774	652	796	1.011	984	581	636	210	223
Boş																													

b) Kesitler 6 - 10

Şekil 4.32. Soğuk hava koşullarında FWD modül değerlerinin revize edilmiş istatistiksel analizi

	S1, İntak					S2, Yüzeysel Kısmı					S3, Yüzeysel Kısmı/Tam					S4, Derin Kısmı					S5, Derin Kısmı/Tam					Geçiş Bölgesi			
	P1	P2	P3	P4	P5	P1	P2	P3	P4	P5	P1	P2	P3	P4	P5	P1	P2	P3	P4	P5	P1	P2	P3	P4	P5	P1	P2	P3	P4
Boş																													
Sıra 1	907	702	822	1.057	1.178	458	235	341	447	395	509	377	273	606	708	453	338	606	874	874	654	650	530	553	468	615	821	708	639
Sıra 2	1.692	1.632	1.850	1.960	1.059	2.140	1.866	1.045	1.224	1.146	1.104	994	539	510	207	456	483	606	976	1.105	1.372	1.069	644	652	593	873	1.208	705	131
Sıra 3	1.463	1.461	1.646	1.615	1.297	2.222	1.573	1.478	1.650	1.510	840	842	723	405	508	590	1.059	1.409	1.297	1.516	1.885	960	828	916	1.101	1.566	1.927	1.279	120
Sıra 4	1.019	929	1.230	1.551	1.700	1.216	985	1.169	1.277	904	477	452	449	198	211	512	640	1.107	641	630	751	480	708	636	471	463	633	549	134
Sıra 5	920	1.119	1.160	1.295	1.596	1.362	937	949	1.077	923	410	400	402	277	252	173	583	606	784	647	872	549	648	649	312	446	585	1.153	96
Boş																													

a) Kesitler 1 - 5

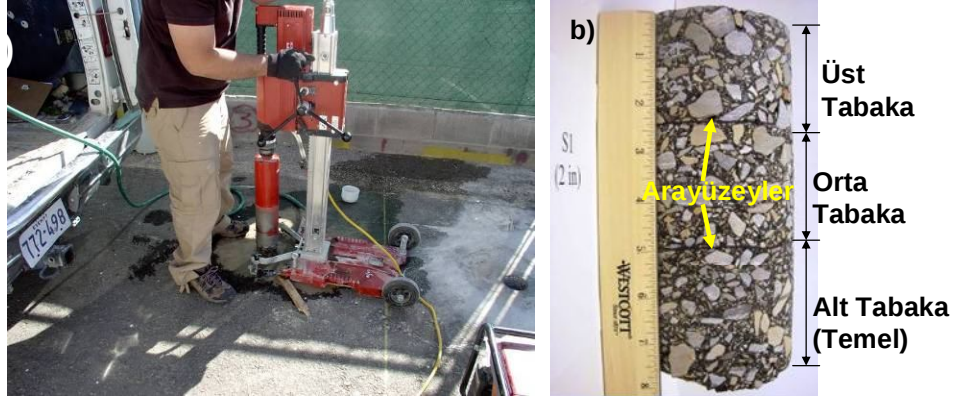
	S1, İntak				S2, Yüzeysel Kısmı					S3, Yüzeysel Kısmı/Tam					S4, Derin Kısmı					S5, Derin Kısmı/Tam					Geçiş Bölgesi				
	P5	P6	P7	P8	P1	P2	P3	P4	P5	P1	P2	P3	P4	P5	P1	P2	P3	P4	P5	P1	P2	P3	P4	P5	P1	P2	P3	P4	P5
Boş																													
Sıra 1	199	207	286	274	529	671	417	371	345	339	277	273	426	449	403	373	369	540	604	372	391	768	346	739	463	401	179	659	723
Sıra 2	126	667	533	778	967	1.233	1.098	919	582	893	689	505	627	661	1.079	815	877	559	205	1.259	988	929	1.160	459	2.253	1.844	1.389	1.506	891
Sıra 3	108	1.085	961	1.114	1.193	1.305	1.508	1.154	985	961	1.015	847	1.020	1.223	1.026	1.245	1.028	755	763	2.533	2.276	2.428	2.789	3.021	2.633	2.132	2.049	1.760	888
Sıra 4	81	925	1.054	1.116	1.157	1.005	1.313	1.326	1.512	790	802	863	747	920	911	535	898	901	703	1.034	1.138	1.363	913	723	838	752	1.015	613	752
Sıra 5	77	1.189	650	836	1.183	485	742	1.075	483	1.059	1.021	1.039	571	918	913	335	842	151	131	838	531	465	408	413	377	321	306	215	297
Boş																													

b) Kesitler 6 - 10

Şekil 4.33. Sıcak hava koşullarında FWD modül değerlerinin revize edilmiş istatistiksel analizi

4.3. Alınan Karot Numunelerinin Sonuçları

Küçük ölçekli yol çalışmasında, Şekil 4.1' de gösterilmiş olduğu gibi her bir kesitten iki farklı karot numunesi alınmıştır. Karot numunelerinin konumları her bir kesitin sağ tarafından 0.75 m içeride ve her bir kesitin başlangıcından 0.6 m ile 2.1 m ilerisindedir. Karot numuneleri tabakalar arasındaki tamamen ayrışma ve kısmi ayrışma durumunu temsil eden malzemelerin arazideki durumunu değerlendirmek için alınmıştır. Elmas uçlu olan karot alma aleti ile 100 mm çapında numuneler alınmıştır (Şekil 4.34). Karot numunesi alınırken mümkün olduğunca az miktarda su kullanılmasına özen gösterilmiştir.



Şekil 4.34. Küçük ölçekli yol çalışmasında karot numunesinin alınması

Laboratuarda hazırlanıp kesme deneyine tabi tutulan numuneler üzerinde uygulanan benzer deney prosedürü, alınan karot numuneleri üzerinde de uygulanmıştır. Her bir kesitin başlangıcının 0.6 m ile 2.1 m ilerisinden alınan karot numuneleri üzerinde uygulanan kesme deneyi sonuçları Çizelge 4.4 ve Çizelge 4.5’ te ayrıntılı bir şekilde verilmiştir.

Çizelge 4.4. Başlangıç noktasından 0.6 m ileride alınan karot numunelerinin kesme gerilmesi sonuçları (psi)

Kesit No	63 mm derinlikteki arayüzey			126 mm derinlikteki arayüzey		
	Astar tabakası	Gres	Talk Pudrası	Astar tabakası	Gres	Talk Pudrası
1	42 ^a			86 ^a		
2		32 ^a		88 ^a		
3			0 ^{a,c}	94 ^a		
4	82 ^a				25 ^a	
5	71 ^a					0 ^{a,c}
6	84 ^b			90 ^a		
7		50 ^b		63 ^a		
8			0 ^{b,c}	96 ^a		
9	95 ^b				21 ^a	
10	91 ^b					0 ^{a,c}
Ortalama	78	41	0	86	23	0
Varyasyon Kat., %	24.8	32.3	--	13.9	14.1	--

^a P403/P401 Arayüzeyi

^b P401/P401 Arayüzeyi

^c Kesme deneyi için uygun olmayan numuneler

Çizelge 4.5. Başlangıç noktasından 2.1 m ileride alınan karot numunelerinin kesme gerilmesi sonuçları (psi)

Kesit No	63 mm derinlikteki arayüzey			126 mm derinlikteki arayüzey		
	Astar tabakası	Kil	Motor yağlı kağıt	Astar tabakası	Kil	Motor yağlı kağıt
1	74 ^a			78 ^a		
2		0 ^{a,c}		86 ^a		
3			0 ^{a,c}	76 ^a		
4	88 ^a				0 ^{a,c}	
5	75 ^a					0 ^{a,c}
6	97 ^b			93 ^a		
7		30 ^a		78 ^a		
8			0 ^{b,c}	84 ^a		
9	88 ^b				0 ^{b,c}	
10	97 ^b					0 ^{b,c}
Ortalama	87	30	0	83	0	0
Varyasyon Kat., %	11.7	141.4	--	7.8	--	--

^a P403/P401 Arayüzeyi

^b P401/P401 Arayüzeyi

^c Kesme deneyi için uygun olmayan numuneler

Bu sonuçlar doğrultusunda, farklı tabaka arayüzeyleri arasındaki kesme gerilmeleri Çizelge 4.6' da özetlenmiştir. Laboratuarda hazırlanan numunelerden elde edilen kesme deneyi sonuçlarına benzer olarak en yüksek kesme gerilmesi değerini astar tabakası vermiştir. Ara yüzey malzemesi gres yağı olan dört numuneye ait ortalama kesme gerilmesi değerleri, astar tabakasının yaklaşık %40' ına tekabül etmektedir. Bununla birlikte, tek bir killi numune haricinde diğer numuneler, karot alma işlemi sırasında ayrıştırma malzemesinin bulunduğu tabaka arayüzey kısmından ayrılmışlardır, dolayısıyla kesme deneyine tabi tutulamamışlardır. Tabakalar arasındaki bu kopmanın sebebi ayrıştırma malzemelerinin etkisidir. Aynı zamanda karot alma işlemi sırasında uygulanan suyun kil ve talk pudrasını eritmesi ve yağlı kağıdın yumuşamasına sebep olması dolayısıyla karot numuneleri alınırken numunelerin iki tabaka halinde ayrık olarak elde edilmiş olması da muhtemeldir. Küçük ölçekli olarak inşa edilmiş olan üstyapının belirli kesitlerinden alınan karot numunelerinden elde edilen kesme deneyi sonuçları, ilk aşamada benzer ayrıştırma malzemeleri ile laboratuarda hazırlanmış olan numunelerden elde edilen kesme deneyi sonuçlarına göre yaklaşık iki katı civarında yüksek değerler vermiştir. Benzer ayrıştırma malzemeleri kullanılarak biri laboratuarda üretilmiş bir diğeri araziden

alınmış numuneler arasında ki kesme değerlerindeki farklılık sıkıştırma yöntemlerindeki farklılıktan kaynaklanmaktadır.

Çizelge 4.6. Karot numunelerinin kesme deneyi sonuçları

	6 cm derinlikteki arayüzey					12 cm derinlikteki arayüzey				
	Astar tabakası	Talk Pudrası	Kil	Gres	Motor yağlı kağıt	Astar tabakası	Talk Pudrası	Kil	Gres	Motor yağlı kağıt
Ortalama	82	Yok	30	41	Yok	84	Yok	Yok	23	Yok
Varyasyon Kat.	17%	--	--	32%	--	36%	--	--	14%	--

5. SONUÇLAR

İki farklı tahribatsız deney metodunun, tabakalar arasındaki ayrışmanın varlığını ve durumunu belirlemekteki başarısını kanıtlamak için her bir metodun güvenilirliği, tekrarlanabilirliği, belirlenebilirlik aralığı, veri toplama hızları, veri analiz hızları ve veri analiz süreçleri gibi teknik ve pratik özelliklerinin değerlendirilmesi gerekmektedir. Her bir özellik, belirli bir değer atama yoluyla ve bu atanan değerlerin ağırlıklı ortalamaları ile değerlendirilmiştir. Ağırlıklı ortalama değerleri, her bir metodun tabakalar arasındaki ayrışma problemini belirleyebilme başarısının derecesini vermektedir.

5.1. Güvenilirlik

Tahribatsız deney metodlarının güvenilirliği, her bir kesitteki ayrışma derecesi ile uygulanan metodların bu ayrışma derecesine verdiği tepki arasında var olan korelasyon ilişkisi ile değerlendirilmiştir. Her bir metodun güvenilirliğini tayin etmek için Çizelge 5.1’ de verilen kriterler kullanılmıştır. Başarı derecesi, verilen üç farklı seviyedeki ayrışma durumuna karşılık doğru değer elde edilme yüzdesi olarak değerlendirilmiştir. Bu durum Çizelge 5.2’ de ince daneli yüzey kaplaması için (6 ve 10 Kesitleri arasında) FWD modül değerlerinden bir örnek ile açıklanmıştır.

Çizelge 5.1. Güvenilirliğin değerlendirme kriteri

Aletlerle belirlenen durum	Sıralama için Atanan Değerler								
	İntak			Tamamen Ayrışmış			Kısmen Ayrışmış		
	Yeşil ^a	Sarı ^b	Kırmızı ^c	Yeşil ^a	Sarı ^b	Kırmızı ^c	Yeşil ^a	Sarı ^b	Kırmızı ^c
İntak	1	0	0	--	--	--	--	--	--
Tamamen Ayrışmış	--	--	--	0	0.5	1	--	--	--
Kısmi Ayrışmış	--	--	--	--	--	--	0	1	1

a- (ortalama-1/2 standart sapma) değerinden büyük

b- (ortalama-1/2 standart sapma) ile (ortalama+1 standart sapma) değerleri arasında

c- (ortalama-1 standart sapma) değerinden küçük

Çizelge 5.2. Kriterleri açıklayan bir örnek

	Sıra 1	Sıra 2	Sıra 3	Sıra 4	Sıra 5
Kesit 8 Nokta 3 (Yüzeysel- Tüm Ayırışma)	1,583	1,555	895	643	457
İnce Daneli Yüzey Kaplaması için (6-10 Kesitleri Arası)	Ortalama Modül		1101	Standart Sapma	465
Değerlendirme	(ortalama-1/2 standart sapma) değerinden büyük (ortalama-1/2 standart sapma) ile (ortalama-1 standart sapma) değerleri arasında (ortalama-1 standart sapma) değerinden küçük				
ortalama-1/2 standart sapma = 868 ortalama-1 standart sapma = 636					
Beklenen	İntak	İntak	İntak	Tüm Ayırışma	Tüm Ayırışma
Sonuç	1	1	1	0.5	1

Bir sonraki aşamada, PSPA ve FWD için yukarıda açıklandığı şekilde elde edilen değerler her bir ayırışma kategorisine göre ortalamalarının o kategorideki nokta sayısına bölünmesiyle ayırışma durumunun başarı yüzdeleri elde edilmiştir. Örneğin soğuk hava koşulları altında gerçekleştirilmiş olan FWD defleksiyon testi göz önüne alınırsa, kısmi ayırışmanın başarı derecesi %67 ve tamamen ayırışmanın başarı derecesi ise %50' dir. Yukarıda tanımlanan kritere göre belirlenen sismik ve defleksiyon metotlarının başarı dereceleri Çizelge 5.3' te gösterilmiştir. Sismik metot ile intak bölgelerde %80 in üzerinde doğruluğa ulaşıldığı çizelgeden de görülmektedir.

Bu sonuçlar esas alınarak, farklı ayırışma tiplerinin belirlenmesinde tahribatsız metotların başarı derecesi Çizelge 5.4' teki kriter kullanılarak ve 0 ile 5 arasında değerler verilerek belirlenmiştir. Farklı deney sıcaklıkları için metotların genel sıralamaları her bir ayırışma kategorisi için sıralamaların ağırlıklı ortalaması göz önünde bulundurularak elde edilmiştir (Çizelge 5.3).

Tamamen ayırışmış bölgelerin belirlenmesi en kritik durum olduğu için, ayırışma durumu için ağırlık faktörü sıralaması 5 olarak atanmıştır, intak bölgeler için ağırlık faktörü sıralaması 1 ve kısmi ayırışma bölgeleri için sıralama değeri 3 olarak atanmıştır. Bu sıralama değerleri göz önünde bulundurulduğunda her iki tahribatsız metodun soğuk hava koşulları altında çok daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

Çizelge 5.3. Tabakalar arasındaki ayrışmanın belirlenmesinde sismik metodun olasılık değeri

Deney aleti/ Analiz Metodu	Deney süreci	Ayrışma Derecesi	Başarı Durumu	Ayrışma Derece Sıralaması	Deney Teknolojisinin Genel Sıralaması
PSPA/ USW	Soğuk	İntak	%86	5	3
		Tamamen Ayrışmış	%60	3	
		Kısmen Ayrışmış	%55	3	
	Sıcak	İntak	%82	5	
		Tamamen Ayrışmış	%60	3	
		Kısmen Ayrışmış	%37	1	
FWD/ Deflksiyon	Soğuk	İntak	%89	5	3
		Tamamen Ayrışmış	%49	3	
		Kısmen Ayrışmış	%67	3	
	Sıcak	İntak	%82	5	
		Tamamen Ayrışmış	%52	3	
		Kısmen Ayrışmış	%44	1	
FWD/ Modül	Soğuk	İntak	%87	5	2
		Tamamen Ayrışmış	%70	3	
		Kısmen Ayrışmış	%33	1	
	Sıcak	İntak	%61	3	
		Tamamen Ayrışmış	%54	3	
		Kısmen Ayrışmış	%28	0	

Çizelge 5.4. Metodun doğruluğu için sıralama kriteri

Belirlenme Olasılığı		Sıralama
Minimum	Maksimum	
70	100	5
50	70	3
35	50	1
0	35	0

5.2. Tekrarlanabilirlik

Her bir tahribatsız deney prosedürü nokta başına üç kere tekrarlanmaktadır. Böylelikle farklı prosedürlerin tekrarlanabilirlikleri sayısallaştırılabilir. Her bir metodun başarı yüzdesi, bir noktada tekrarlanan deneylerden elde edilen üç farklı değer in benzer sonuç verip vermemesine yani varyasyon katsayılarına bağlı olarak PSPA ve FWD’ nin tekrarlanabilirliklerine göre elde edilmiştir.. Deney metodunun tekrarlanabilirlik sonuçları sıcak ve soğuk hava koşulları için Çizelge 5.5’ te özetlenmiştir.

Çizelge 5.5. Metodun tekrarlanabilirliği

NDT Aleti	Hava koşulları		İri Daneli Yüzey Karışımında					İnce Daneli Yüzey Karışımında					Sıralama
			S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	
PSPA (Modül)	Soğuk	Var.Kat.	9.8%	9.4%	8.6%	9.6%	8.7%	9.8%	8.9%	8.6%	8.2%	9.0%	3
		Ortalama	9.2%					8.9%					
	Sıcak	Var.Kat.	6.8%	7.0%	8.6%	8.4%	7.7%	8.6%	10.5%	10.0%	9.1%	8.5%	
		Ortalama	7.7%					9.3%					
FWD (Defleksiyon)	Soğuk	Var.Kat.	0.6%	0.5%	0.4%	0.5%	0.8%	0.4%	0.4%	0.5%	0.6%	0.8%	5
		Ortalama	0.6%					0.6%					
	Sıcak	Var.Kat.	1.3%	1.7%	1.5%	1.7%	1.4%	1.5%	1.7%	1.6%	1.2%	1.4%	
		Ortalama	1.5%					1.4%					
FWD Modül	Soğuk	Var.Kat.	9.6%	6.8%	5.7%	6.1%	12.1%	1.8%	1.7%	1.9%	6.5%	5.6%	5
		Ortalama	8.1%					3.5%					
	Sıcak	Var.Kat.	4.9%	4.2%	3.8%	3.5%	3.9%	6.0%	4.5%	4.6%	7.2%	4.6%	
		Ortalama	4.1%					5.4%					

5.3. Belirlenebilirlik Aralığı

Kesitlerdeki 1.2×3 m' lik ayrışma bölgeleri ve 0.6×0.6 m, 0.3×0.3 m ve 0.15×0.15 m' lik ayrışma bölgeleri daha önceki kısımda ayrıntılı olarak verilmiştir. Belirlenebilirlik aralığını tanımlamak için, farklı büyüklükteki ayrışma bölgelerinde tahribatsız deney metotları ile gerçekleştirilen deney sonuçlarının durumu göze alınmıştır. Çizelge 5.6' da ayrışma alanı büyüklüğünün fonksiyonu olarak ayrışmanın belirlenmesi, ayrışmanın cinsi, karışımın cinsi ve hava koşullarına göre düzenlenmiştir. Bu sonuçların grafikler üzerinde özetlenmiş hali Şekil 5.1' de gösterilmiştir. Sonuçlardan da anlaşılabileceği gibi ayrışma alanı küçüldükçe, ayrışmanın belirlenme oranı da giderek azalmaktadır.

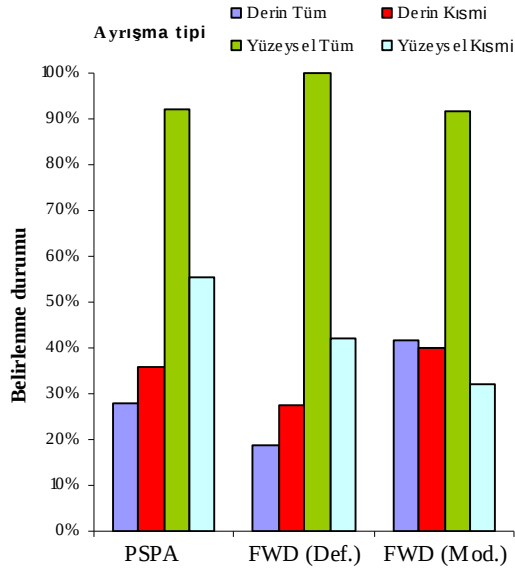
Belirlenebilirlik aralığını daha iyi netleştirmek için, ayrışma bölgelerinin yüzdesi büyüklüğün, derinliğin ve Çizelge 5.4' te tanımlanan kritere bağlı olan sıralama sırasının bir fonksiyonu olarak tanımlanmaktadır. Bu duruma göre elde edilen sonuçlar Çizelge 5.7' de gösterilmektedir. Her bir ağırlık faktörü yolun güvenlik durumuna göre kritik durumlar göz önünde bulundurularak önem derecesine ve derinliğe bağlı olarak belirlenmiştir. Yüzeysel tamamen ayrılmış bölgeler için 4 ile başlayıp, derin kısmi ayrılmış noktalarda 1 olacak şekilde numaralandırılmıştır. Çizelgede de görüldüğü gibi 0.3m×0.15m lik alanlarda ayrışma durumunu belirlemede istenilen başarıya ulaşılamamıştır. 1.2m×3m olan ayrışma bölgesindeki ayrışma durumunu tahribatsız deney yöntemleri ile belirlemede başarı sağlanmıştır.

5.4. Veri Toplama Hızı

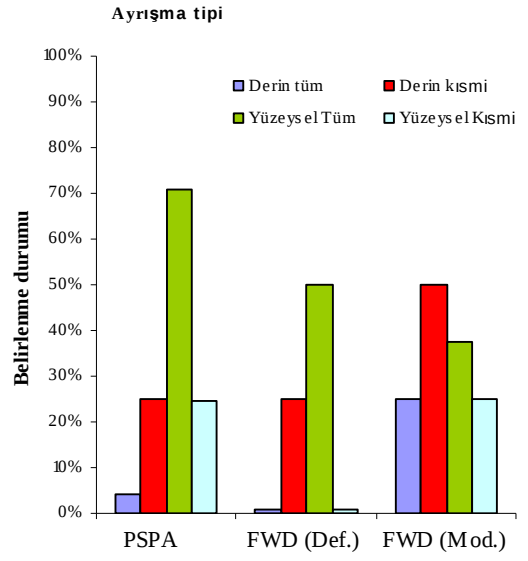
Tahribatsız deney metotları için veri toplama hızları Çizelge 5.8' de verilmiştir. Sürekli bir şekilde veri toplama metodu için, 30 m yol uzunluğu boyunca bir deneyin tamamlanma süresi ve buna ek olarak, deneye başlanmadan önce aletin kurulması için gerekli olan sürede gerekmektedir. Bu bilgiler ışığında diğer aletlerin kurulum ve uygulama süreleri göz önünde bulundurularak PSPA ve FWD deney aletlerine ait sıralama değeri 3 olarak atanmıştır.

Çizelge 5.6. Farklı derece ve büyüklükteki ayrışmaların belirlenmesinde başarı durumu

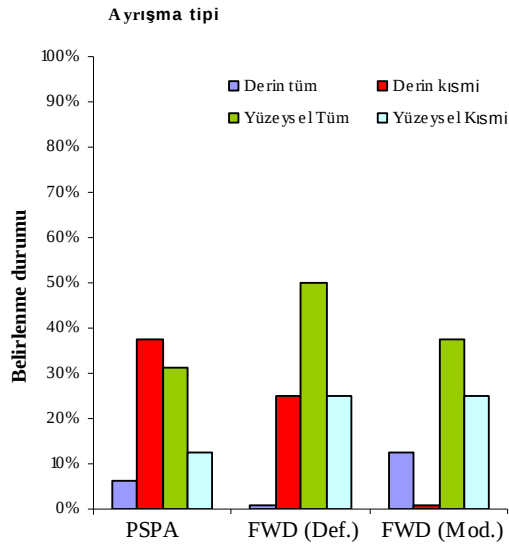
NDT Aleti	HMA Tipi	Alan Büyüklüğü (m)	Soğuk Hava				Sıcak Hava			
			Ayrışma Derinliği ve Tipi				Ayrışma Derinliği ve Tipi			
			Derin (12 cm)		Sığ (6 cm)		Derin (12 cm)		Sığ (6 cm)	
			Bütün	Kısmi	Bütün	Kısmi	Bütün	Kısmi	Bütün	Kısmi
PSPA	İnce Karışım	1.2 x 3	%43	%60	%88	%58	%48	%28	%93	%27
		0.6 x 0.6	%0	%17	%67	%33	%8	%33	%67	%33
		0.3 x0.3	%0	%50	%0	%0	%0	%0	%0	%0
		0.15 x 0.15	%0	%0	%50	%0	%0	%50	%25	%0
	Kaba Karışım	1.2 x 3	%18	%37	%90	%65	%3	%18	%98	%72
		0.6 x 0.6	%8	%17	%67	%0	%0	%33	%83	%33
		0.3 x0.3	%25	%100	%50	%50	%0	%0	%75	%0
		0.15 x 0.15	%0	%100	%0	%0	%0	%0	%0	%0
FWD (Defleksiyonlar)	İnce Karışım	1.2 x 3	%0	%13	%100	%72	%75	%59	%100	%0
		0.6 x 0.6	%0	%0	%0	%0	%0	%100	%100	%0
		0.3 x0.3	%0	%0	%0	%0	%0	%100	%100	%100
		0.15 x 0.15								
	Kaba Karışım	1.2 x 3	%0	%19	%100	%66	%0	%19	%100	%31
		0.6 x 0.6	%0	%0	%0	%0	%0	%0	%100	%0
		0.3 x0.3	%0	%0	%0	%0	%0	%0	%100	%0
		0.15 x 0.15								
FWD (Modüller)	İnce Karışım	1.2 x 3	%75	%41	%100	%38	%75	%59	%67	%0
		0.6 x 0.6	%0	%100	%50	%0	%0	%0	%0	%0
		0.3 x0.3	%50	%0	%0	%0	%0	%0	%0	%100
		0.15 x 0.15								
	Kaba Karışım	1.2 x 3	%17	%41	%100	%59	%0	%19	%100	%31
		0.6 x 0.6	%100	%100	%0	%100	%0	%0	%100	%0
		0.3 x0.3	%0	%0	%50	%0	%0	%0	%100	%0
		0.15 x 0.15								



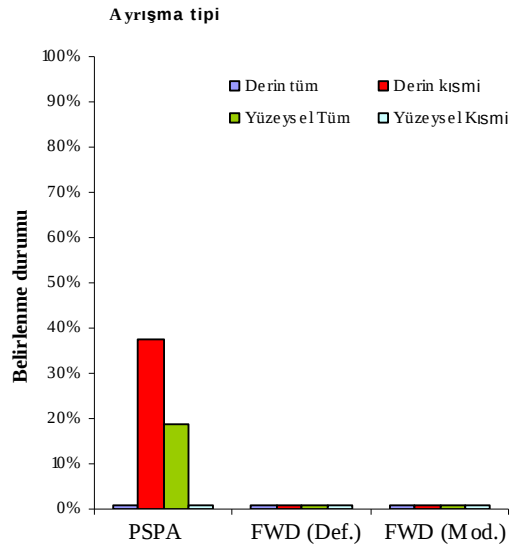
a) 1.2 X 3 m



b) 0.6 X 0.6 m



c) 0.3 X 0.3 m



d) 0.15 X 0.15 m

Şekil 5.1. Sismik metodun genel durumu

Çizelge 5.7. Belirlenebilirlik aralık sıralaması

Ayrışma Alanı (m)	Ayrışma Tipi	Ağırlık Faktörü	Belirleme Sırası		
			PSPA	FWD (Defleksiyon)	FWD (Modül)
1.2 X 3	Derin Tüm	2	0	0	1
	Derin Kısmi	1	1	0	1
	Sığ Tüm	4	5	5	5
	Sığ Kısmi	3	3	1	0
	Tamamı	--	3.0	2.3	2.3
0.6 X 0.6	Derin Tüm	2	0	0	0
	Derin Kısmi	1	0	0	1
	Sığ Tüm	4	5	1	1
	Sığ Kısmi	3	0	0	0
	Tamamı	--	2.0	0.4	0.5
0.3 X 0.3	Derin Tüm	2	0	0	0
	Derin Kısmi	1	1	0	0
	Sığ Tüm	4	0	1	1
	Sığ Kısmi	3	0	0	0
	Tamamı	--	0.1	0.4	0.4
0.15 X 0.15	Derin Tüm	2	0	0	0
	Derin Kısmi	1	1	0	0
	Sığ Tüm	4	0	0	0
	Sığ Kısmi	3	0	0	0
	Tamamı	--	0.1	0.0	0.0

Çizelge 5.8. Veri toplama hızı sıralaması

NDT Aleti	Kurma süresi, dakika	Test noktası, saniye	Sıralama
PSPA	10	15	3
FWD	20	120	3

5.5. Veri Analiz Hızı

Yalın halde elde edilen sismik deney sonuçlarının analizinin tamamlanması için geçen süre Çizelge 5.9’ da verilmiştir. Bu parametre aynı zamanda veri analizini gerçekleştirmek için gerekli uzmanlığı ve zorluğunun tahminini göstermektedir.

PSPA ve FWD deney aletleri için sıralama 3 olarak atanmıştır. Bu değerler diğer NDT deney aletlerinden elde edilen verilerin analizleri ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Çizelge 5.9. Veri analiz hızı ve yorumlanma sürelerine göre sıralama

NDT Aleti	Yalın Verinin Analiz Süresi	Ayrışma Durumunu Belirlemek İçin Yorumlama Süresi, Gün	Sıralama
PSPA	Deney ile aynı zamanlı	2	3
FWD	Deney ile aynı zamanlı	2	3

5.6. Veri Analiz Sürecinin Değerlendirilmesi

Veri analizinin karmaşıklığı tahmin edilerek Çizelge 5.10’ da özetlenmiştir. Burada verilen değerlendirme analizi, gerçekleştirmede uzmanlık seviyesinde olan personelle yapılan değerlendirme sonucunda elde edilmiştir. Burada uzmanlığın üç aşaması göz önünde bulundurulmuştur:

- 1) Uzman,
- 2) Metotla ilgili bilgi sahipliği (orta derecede bilgi sahibi)
- 3) Eğitim almış yeni kullanıcı.

Çizelge 5.10. Veri analiz sürecinin değerlendirilmesi ve zorluk derecesi

NDT Aleti	Gerekli Uzmanlık Derecesi	Sıralama	Zorluk Derecesi
PSPA	Orta Seviyeli Kullanıcı	3	Ayarlama parametreleri çalışmanın başlangıç kısmında bir miktar karmaşık.
FWD	Orta Seviyeli Kullanıcı	3	Gerihesaplama safhasındaki farklı parametreler sonuçlarda farklılıklara sebep olur

5.7. Genel Değerlendirme

Tabakalı üstyapı sistemlerinde özellikle inşaat süreci boyunca yanlış ya da yetersiz uygulamalar nedeniyle tabakalar arasındaki adezyon yeterli miktarda sağlanamamaktadır. Yolun trafiğe açılmasından sonra iklim koşulları ve trafik yüklerinin etkisiyle tabakalar arasındaki bu yetersiz adezyon git gide ayrışmalara ve sonuç olarak sökülmelere neden olmaktadır. Daha başlangıç aşamasında bu tür ayrışmaların belirlenmesi ile, ileride görülecek olan can ve mal güvenliğini tehlikeye atan kazaların önlenmesi ve maliyeti yüksek olacak onarım çalışmalarının önüne geçilmesi sağlanacaktır. Tahribatsız deney aletleri ile karayollarında görülen çeşitli problemler belirlenebilmekte ve kalite kontrolü yapılabilmektedir. Tabakalar arasındaki ayrışmanın ileri seviyelere geçmeden belirlenmesi için farklı tahribatsız deney aletlerinin kullanılabilirliğinin değerlendirilmesi önemli bir kolaylık ve ekonomi sağlayacaktır.

Bu amaçla, tez çalışmasında sismik ve defleksiyon metotlarının tabakalar arasındaki ayrışmayı belirlemek için etkinlikleri araştırılmıştır. Bu amaçla farklı seviyelerdeki ayrışma durumunu temsil eden arayüzey malzemeleri ile küçük ölçekli bir yol inşa edilmiştir. Küçük ölçekli yol çalışması üzerinde, farklı iklim koşulları altında gerçekleştirilen ön bir çalışma ve iki farklı genişletilmiş deney süreci uygulanmıştır. Bu çalışmanın neticesinde;

- PSPA deney aleti kullanılarak uygulanan ultrasonik yüzey dalga metodunun ayrışmaların farklı seviyelerini belirlemede uygunluğu kanıtlanmıştır.
- İleri derecede ayrışmaların belirlenmesinde PSPA deney aleti % 60 oranında başarılıdır. Kısmi ayrışma bölgelerinin belirlenmesinde bu oran % 50 civarındadır.
- FWD aleti belirli derecedeki ayrışmaları gözlemlemede uygundur, ancak PSPA aleti FWD'ye göre daha doğru sonuçlar vermiştir.
- Bununla birlikte hem PSPA hem de FWD aletleri ile bütün ayrışma noktaları belirlenememiştir.

- Soğuk ve sıcak hava koşulları altında gerçekleştirilmiş olan bu deney süreçlerinden, soğuk hava koşulları altında yapılan deneylerin üstyapı durumunu daha net gösterdiği sonucuna varılmıştır.
- Her iki metodun tekrarlanabilirlikleri iyi derecededir.
- 0.6 m²' den daha düşük alanlardaki ayrışmanın belirlenmesi mümkün olmamıştır.
- Her iki alet için de veri elde etme hızı oldukça kısa sürmektedir.
- Her iki aletten elde edilen verilerin analizi çok uzun sürmemektedir.

6. KAYNAKLAR

- Ağar, E., Sütaş, İ., Öztaş, G., 1998. Beton Yollar. İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul.
- Al-Hakim, B., Cheung, L.W., Armitage, R.J., 2000. Use of FWD Data for Prediction of Bonding Between Pavement Layers. *Int J Pavement Eng* 1 (1), pp. 49–59.
- ASTM D4748, 2005. Standard Test Method for Determining the Thickness of Bound Pavement Layers Using Short-Pulse Radar, Non-destructive Testing of Pavement Structures, American Society of Testing and Materials. Pennsylvania, USA.
- ASTM D6926-04, 2004. Standard Practice for Preparation of Bituminous Specimens Using Marshall Apparatus. American Society of Testing and Materials. West Conshohocken, USA.
- Baker, M.R., Crain, K., Nazarian, S., 1995. Determination of Pavement Thickness with a New Ultrasonic Device. Research Report 1966-1, Center for Highway Materials Research, The University of Texas at El Paso, Texas, USD.
- Bastard, C.L., Baltazart, V., Wang, Y., Saillard, J., 2007. Thin-Pavement Thickness Estimation Using GPR with High-Resolution and Superresolution Methods. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 45, no. 8, pp. 2511–19.
- Bentsen, R.A., Bush, A.J., Harrison, J., 1989. Evaluation of NDT Equipment for Airfield Pavements. Technical Record GL-89-3, U.S. AEWES, Vicksburg, MS, 390.
- Carino, N.J., 2001. The Impact-Echo Method: an Overview. *Proceedings of the 2001 Structures Congress & Exposition*, Washington, D.C., American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, 18 p.
- Celaya, M., Mejia, D., Ertem, F.S., Nazarian, S., Rao, C., Quintus, H.V., Shohouhi, P., 2010. Evaluation of NDT Technologies to Assess Presence and Extent of Delamination of HMA Airfield Pavements. 06-04, Final Report, El Paso, TX, USA.
- Celaya, M., Nazarian, S., 2007. Stripping Detection in Asphalt Pavements with Seismic Methods. *Journal of The Transportation Research Board*, 2005, 64-74.
- Celaya, M., Nazarian, S., 2006. Seismic Testing to Determine Quality of Hot-Mix Asphalt. *Journal of The Transportation Research Board*, 1946, 113-122.
- Celaya, M., Nazarian, S., 2008. Implementation of Quality Management of Hot Mix Asphalt with Seismic Methods. *Journal of The Transportation Research Board*, 2057, 99-106.
- Collop, A.A., Sutanto, M.H., Airey, G.D., Elliott, R.C., 2009. Shear Bond Strength Between Asphalt Layers for Laboratory Prepared Samples and Field Cores. *Construction and Building Materials*. Vol. 23, No. 6, pp2251-2258.

- Dumoulin, J., Ibos, L., 2010. Subsurface Defect Detection in First Layer of Pavement Structure and Reinforced Civil Engineering Structure by FRP Bonding Using Active Infrared Thermography. Geophysical Research Abstracts, Vol. 12.
- Dunning, M.R., 2006. Feasibility for the Use of Non-contact Ultrasound for Application in Asphalt Concrete Materials. PhD thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Nevada, Las Vegas, 32812 p. U.S.A.
- Freeman, R., Bell, H., Brown, R., Mejias, M., 2009. Fatigue Evaluation Criteria for Aged Asphalt Concrete Surfaces. Journal of The Transportation Research Board, 09-3325.
- Garbacz, A., Garboczi, E. J., 2003. Ultrasonic Evaluation Methods Applicable to Polymer Concrete Composites. NISTIR 6975; 73 p. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD 20899.
- Gomba, S.M., 2004. Evaluation of Interlayer Bonding in Hot Mix Asphalt Pavements. Master Thesis. Rowan University, Glassboro, New Jersey.
- Göktepe, A.B., Agar, E., Lav, A.H., 2002. Esnek Üstyapılarda Mekanik Özelliklerin Yapay Sinir Ağları Kullanılarak Geri-Hesaplanması. İtühergisi/d mühendislik. Cilt:4, Sayı:2, 31-42.
- Gucunski, N., Zaghloul, S., Hadidi, R., Maher, A., 2003. Pavement Evaluation and Development of Seasonal and Temperature Adjustment Models Using Seismic Pavement Analyzer (SPA.). Proc., Third International Conference on Applied Geophysics—Geophysics 2003, Orlando, Fla., Dec.
- Hammons, M. I., Von Quintus, H., Maser, K., Nazarian, S., 2005. Detection of Stripping in Hot Mix Asphalt. Applied Research Associates Project Number 16355, Prepared for: Office of Materials and Research, Georgia Department of Transportation.
- Hammons, M.I., Von Quintus, H., Geary, G.M., Wu, P.Y., Jared, D.M., 2006. Detection of Stripping in Hot Mix Asphalt. Journal of The Transportation Research Board, 1949, 20-31.
- Harris, D., Noureldin, A.S., Shan, J., 2004. Pavement Overlay Thickness Evaluation Using Ground Penetrating Radar (GPR). ASPRS (American Society for Photogrammetry and Remote Sensing) Annual Conference, Denver, CO.
- Hoffman, M.S., Thompson, M.R. 1982. Backcalc. Nonl. Resilient Moduli From Deflection Data, Record No: 852, TRB, DC., 42-51.
- Horak, E., Maina, J.W., Guiamba, D., Hartman, A., 2008. Correlation Study with the Light Weight Deflectometer in South Africa. Proceedings of the 27th Southern African Transport Conference (SATC 2008).
- Hudson, W.R., Uddin, W., 1987. Future Pavement Evaluation Technologies: Prospects and Opportunities. Organization, Implementation and Communication Issues, Toronto, Canada, pp. 3.239-3.253.
- İlcalı, M., Tayfur, S., Özen, H., Sönmez, İ., Eren, K., 2001. Asfalt ve Uygulamaları. 280s. İstanbul.

- Karaşahin, M., 1993. Resilient Behaviour of Granular Materials for Analysis of Highway Pavements, PhD thesis, Department of Civil Engineering, University of Nottingham, 312 p. England.
- Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM), www.kgm.gov.tr. Erişim Tarihi: 20.12.2010.
- Kruntcheva, M.R., Collop, A.C., Thom, N.H., 2005. Effect of Bond Condition on Flexible Pavement Performance. *Journal of Transportation Engineering*, 131 (11), 880-888.
- Kruntcheva, M.R., Collop, A.C., Thom, N.H., 2006. Properties of Asphalt Concrete Layer Interfaces. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 18 (3), 467-471.
- Kruntcheva, M.R., Collop, A.C., Thom, N.H., 2004. Feasibility of Assessing Bond Condition of Asphalt Concrete Layers with Dynamic Nondestructive Testing. *Journal of Transportation Engineering*, 130 (4), 510-518.
- Kulkarni, M.B., 2004. Effect of Tack and Prime Coats, and Bag-House Fines on Composite Asphalt Pavements. Ph.D. Dissertation, North Carolina State University, Raleigh, NC.
- Lenngren, C., Bergström, J., Ersson, B., 2000. Using Ground Penetrating Radar for Assessing Highway Pavement Thickness. *Subsurface Sensing Technol. Appl.*, vol. 4129, pp. 474-483, San Diego.
- Li, Y., Nazarian, S., 1994. Evaluation of Aging of Hot-Mix Asphalt Using Wave Propagation Techniques. *Engineering Properties of Asphalt Mixtures and the Relationship to Their Performance*, ASTM STP 1265, Philadelphia, Pa., pp.166-179.
- Lin, J.M., Sansalone, M.J., 1996. Impact-Echo Studies of Interfacial Bond Quality in Concrete: Part I-Effects of Unbonded Fraction of Area. *ACI Materials Journal*, Vol. 93, No. 3, May-June, pp. 223- 232.
- Little D.N., Shafee Yusuf F.A.M., 2001. Application of the National Lime Association Mixture Design and Testing Protocol (MDTP) to Ascertain Engineering Properties of Lime-Treated Subgrades for Mechanistic Pavement Design/Analysis. National Lime Association, Arlington, Virginia, US.
- Liu, W., Scullion, T., 2001. Modulus 6.0 for Windows: User's Manual, Report 1869-2, Texas. Transportation Institute, College Station, TX.
- Lu, Q., Harvey, J.T., Ullidtz, P., 2008. Stiffness Characterization with Falling Weight Deflectometer in Accelerated Pavement Testing, 3rd International Conference APT'08, Madrid, Spain.
- Mallick, B.R., Das, A., Nazarian, S., 2005. Use of a Fast Nondestructive Field Test Method for Determination of Stiffness of Subsurface Layer in Thin Surface Hot Mix Asphalt (HMA) Pavement. *Transportation Research Record*, No. 1905, pp.82-89.
- Mallick, R.B., Bradley, J.E., Nazarian, S., 2006. Evaluation and Recommendation of a Fast Nondestructive Test and Analysis Method for In-Place Determination of Stiffness of Subsurface Reclaimed Layers in Thin Surface Hot Mix Asphalt (HMA) Pavements. *Journal of The Transportation Research Board*, 1949, 11-19.

- Maser, K., 1994. Ground Penetrating Radar Survey of Pavement Thickness on MN/Road Sections. Minnesota Department of Transportation Office of Minnesota Road Research Report # MN/RC-95/06.
- Maser, K.R. 2006. Feasibility of using Ground Penetrating Radar (GPR) for Pavements, Utilities, and Bridges. Report SD2005-05 prepared for the South Dakota Department of Transportation.
- Maser, K.R., 2000. Pavement Characterization Using Ground Penetrating Radar: State of the Art and Current Practice. Nondestructive Testing of Pavements and Backcalculation of Moduli: Third Volume. Special Technical Publication (STP).
- Meier, R.W., 1995. Backcalculation of Flexible Pavement Moduli from FWD Data Using ANNs, PhD Dissertation Georgia Institute of Technology, Atlanta, 239.
- Mejia, D., Celaya, M., Iyer, S., Rao, C., Shokouhi, P., Nazarian, S., 2008. A Work Plan toward Evaluation of Technologies to Assess Presence and Extent of Delamination of HMA Airfield Pavements. Research Project 06-04, Conducted for: Airfield Asphalt Pavement Technology Program in cooperation with the Federal Aviation Administration, Center for Transportation Infrastructure Systems The University of Texas at El Paso El Paso, TX.
- Menjia, D.M., 2009. Finite Element Modeling of Nondestructive Test Methods Used for Detection of Delamination in Hot Mix Asphalt Pavements. Master of Science, The University of Texas at El Paso, El Paso, TX, USA.
- Mikulic, D., Gucunski, N., Maher, A., 2001. Blacktop Resurfacing of Bridge Decks. Federal Highway Administration Final Report, 2001-011, 129 s. New Jersey, USA.
- Morey, R.M. 1998. Ground Penetrating Radar for Evaluating Subsurface Conditions for Transportation Facilities. NCHRP Synthesis of Highway Practice 255.
- Myers, L.A., Mahoney, J., Stephens, J., 2001. Application of Infrared Thermographic Imaging to Bituminous Concrete Pavements. Research Report No. 2229-1-01-9, Connecticut Advanced Pavement Laboratory, University of Connecticut.
- Nazarian, S., Baker, M. R., Crain, K., 1993. Developing and Testing a Seismic Pavement Analyzer. Technical Report SHRP-H-375, Strategic Highway Research Program, Washington, DC.
- Nazarian, S., Baker, M., Crain, K., 1997. Assessing Quality of Concrete with Wave Propagation Techniques. Materials Journal, ACI, Farmington Hills, MI, Vol. 94 (4) 296- 306.
- Nazarian, S., Yuan D., Tandon V., 1999. Structural Field Testing of Flexible Pavement Layers with Seismic Methods for Quality Control, Transportation Research Record 1654, pp 50-60.

- Noureldin, A.S., Zhu, K., Li, S., Harris, D., 2003. Network Pavement Evaluation using Falling Weight Deflectometer and Ground Penetrating Radar. Transportation Research Board, 82nd Annual Meeting.
- Pinel, N., Le Bastard, C., Liu, L., Bourlier, C., Wang, Y., 2009. Rough Thin Pavement Thickness Estimation by GPR. IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium, Cape Town, Africa.
- Raab, C., Partl, M.N., 2009. Interlayer Bonding of Binder, Base and Sub-Base Layers of Asphalt Pavements: Long Term Performance. Constr Build Mater 23 (8), pp. 2926–2931.
- Romanoschi, S.A., Metcalf, J.B., 2002. The Characterization of Asphalt Concrete Layer Interfaces. Ninth International Conference of Asphalt Pavements, International Society for Asphalt Pavements.
- Saeed, A., Hall, J.W.Jr., 2002. Comparison of Non-Destructive Testing Devices to Determine in situ Properties of Asphalt Concrete Pavement Layers. Al-Qadi, I.L. and Clark, T.M. (eds). Proceedings of the pavement evaluation 2002 Conference, Roanoke, VA, USA, pp. 14p.
- Saltan, M., 1999. Esnek Üstyapıların Analitik Değerlendirilmesi. S.D.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 202s, Isparta
- Sangiorgi, C., Collop, A.C., Thom, N.H., 2003. A Nondestructive İmpulse Hammer for Evaluating the Bond Between Asphalt Layers in a Road Pavement. Non-Destructive Testing in Civil Engineering, International Symposium, Liverpool, UK.
- Sansalone, M., Carino, N.J., 1986. Impact-Echo: A Method for Flaw Detection in Concrete Using Transient Stress Waves. Report NBSIR 86-3452, Gaithersburg, MD.
- Santagata, F.A., Ferotti, G., Partl, M.N., Canestrari, F., 2008. Statistical İnvestigation of Two Different İnterlayer Shear Test Methods. Materials and Structures.
- Sebaaly, B., Davies, T.G., Mamlouk, M., 1985. Dynamics of FWD, ASCE, Journal Of Transportation Engineering., 111, 6, 618-632.
- Sezgin, H., 2003. Karayolları Esnek Üstyapılarında Alttemel Tabakasının Yapay Sinir Ağları Kullanılarak Modellenmesi. S.D.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Y. Lisans Tezi, 105s, Isparta.
- Siddharthan, R.V., Norris, G.M., Epps, J.A., 1991. Use of FWD Data for Pavement Material Characterization and Performance. Journal of Transportation Engineering, ASCE, Vol. 117(6), pp.660-678.
- Steyn, W.J.vdM., Sadzik, E., 2007. Application of The Portable Pavement Seismic Analyser (PSPA) for Pavement Analysis. The 26th Annual Southern African Transport Conference, 10 s. South Africa.
- Stokoe, K.H., Wright, S.G., Bay, J.A., and Roesset, J.M., 1994. Characterization of Geotechnical Sites by SASW Method. Technical Review: Geophysical Characterization of Sites, ISSMFE Technical Committee 10, edited by R.D. woods, Oxford Publishers, New Delhi.

- Stolle, D.F., 1991. Modeling of Dynamic Response of Pavements to Impact Loading. *Computers and Geotechnics*, 11, 1, 83-94.
- Tawfiq, K., Armaghani, J., Sobanjo, J. 2000. Seismic Pavement Analyzer and FWD for Pavement Evaluation, ASTM STP 1375, PA.
- Tawfiq, K., Armaghani, J., Sobanjo, J. 2002. Rational Method for Selecting Seismic Waves for Pavement Evaluation. *Journal of Transportation Engineering*. 128 (6), 550-558.
- Tholen, O., Sharma, J., Terrel, R.L. 1985. Comparison of FWD with Other Deflection Testing Devices. Record No: 1007, TRB, DC., 20-26.
- Tschegg, E., Kroer, G., Tan, D., Stanzl-Tschegg, S., Litzka, J., 1995. Investigation of Bonding between Asphalt Layers on Road Construction. *Journal of Transportation Engineering*, 121 (4), 309-316.
- Umar, F., Açar, E., 1991. Yol Üstyapısı. İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul.
- Uzarowski, L., Maher, M., Balasundaram, A., 2005. Practical Application of GPR to Supplement Data from FWD for Quick Pavement Performance Prediction. Annual Conference of the Canadian Society of Civil Engineers, Toronto, ON.
- Watts, M., Schieck, D., Coniglio, M., 2009. Deep Geological Repository for Opg's Low and Intermediate Level Waste. Technical Report: 2D Seismic Survey of the Bruce Site, Canada.
- Willet, D., Rister, B., 2002. Ground Penetrating Radar Pavement Layer Thickness Evaluation. Kentucky Transportation Center Research Report # KTC-02-29/FR101-00-1F
- Wimsatt, A.J., Scullion, T., 2003. Selecting Rehabilitation Strategies for Flexible Pavements in Texas. Transportation Research Board, 82nd Annual Meeting.
- Wu, R., Li, X., Li, J., 2003. Continuous Pavement Profiling with Ground-Penetrating Radar. *Proc. Inst. Electr. Eng.—Radar Sonar Navig.*, vol. 149, pp. 183.
- Yuan D., Nazarian S., Chen D., Hugo F. 1998. Use of Seismic Pavement Analyzer in Monitoring Degradation of Flexible Pavements Under Texas Mobile Load Simulator. *Transportation Research Record* 1615, Washington, DC, pp. 3-10.
- Yuan, D., Nazarian, S., 2000. Feasibility of Detecting Flaws in Concrete Walls of Nuclear Power Plants. Research conducted for Jet Propulsion Laboratory The Center For Highway Materials Research, University of Texas at El Paso, El Paso, TX.
- Zhou, H., 2000. Comparison of Backcalculation and Laboratory Measured Moduli on AC and Granular Base Layer Materials. ASTM STP 1375, PA, 161-172.

EKLER

EK 1. Ön çalışma sonucunda elde edilen tahribatsız deney sonuçları

Çizelge EK 1.1. İkinci inşaat günün sonunda PSPA sonuçları (1. ve 2. tabaka kombinasyonu)

Konum	Nokta No	Sismik Modül (ksi)		
		Sol Kenar	Merkez	Sağ Kenar
S10, Derin ve Tüm Ayrışma	2	1858	1708	1222
	1	1891	1901	1108
S9, Derin ve Kısmi Ayrışma	2	2004	1703	1312
	1	1651	2065	1503
S8, Yüzeysel ve Tüm Ayrışma	2	1759	2051	1858
	1	2112	2197	1957
S7, Yüzeysel ve Kısmi Ayrışma	2	1910	1877	1731
	1	1656	1811	1642
S6, İntak Bölgesi	2	1995	2018	1717
	1	1943	2037	1905
GEÇİŞ	1	1850	1872	1896
S5, Derin ve Tüm Ayrışma	2	1868	1703	1133
	1	1797	1440	1056
S4, Derin ve Kısmi Ayrışma	2	1774	1623	1171
	1	1534	1585	1110
S3, Yüzeysel ve Tüm Ayrışma	2	1670	1614	1548
	1	1599	1726	1651
S2, Yüzeysel ve Kısmi Ayrışma	2	1614	1689	2004
	1	1585	1670	1642
S1, İntak Bölgesi	2	1872	1543	1717
	1	1759	1402	1640

Çizelge EK 1.2. İkinci inşaat günü sonunda PSPA sonuçları (Sadece üst tabaka için)

Konum	Nokta No	Sismik Modül (ksi)		
		Sol Kenar	Sol Kenar	Sol Kenar
S10, Derin ve Tüm Ayrışma	2	1825	1769	1563
	1	1938	2216	1470
S9, Derin ve Kısmi Ayrışma	2	2013	1891	1440
	1	1736	2183	1778
S8, Yüzeysel ve Tüm Ayrışma	2	1821	2140	1882
	1	2070	2169	1882
S7, Yüzeysel ve Kısmi Ayrışma	2	2009	1966	1736
	1	1741	1910	1637
S6, İntak Bölgesi	2	2131	2206	1835
	1	1976	2145	1999
GEÇİŞ	1	1995	1924	1818
S5, Derin ve Tüm Ayrışma	2	1990	1712	1494
	1	1731	1618	1317
S4, Derin ve Kısmi Ayrışma	2	1821	1604	1442
	1	1505	1585	1352
S3, Yüzeysel ve Tüm Ayrışma	2	1679	1604	1609
	1	1646	1778	1614
S2, Yüzeysel ve Kısmi Ayrışma	2	1637	1844	1853
	1	1806	1694	1651
S1, İntak Bölgesi	2	1849	1548	1698
	1	1712	1427	1621

Çizelge EK 1.3. İnşaat sürecinin tamamlanmasından sonra PSPA sonuçları (Üç tabakanın kombinasyonu)

Konum	Nokta No	Sismik Modül (ksi)		
		Sol Kenar	Sol Kenar	Sol Kenar
S10, Derin ve Tüm Ayrışma	2	1628	1948	1684
	1	1885	1797	1648
S9, Derin ve Kısmi Ayrışma	2	1774	1659	1741
	1	1745	2023	1794
S8, Yüzeysel ve Tüm Ayrışma	2	1938	1888	1321
	1	1717	1872	1197
S7, Yüzeysel ve Kısmi Ayrışma	2	1936	1679	1511
	1	1587	1590	1806
S6, İntak Bölgesi	2	1901	1792	2055
	1	1891	1941	1853
GEÇİŞ	1	1626	1549	1769
S5, Derin ve Tüm Ayrışma	2	1979	1524	1229
	1	1853	1969	1559
S4, Derin ve Kısmi Ayrışma	2	2104	2007	1870
	1	1764	2032	1618
S3, Yüzeysel ve Tüm Ayrışma	2	1599	1800	1465
	1	2092	1621	1440
S2, Yüzeysel ve Kısmi Ayrışma	2	1599	1844	1344
	1	2177	2079	1650
S1, İntak Bölgesi	2	2506	2042	1874
	1	1835	1943	1882

Çizelge EK 1.4. İnşaat sürecinin tamamlanmasından sonra PSPA sonuçları (Sadece üst tabaka için)

Konum	Nokta No	Sismik Modül (ksi)		
		Sol Kenar	Sol Kenar	Sol Kenar
S10, Derin ve Tüm Ayrışma	2	1929	2434	2051
	1	2079	1905	2070
S9, Derin ve Kısmi Ayrışma	2	1849	1891	1949
	1	1976	2308	1982
S8, Yüzeysel ve Tüm Ayrışma	2	2432	2095	1936
	1	1924	2129	1479
S7, Yüzeysel ve Kısmi Ayrışma	2	2065	1872	1684
	1	1706	1915	2096
S6, İntak Bölgesi	2	2023	1929	2324
	1	2366	2136	2124
GEÇİŞ	2	1946	1643	1896
	1	2010	1978	1752
S5, Derin ve Tüm Ayrışma	2	1943	2336	2004
	1	2365	2214	2206
S4, Derin ve Kısmi Ayrışma	2	1679	2148	2244
	1	2070	2007	1951
S3, Yüzeysel ve Tüm Ayrışma	2	2311	1681	1761
	1	2007	2264	1652
S2, Yüzeysel ve Kısmi Ayrışma	2	2515	2380	2102
	1	2779	2368	2004
S1, İntak Bölgesi	2	2032	2279	1966
	1	2018	2173	1886

EK 2. Bütün tahribatsız deney sonuçları

Çizelge EK 2.1. PSPA sonuçları (3 tabaka birlikte). İri karışım

Section	Nokta No	PSPA' dan Elde Edilen Sismik Modül (20 cm için), ksi				
		Sıra 1	Sıra 2	Sıra 3	Sıra 4	Sıra 5
S5, Derin ve Tüm Ayrışma	5	1733	1851	1652	1508	1627
	4	1845	1767	1914	1599	1421
	3	1914	1879	1684	1690	1481
	2	1783	1374	1614	1573	1284
	1	1666	1827	1651	1442	1527
S4, Derin ve Kısmi Ayrışma	5	1645	1712	1984	1837	1437
	4	1724	1502	2025	1653	1511
	3	1668	1612	1676	1696	1726
	2	1955	1729	1815	1817	1548
	1	1808	1715	1666	1453	1044
S3, Yüzeysel ve Tüm Ayrışma	5	1633	1347	1747	1387	1091
	4	1933	1643	1714	1266	1054
	3	1956	1611	1617	1326	1313
	2	1891	1527	2325	987	1151
	1	1983	1874	1908	1289	1048
S2, Yüzeysel ve Kısmi Ayrışma	5	1929	1626	1563	1320	1146
	4	2214	1778	1974	1768	1774
	3	1951	1755	1899	1740	1626
	2	2236	1957	1807	1643	1667
	1	2231	1685	1977	1804	1902
S1, İntak Bölgesi	5	1991	1829	1825	1751	1922
	4	1736	1636	1589	1891	1876
	3	1812	1714	1854	1963	1683
	2	1777	1690	1835	1626	1699
	1	1768	1921	1674	1602	1745

Çizelge EK 2.2. PSPA sonuçları (3 tabaka birlikte). İnce Karışım ve Geçiş Bölgesi

Kesit	Nokta No	PSPA' dan Elde Edilen Sismik Modül (20 cm için), ksi				
		Sıra 1	Sıra 2	Sıra 3	Sıra 4	Sıra 5
S10, Derin ve Tüm Ayrışma	5	1875	1925	2340	1958	1812
	4	1802	1993	2213	2018	1677
	3	1760	2356	2234	2073	1572
	2	1990	1902	2058	2006	1615
	1	1873	1899	2117	1888	1557
S9, Derin ve Kısmi Ayrışma	5	1802	1569	1646	1598	1729
	4	1655	1753	2050	1986	1820
	3	1845	1720	1922	2093	1661
	2	1882	1741	1825	2140	2034
	1	1828	1795	1836	1397	1446
S8, Yüzeysel ve Tüm Ayrışma	5	1869	1469	2141	1629	1375
	4	1448	1513	1919	1542	1463
	3	1524	1856	2335	1667	1409
	2	1873	1744	2048	1674	1469
	1	1598	1719	2051	1578	1612
S7, Yüzeysel ve Kısmi Ayrışma	5	1644	1300	1649	1531	1538
	4	1727	2023	1854	1547	1611
	3	1628	1960	1880	1592	1777
	2	1824	1819	1750	1766	1680
	1	1762	1813	1961	1771	1841
S6, İntak Bölgesi	5	1717	1962	1569	1924	2180
	4	1827	2171	1968	2025	2031
	3	1809	2095	1828	2175	2078
	2	2083	2212	1967	2307	2156
	1	1443	1953	2134	2116	1990
GEÇİŞ	8	2200	1909	2137	2218	2010
	7	1558	1921	1854	1901	2064
	6	1373	1668	2268	1647	1983
	5	1680	2155	2229	2121	1747
	4	2037	2217	1607	1448	1185
	3	1995	1970	1411	1518	1163
	2	2321	2111	2254	2388	1925
	1	1989	1994	2246	1946	2041

Çizelge EK 2.3. PSPA Sonuçları (Üst Tabaka). İri Karışım

Kesit	Nokta No	PSPA' dan Elde Edilen Sismik Modül (6 cm için), ksi				
		Sıra 1	Sıra 2	Sıra 3	Sıra 4	Sıra 5
S5, Derin ve Tüm Ayrışma	5	2130	2067	1858	1719	1599
	4	1891	1790	1989	1808	1500
	3	2106	1968	1909	1761	1758
	2	1862	1632	1773	1751	1528
	1	1899	1654	1936	1680	1888
S4, Derin ve Kısmi Ayrışma	5	1771	1963	2179	2112	1736
	4	2086	1981	2118	1830	1768
	3	1705	1903	1862	1920	2178
	2	2225	1915	2104	2138	1963
	1	2043	1892	1973	2007	1487
S3, Yüzeysel ve Tüm Ayrışma	5	2008	1579	1942	1619	1347
	4	2169	1778	1775	1823	1537
	3	1947	1404	1626	1739	1643
	2	2071	1633	2242	1377	1508
	1	2001	2124	1889	1261	1457
S2, Yüzeysel ve Kısmi Ayrışma	5	2223	2078	2071	1427	1571
	4	2586	2022	2190	2026	2111
	3	2057	1999	2319	1952	2079
	2	2374	2206	2401	2007	2148
	1	2350	1828	2240	1997	2318
S1, İntak Bölgesi	5	2069	1701	2171	2111	2063
	4	2209	1805	1791	2169	2172
	3	2022	1875	1960	1854	1893
	2	2057	1773	2141	1886	1753
	1	2023	1842	1848	1868	1862

Çizelge EK 2.4. PSPA Sonuçları (Üst Tabaka).İnce Karışım ve Geçiş Bölgesi

Kesit	Nokta No	PSPA' dan Elde Edilen Sismik Modül (6 cm için), ksi				
		Sıra 1	Sıra 2	Sıra 3	Sıra 4	Sıra 5
S10, Derin ve Tüm Ayrışma	5	1977	2060	2403	2190	2292
	4	1832	2083	2422	2327	2068
	3	1882	2534	2440	2286	2020
	2	2105	2110	2162	2231	1973
	1	1989	2341	2297	2202	1994
S9, Derin ve Kısmi Ayrışma	5	2084	1899	1767	1907	1878
	4	1862	1944	2212	2116	2128
	3	2170	2177	2277	2317	1826
	2	2211	1815	2240	2287	2028
	1	2063	2123	2157	1747	1878
S8, Yüzeysel ve Tüm Ayrışma	5	1929	1776	2279	1729	1717
	4	1522	1882	2226	2038	1832
	3	1657	1981	2377	2034	1780
	2	2003	1981	2366	1861	1669
	1	1754	1932	2054	1653	1779
S7, Yüzeysel ve Kısmi Ayrışma	5	1890	1630	1799	1694	1812
	4	1933	2198	2117	1825	1868
	3	1842	2094	2103	1815	2147
	2	1971	2148	1945	1998	1957
	1	1842	2003	2291	2025	1955
S6, İntak Bölgesi	5	1877	1954	1944	2293	2355
	4	1986	2443	2070	2365	2315
	3	1903	2034	2140	2359	2371
	2	2084	2434	2213	2455	2424
	1	1653	2309	1911	2215	2331
GEÇİŞ	8	2244	2344	2035	2234	2098
	7	1731	2066	1992	2045	2183
	6	1458	1713	2379	1806	2066
	5	1808	2489	2432	2465	2281
	4	2125	2162	1877	1888	1361
	3	2432	2413	2015	1988	1685
	2	2340	2484	2676	2561	2034
	1	2386	2431	2326	2364	2407

Çizelge EK 2.5. FWD Sonuçları

Section	Nokta No	S1 Jeofon Defleksiyonu (mils)			Modül, ksi		
		Sıra 1	Sıra 3	Sıra 5	Sıra 1	Sıra 3	Sıra 5
S10, Derin ve Tüm Ayrışma	5	5.0	5.1	8.7	990	914	307
	3	5.5	5.1	9.8	741	899	252
	1	5.3	5.1	9.3	835	876	265
S9, Derin ve Kısmi Ayrışma	5	4.9	5.4	7.3	898	689	409
	3	4.4	4.8	6.7	1085	881	458
	1	5.2	4.8	5.6	759	856	692
S8, Yüzeysel ve Tüm Ayrışma	5	5.1	6.8	8.2	849	380	228
	3	5.3	5.5	6.4	749	628	357
	1	5.5	5.7	5.6	697	598	495
S7, Yüzeysel ve Kısmi Ayrışma	5	5.2	6.4	6.0	784	451	489
	3	5.2	6.5	5.7	862	282	619
	1	5.5	5.3	5.7	856	903	685
S6, İntak Bölgesi	5	5.6	5.2	5.3	804	946	815
	3	5.7	4.9	5.8	749	1073	619
	1	5.2	5.0	5.2	876	927	869
GEÇİŞ	5	5.7	5.3	N/A	N/A	N/A	N/A
	4	6.3	5.4	N/A	N/A	N/A	N/A
	3	6.2	7.9	16.7	N/A	N/A	N/A
	2	4.8	12.5	N/A	N/A	N/A	N/A
	1	4.4	4.5	N/A	N/A	N/A	N/A
S5, Derin ve Tüm Ayrışma	5	4.5	5.2	6.7	1008	786	487
	3	4.1	5.1	7.6	1279	871	346
	1	4.2	4.7	7.4	1273	1081	374
S4, Derin ve Kısmi Ayrışma	5	3.9	4.7	7.0	1606	1184	527
	3	4.1	5.3	6.3	1375	920	741
	1	5.0	5.9	8.1	912	763	408
S3, Yüzeysel ve Tüm Ayrışma	5	4.7	6.8	11.6	1091	524	195
	3	5.5	6.3	10.0	783	672	244
	1	5.4	5.6	8.9	918	870	328
S2, Yüzeysel ve Kısmi Ayrışma	5	5.2	5.7	7.6	916	846	493
	3	5.7	6.0	6.9	757	749	660
	1	5.6	5.6	6.9	812	877	675
S1, İntak Bölgesi	5	4.7	5.1	5.9	1306	1108	1046
	3	4.6	5.0	6.7	1289	1080	769
	1	4.9	5.1	7.0	1093	989	692

EK 3. Geniştirilmiş Tahribatsız Deney Sonuçları

Çizelge EK 3.1. PSPA Sonuçları (3 Tabaka Birlikte). İnce Karışım ve Geçiş (Soğuk Hava Koşullarında)

Kesit	Nokta No	PSPA Sismik Modülleri (20 cm için), ksi									
		Sıra 1	Sıra 2	Sıra 3	Sıra 4	Sıra 5	Sıra 6	Sıra 7	Sıra 8	Sıra 9	Sıra 10
S10, Derin ve Tüm Ayrışma	10	1736	1794	2061	1986	2114	2526	1799	1759	1629	1724
	9	1807	1740	2074	2152	2298	2549	1553	1745	1610	1566
	8	1598	1792	2207	2029	2228	2353	1641	1817	1505	1625
	7	1696	1630	1981	2304	2213	2436	1828	1629	1572	1664
	6	1595	1695	2100	2369	2482	2342	1859	1869	1408	1697
	5	1722	1967	2042	2169	2110	2429	1463	1864	1413	1454
	4	1756	1946	1992	1901	2034	2146	1499	1807	1447	1368
	3	1696	1764	2000	2278	1615	2445	1744	1431	1341	1626
	2	1647	1706	1790	1874	2178	2304	1602	1564	1569	1577
	1	1595	1840	1941	1866	1879	2172	1916	1697	1395	1629
S9, Derin ve Kısmi Ayrışma	10	1888	1880	1838	1609	2147	1663	2000	1607	1506	1620
	9	1795	1785	1944	1697	1892	1995	1878	1981	1547	1460
	8	1737	1683	1960	1804	1887	2071	1798	1993	1578	1584
	7	2071	1724	1867	1627	1934	1799	1797	1758	1567	1535
	6	1898	1898	1812	1774	1594	1942	1806	2094	1435	1580
	5	2041	1862	1759	1997	1768	2019	1986	2101	1734	1610
	4	1845	2045	2088	1798	1775	1845	2189	2137	1758	1848
	3	1884	1929	1698	1774	1575	1907	1678	1920	1684	1702
	2	2044	2006	1823	1720	2060	1942	1840	2057	1725	1675
	1	1862	1974	1957	1862	1869	1855	1427	1385	1252	1197
S8, Yüzeysel ve Tüm Ayrışma	10	2015	1927	1237	1540	1227	2209	1421	1646	1426	1511
	9	1781	1731	1241	1483	1606	2217	1661	1441	1300	1249
	8	1633	1417	1704	1564	1851	1974	1598	1566	1513	1416
	7	1599	1448	1655	1824	1414	2367	1531	1720	1413	1466
	6	1623	1582	1792	1894	1876	2396	1534	1701	1453	1573
	5	1774	1907	1887	1869	1806	2197	1555	1709	1493	1501
	4	1914	2016	2001	1780	1588	2090	1449	1700	1503	1575
	3	1903	1877	1729	1719	1510	1813	1329	1608	1273	1480
	2	1732	1837	1680	1887	1711	1967	1686	1490	1484	1561
	1	1563	1771	1604	1755	2013	2062	1465	1579	1613	1576
S7, Yüzeysel ve Kısmi Ayrışma	10	1894	1677	1378	1412	1571	1780	1801	1642	1650	1510
	9	1899	1873	1863	1715	1701	2055	1669	1728	1717	1615
	8	1794	1827	1935	2219	1990	1984	1938	1640	1713	1443
	7	1755	1791	1875	1905	1884	1918	1841	1781	1817	1744
	6	1665	1685	1716	2171	1831	1993	1906	1669	1873	1685
	5	1938	1992	1791	2141	2037	2013	1775	1809	1693	1609
	4	1997	1780	1779	2011	2015	1861	1981	1860	1777	1799
	3	1876	1884	1686	2148	1938	1751	1764	1711	1737	1748
	2	1705	1968	2036	1976	2035	2019	1815	1727	1873	1733
	1	1778	1955	2085	1995	2336	2104	1704	1889	1963	1949

Çizelge EK 3.1 Devam. PSPA Sonuçları (3 Tabaka Birlikte). İnce Karışım ve Geçiş
(Soğuk Hava Koşullarında)

S6, İntak Bölgesi	10	1784	1985	2227	2341	2206	1549	2063	1974	2261	2093
	9	1861	2235	1951	2282	1974	1871	1915	2193	2110	1996
	8	1821	2198	2399	2583	2236	1921	1797	2022	2100	1997
	7	1938	2013	2054	2293	2182	1922	1940	1943	2215	1966
	6	2038	1943	2386	2479	2353	1766	2004	2119	2143	2176
	5	2111	2044	2063	2600	2440	2211	1975	2052	2117	1834
	4	2220	2349	2183	2584	2322	2257	1995	2247	2193	2166
	3	2079	2273	2382	2113	2378	2498	2047	2109	2243	2121
	2	2091	2083	2093	2456	2234	2945	1814	1943	1827	1896
	1	1454	1673	1761	2202	2486	2448	1879	2061	1947	1969
GEÇİŞ	15	1342	1422	1530	2118	2237	2060	2123	2151	1840	1883
	14	1487	1658	1577	1804	2149	2963	1977	1875	1982	1998
	13	1462	1395	1488	1896	1815	2271	2059	2106	1971	1807
	12	1332	1577	1658	1633	1418	1922	2358	1864	1820	1926
	11	1145	1423	1527	1624	1932	2227	1739	1868	1783	1760
	10	1422	1363	1746	1821	1663	2287	2310	1965	1664	1622
	9	1080	1398	1823	1754	1508	1962	1842	1913	1942	1824
	8	1553	1852	2120	1996	1244	1252	1113	1173	1136	963
	7	1871	2118	2129	1874	1442	1119	1002	954	1051	1149
	6	1917	2135	2069	2075	1173	1319	1192	1048	1116	994
	5	1944	2047	2347	2321	1183	1286	1216	1226	1144	1026
	4	1771	2233	1890	2279	1446	1982	1846	2149	1720	1947
	3	1718	2057	1945	1960	2166	1911	2140	2173	1620	1989
	2	1690	1936	1952	2092	2059	1928	2097	2067	1820	1717
	1	1852	2067	2012	2156	1788	1802	1820	2433	2084	2004

Çizelge EK 3.2. PSPA Sonuçları (3 Tabaka Birlikte). İri Karışım (Soğuk Hava Koşullarında)

Kesit	Nokta No	PSPA Sismik Modülleri (20 cm için), ksi									
		Sıra 1	Sıra 2	Sıra 3	Sıra 4	Sıra 5	Sıra 6	Sıra 7	Sıra 8	Sıra 9	Sıra 10
S5, Derin ve Tüm Ayrışma	10	1678	1755	1890	1911	1908	1693	1987	1864	1761	1684
	9	1916	2001	2146	1870	1637	1690	1724	1935	1697	1600
	8	1829	1889	2006	1546	1765	1727	1579	1699	1569	1493
	7	2006	1855	2029	1809	1785	1800	1671	1636	1756	1695
	6	2243	1926	1976	1512	1691	1725	1727	1805	1824	1484
	5	2053	1921	1841	1718	1618	1814	1927	1940	1736	1754
	4	1881	2138	1859	1456	1750	1786	1749	1894	1660	1778
	3	1955	1835	1867	1982	1888	1847	1695	1942	1726	1754
	2	2244	2088	1869	1750	2062	1998	1946	1701	1635	1814
	1	2056	1831	1883	1496	1993	1740	1912	1467	1595	1806
S4, Derin ve Kısmi Ayrışma	10	1859	1928	1762	1655	1948	1776	1731	1825	1609	1700
	9	2141	1892	1862	1765	1856	2070	1873	1693	1551	1608
	8	1862	1734	1861	1612	1670	1591	1837	1517	1616	1712
	7	2039	1808	1794	1640	1875	1827	1561	1698	1572	1723
	6	1767	1854	1796	1431	1495	1494	1753	2052	1663	1849
	5	2039	2130	1712	1269	1778	1832	1772	1757	1623	1475
	4	1692	2137	1777	1457	1486	1941	1843	1835	1641	1190
	3	1849	1951	1804	1659	1649	1749	1926	1609	1000	868
	2	1691	1781	1991	1527	1622	1666	1731	1587	1254	1147
	1	2051	1760	1938	1796	1738	1788	1369	1488	1279	1086
S3, Yüzey ve Tüm Ayrışma	10	2075	1769	1291	1224	1548	1803	1156	1182	1268	1213
	9	1920	1461	1156	1208	1523	1781	1281	1301	1319	1217
	8	1908	1893	1582	1481	1770	2009	1408	1331	1314	1318
	7	1952	1948	1722	1544	1569	1539	1396	1267	1326	1143
	6	1822	1864	1786	1382	1694	1733	1674	1522	1517	1288
	5	1854	1844	1854	1631	2102	1758	1535	1577	1326	1314
	4	1894	1898	1818	1928	2128	1888	1369	1387	1335	1119
	3	1909	2127	1931	1699	2046	2046	1522	1312	1271	1156
	2	1945	2226	1929	1896	2215	2024	1404	1289	1241	1253
	1	1920	2214	1893	1632	1935	1764	1463	1610	1328	1418
S2, Yüzey ve Kısmi Ayrışma	10	2104	1906	1683	1833	1932	2528	1675	1467	1083	1426
	9	2018	2045	1858	1892	2052	2737	2101	1481	1297	1468
	8	1979	2022	1922	1734	2016	1978	2487	1674	1443	1843
	7	1903	2059	1796	1778	1869	2246	1932	1444	1402	1653
	6	1878	1960	1636	1587	1995	2115	2131	1623	1457	1853
	5	1960	1993	1757	1624	2330	2048	2014	1660	1227	1626
	4	1883	2122	1883	1876	1980	2162	1910	1643	1575	1659
	3	1999	2079	1869	1529	2083	2214	1850	1552	1459	1735
	2	1847	1946	1870	1952	2341	1895	2168	1478	1602	1714
	1	2035	1787	1877	1691	2281	2196	2405	1596	1840	1846
S1, İntak Bölgesi	10	2225	2007	1987	1735	1805	1645	1679	1825	1927	1782
	9	2119	1799	2029	1919	1626	1551	1736	1806	1860	1859
	8	2141	2089	2192	1877	1762	1575	1936	1668	1899	1923
	7	2220	1954	1894	1664	1762	1497	1635	1733	1727	1750
	6	2264	1809	1981	1880	1863	1619	1668	1859	1743	1851
	5	1893	1898	1862	1634	1815	1836	1659	1590	1544	1577
	4	2276	1708	1937	1812	2013	1575	1563	1425	1817	1732
	3	1864	1840	1996	1572	1728	1569	1518	1566	1551	1767
	2	2139	2105	1533	1751	1926	1465	1578	1696	1665	1936
	1	1907	1700	1679	1847	1638	1741	1320	1517	1524	1781

Çizelge EK 3.3. PSPA Sonuçları (Üst Tabaka). İnce Karışım ve Geçiş (Soğuk Hava Koşullarında)

Kesit	Nokta No	PSPA Sismik Modülleri (6 cm için), ksi									
		Sıra 1	Sıra 2	Sıra 3	Sıra 4	Sıra 5	Sıra 6	Sıra 7	Sıra 8	Sıra 9	Sıra 10
S10, Derin ve Tüm Ayrışma	10	1947	2006	2168	2060	2100	2403	2358	2190	2292	2283
	9	1884	1868	2188	2275	2596	2368	2363	2376	2161	2397
	8	1742	1922	2178	2083	2473	2422	2268	2327	2068	2100
	7	1804	2136	2102	2426	2297	2613	2207	2324	1970	2065
	6	1936	1828	2317	2534	2538	2440	2309	2286	2020	2210
	5	1866	2155	2274	2349	2269	2649	2077	2272	1970	1972
	4	2039	2170	2032	2110	2138	2162	2123	2231	1973	2039
	3	1854	2305	2250	2394	1872	2433	2065	2143	1916	2219
	2	2044	1872	2026	2118	2195	2311	2059	2263	2046	2219
	1	1959	2019	2141	2341	2065	2297	2512	2202	1994	2184
S9, Derin ve Kısmi Ayrışma	10	2158	2009	2009	1899	2205	1767	2226	1907	1878	2079
	9	1956	1910	2176	1874	2132	2122	2109	2164	1835	1981
	8	1866	1858	2039	1944	1933	2212	2083	2116	2128	2041
	7	2210	2043	2118	1845	2143	2088	2083	2222	2039	1903
	6	2152	2187	1916	2177	1746	2277	2266	2317	1826	2096
	5	2159	1984	2129	2127	2029	2184	2272	2321	1961	2289
	4	2070	2351	2090	1815	1896	2240	2417	2287	2028	2137
	3	2102	2090	1766	2020	1718	2012	2070	2313	2099	2071
	2	2198	2216	1761	1821	2053	2202	2300	2451	2112	2054
	1	2041	2085	2003	2123	1945	2157	1900	1747	1878	1789
S8, Yüzeysel ve Tüm Ayrışma	10	2002	1856	1404	1776	1533	2279	1861	1729	1717	1763
	9	1878	1769	1547	1665	1765	2428	1726	1613	1586	1758
	8	1693	1351	1914	1882	1929	2226	1983	2038	1832	1653
	7	1758	1664	1900	1969	1827	2547	1997	2017	1787	1937
	6	1635	1678	1904	1981	2012	2377	1785	2034	1780	1846
	5	1884	1904	2148	1992	1957	2462	1858	1939	1710	1889
	4	1964	2042	1992	1981	1861	2366	1668	1861	1669	1690
	3	1875	1850	1813	2051	1592	2049	1575	1960	1580	1621
	2	1755	1862	1730	2174	1937	2012	1856	1711	1758	1738
	1	1657	1851	1689	1932	2326	2054	1743	1653	1779	1952
S7, Yüzeysel ve Kısmi Ayrışma	10	2014	1766	1599	1630	1691	1799	1786	1694	1812	1707
	9	2061	1858	1946	1843	1891	2038	1830	1907	1892	1756
	8	1900	1965	2260	2198	1917	2117	2004	1825	1868	1804
	7	1892	1855	2202	2114	1878	2010	1763	2045	1953	2067
	6	1851	1832	2023	2094	1828	2103	1995	1815	2147	1773
	5	1971	2163	2009	2113	2129	2147	1920	2194	1846	1741
	4	2127	1816	1896	2148	1922	1945	2037	1998	1957	2102
	3	1947	1965	1749	2091	1921	1719	1838	1709	1880	1920
	2	1823	1991	2154	1950	2035	2142	1951	1674	2044	1975
	1	1922	1762	2153	2003	2330	2291	1754	2025	1955	2046
S6, İntak Bölgesi	10	1787	1966	2213	1954	2221	1944	2222	2293	2355	2342
	9	1929	1947	1873	2263	2150	2205	2188	2340	2315	2363
	8	1884	2087	2178	2443	2191	2070	2135	2365	2315	2275
	7	1795	1925	2205	2256	2301	2100	2297	2335	2347	2330
	6	1884	1921	2213	2034	2087	2140	2179	2359	2371	2502
	5	1881	1972	2128	2431	2337	2289	2300	2287	2308	2257
	4	2105	2063	2128	2434	2385	2213	2244	2455	2424	2452
	3	1925	2138	2105	2074	1933	1999	2247	2323	2578	2369
	2	2149	2109	2205	2248	2113	2186	2015	2405	2070	2195
	1	1560	1746	1904	2309	2256	1911	2061	2215	2331	2437

Çizelge EK 3.3 Devam. PSPA Sonuçları (Üst Tabaka). İnce Karışım ve Geçiş
(Soğuk Hava Koşullarında)

GEÇİŞ	15	1412	1519	1577	1799	2283	1992	2041	1835	1716	1716
	14	1441	1730	1528	1568	2172	1750	1941	1911	1809	1912
	13	1376	1375	1383	1537	1779	1630	1849	1857	1843	1822
	12	1404	1424	1560	1419	1384	2016	1656	1845	1756	1898
	11	1271	1381	1432	1440	2342	2356	1653	1712	1458	1919
	10	1305	1341	1799	1929	1811	2248	2222	2155	1578	1837
	9	1107	1437	2023	1818	1594	2050	2080	1919	2130	2016
	8	1517	1869	2182	2011	1696	1586	1455	1530	1409	1349
	7	1692	2048	2069	1888	2019	1490	1249	1375	1369	1369
	6	2028	2108	2036	2015	1636	1777	1747	1507	1747	1595
	5	1929	1876	2238	2178	1730	1883	1653	1671	1482	1461
	4	1831	1963	1916	1851	1499	2057	2078	2291	1810	1794
	3	1812	2069	2262	1885	2078	2058	2142	2053	1638	1829
	2	1783	1866	1953	2274	2035	2083	2206	2168	1797	1683
	1	1871	2147	2125	2068	1872	1873	1923	2484	1950	2087

Çizelge EK 3.4. PSPA Sonuçları (Üst Tabaka). İri Karışım (Soğuk Hava Koşullarında)

Kesit	Nokta No	PSPA Sismik Modülleri (6 cm için), ksi									
		Sıra 1	Sıra 2	Sıra 3	Sıra 4	Sıra 5	Sıra 6	Sıra 7	Sıra 8	Sıra 9	Sıra 10
S5, Derin ve Tüm Ayrışma	10	1829	2020	2303	1997	2231	1868	2319	2192	1998	2066
	9	2295	2176	2302	2060	1808	1830	2188	2171	1940	1936
	8	1989	1914	2289	1858	2102	1942	1915	2047	1790	1656
	7	2175	2218	2421	2097	2215	2018	2005	1871	2079	1816
	6	2556	2090	2410	1744	1912	1924	2062	2164	2222	1653
	5	2387	2189	2307	1981	1793	2028	2039	2198	2041	2042
	4	2150	2342	2067	1732	1932	2208	2082	2144	2002	2374
	3	2163	2182	2186	2084	2345	2334	2139	2232	2191	2151
	2	2348	2338	2342	1986	2285	2228	2244	2135	2024	2107
	1	2224	2205	2313	1763	2398	2110	1901	1829	1909	2229
S4, Derin ve Kısmi Ayrışma	10	2079	1899	1948	1709	1802	1960	1916	2108	1988	1966
	9	2100	1927	2051	1897	2026	2071	2021	1972	1970	1874
	8	1940	1885	1941	1874	2097	1882	1918	1755	1917	1972
	7	2027	1863	2021	1752	2063	2136	1899	2043	1902	1922
	6	1942	2090	1914	1740	1866	1722	1989	2194	1959	2120
	5	2193	2114	2040	1502	1892	1968	2000	1859	1938	1787
	4	1691	2269	2106	1617	1595	2139	2103	2223	1952	1492
	3	1938	1961	1950	1823	1767	1838	2139	1830	1482	1189
	2	1785	1824	2081	1600	1655	1840	1902	1758	1710	1711
	1	2085	1827	2008	1795	1848	1976	1777	1956	1724	1552
S3, Yüzeysel ve Tüm Ayrışma	10	2054	1912	1539	1452	1740	1824	1566	1605	1641	1718
	9	1711	1641	1415	1508	1627	1856	1551	1613	1604	1588
	8	1833	1857	1631	1561	1777	2023	1699	1613	1647	1515
	7	1892	1982	1833	1680	1687	1668	1668	1558	1550	1515
	6	1784	1951	1872	1434	1684	1661	1835	1597	1617	1564
	5	1904	2088	1884	1845	2108	1882	1712	1689	1556	1479
	4	2036	2155	1770	1915	2256	1993	1562	1437	1477	1392
	3	1990	2100	1910	1801	2025	2237	1345	1330	1322	1274
	2	2017	2194	2044	1926	2328	2033	1318	1282	1339	1398
	1	2083	2303	1955	1791	2075	1974	1414	1610	1689	1497
S2, Yüzeysel ve Kısmi Ayrışma	10	2346	2307	2083	1543	1406	2129	1838	1707	1674	1847
	9	2516	2245	2170	1462	1628	2268	1696	1586	1532	1844
	8	2232	2388	2155	1672	1787	2080	1940	1994	1753	1737
	7	2286	2267	2105	1768	1700	2379	1945	1964	1694	2038
	6	2161	2096	1966	1799	1882	2221	1730	1971	1673	1946
	5	2042	2158	2086	1808	1830	2300	1801	1880	1606	1990
	4	2183	2255	2233	1945	1719	2218	1619	1813	1588	1763
	3	2382	2391	2055	1974	1453	1927	1532	1918	1522	1675
	2	2154	2289	2118	2142	1746	1899	1808	1682	1715	1778
	1	2291	2056	2152	1921	2072	1945	1700	1633	1757	1976
S1, İntak Bölgesi	10	2245	2260	2312	2029	2146	1822	1847	2005	2113	2196
	9	2318	2125	2134	2131	2024	1855	1942	2021	1986	2239
	8	2224	2100	2361	2103	2077	1838	2121	1931	2052	2278
	7	2356	2189	2309	1983	2061	1780	1906	1823	1810	2148
	6	2415	2109	2353	2155	2117	1801	1930	2022	1934	2259
	5	2177	2134	2128	1961	2057	2100	1943	1895	1611	2122
	4	2355	1986	2189	1893	2170	1773	1816	1530	1756	2165
	3	2114	1941	2282	2161	2236	1856	1808	1818	1709	2204
	2	2337	2364	1940	2106	2317	1659	1871	1908	1797	2239
	1	2282	1970	1983	2034	1913	1807	1585	1715	1600	2133

Çizelge EK 3.5. PSPA Sonuçları (Üç Tabaka Birlikte). İnce Karışım ve Geçiş (Soğuk Hava Koşullarında)

Kesit	Nokta No	PSPA Sismik Modülleri (6 cm için), ksi									
		Sıra 1	Sıra 2	Sıra 3	Sıra 4	Sıra 5	Sıra 6	Sıra 7	Sıra 8	Sıra 9	Sıra 10
S10, Derin ve Tüm Ayrışma	10	1958	1927	2065	2008	1716	1904	1821	2006	1834	1869
	9	1923	1881	1797	1990	1898	2359	1756	1704	1696	1736
	8	1935	1857	1904	1984	2220	2472	2050	1764	1654	1495
	7	1768	1916	1937	2021	2283	2187	1848	2108	1625	1261
	6	2075	1896	1885	2195	1728	2227	2234	2026	2005	1580
	5	1772	2141	1978	1814	2163	2308	2166	1970	1725	1844
	4	1710	2311	2071	1818	1771	2211	1762	1576	1373	1451
	3	1850	1667	1916	1783	1689	2468	1921	1734	1386	1805
	2	1885	1811	1951	1661	1711	2080	2025	1786	1515	1858
	1	1850	1869	1962	1857	1730	2129	2122	1978	1611	1811
S9, Derin ve Kısmi Ayrışma	10	1698	1874	1656	1721	2319	2443	2593	2353	2075	1985
	9	1727	1625	1747	2130	1907	2251	2390	2477	2038	2104
	8	1877	1842	1744	1908	2384	2766	2575	2435	2118	1927
	7	2075	1798	1822	1891	2301	2531	2585	2125	2081	1877
	6	1993	2110	1833	2203	2381	2651	2344	2473	1922	1905
	5	1802	2054	1770	2009	2238	2919	2521	2452	2307	2179
	4	1686	2079	1746	1805	2092	2779	2647	2283	2350	2170
	3	1864	1713	1704	1799	1708	2510	2546	2510	2307	2478
	2	1636	2041	1698	1537	1745	2244	2268	2626	2366	2494
	1	1794	1924	1780	1878	1792	2312	1747	1835	1324	1559
S8, Yüzeysel ve Tüm Ayrışma	10	1945	2106	1589	1399	1321	2574	1677	1502	1185	1184
	9	1967	1809	1449	1336	1374	2186	1664	1471	1064	1207
	8	1745	1997	1689	2108	1938	1922	1598	1453	1218	1268
	7	1770	1776	2102	1937	1671	2088	1642	1589	1439	1336
	6	1851	1665	2233	2170	1864	2361	1721	1797	1781	1536
	5	2332	2064	2026	2233	1874	2466	1935	1835	1639	1612
	4	2299	1966	2187	1936	1844	2531	1808	1880	1598	1586
	3	2012	1861	2064	1893	1976	1986	1799	1925	1359	1360
	2	1906	2002	2039	2309	2741	2470	1867	1511	1547	1448
	1	1735	1799	2001	1934	2402	2184	2079	1804	1841	1578
S7, Yüzeysel ve Kısmi Ayrışma	10	2017	2220	1981	1452	1950	2583	2377	2077	2336	2303
	9	2271	1887	1689	1859	1714	3051	2223	2123	2002	2343
	8	2042	2011	1882	2297	2366	2054	2161	2121	2148	1926
	7	1885	2016	2242	1588	1719	1949	2325	2289	2156	2313
	6	2455	2329	2385	2133	2364	2268	1876	2171	2091	2185
	5	1981	2315	2088	2378	1903	2398	2106	2371	2313	2192
	4	2003	2537	2196	2378	2345	2438	2109	2269	2021	2185
	3	1764	2369	2390	2507	2266	2160	2196	2141	1855	1903
	2	1635	2098	2285	2311	2408	2480	1973	2014	2310	2055
	1	2033	2151	2382	2126	2336	2840	2266	2131	2219	2165
S6, İntak Bölgesi	10	2583	1773	1827	2061	1590	2015	1716	1990	1860	2223
	9	2295	1951	2166	1872	1763	2089	1902	1747	1835	2216
	8	2324	1780	2013	1928	1550	2018	1804	1922	2296	2079
	7	2156	1822	1944	1954	1949	1969	1735	1915	1881	1944
	6	2324	2503	2597	2431	2082	2016	2133	2265	2266	2068
	5	2267	2503	1795	2126	1785	1955	1999	1981	2056	1927
	4	2543	2511	2115	2177	2025	2202	2059	2003	2141	2105
	3	2755	2804	2450	2317	1832	2041	2008	2079	1812	2063
	2	2243	2471	2042	2082	1885	2205	2039	2144	2132	2239
	1	2113	1900	1921	2209	2165	2134	2116	2050	1923	2291

Çizelge EK 3.5 Devam. PSPA Sonuçları (Üç Tabaka Birlikte). İnce Karışım ve Geçiş
(Soğuk Hava Koşullarında)

GEÇİŞ	15	1280	1448	1583	1764	1828	2258	2296	2323	1965	2049
	14	1499	1564	1721	1874	2090	2669	2173	2050	2324	2161
	13	1475	1248	1498	1934	1892	1863	2533	2534	2024	2284
	12	1294	1820	1784	1735	1539	2197	2165	2036	1949	2122
	11	1249	1155	1383	1319	1654	2134	2029	1988	2007	2295
	10	1416	1406	1764	2045	1784	2071	2309	2462	1882	1999
	9	1124	1425	1770	1986	1698	2395	2053	2301	1837	2107
	8	1753	1790	2173	1903	1559	973	1076	1101	1048	980
	7	1854	2292	1935	1905	1252	1343	1151	1110	1037	1208
	6	1916	1878	2177	2023	1101	1239	1324	1059	1140	1086
	5	1822	1951	2243	1921	1028	1061	1272	1292	1156	1069
	4	1943	2184	1984	2074	2021	1910	2134	2324	1972	2272
	3	2087	2092	2035	1999	2023	2284	2083	2172	1973	2066
	2	1986	2176	2082	1962	2189	1974	2243	2226	2041	1854
	1	2086	2045	2148	2197	2079	2160	2055	2394	2015	2136

Çizelge EK 3.6. PSPA Sonuçları (3 Tabaka Birlikte). İri Karışım (Sıcak Hava Koşullarında)

Kesit	Nokta No	PSPA Sismik Modülleri (6 cm için), ksi									
		Sıra 1	Sıra 2	Sıra 3	Sıra 4	Sıra 5	Sıra 6	Sıra 7	Sıra 8	Sıra 9	Sıra 10
S5, Derin ve Tüm Ayrışma	10	1579	1833	2169	2177	1797	1938	2037	2006	1643	1922
	9	1746	1925	2007	2145	2087	2123	2033	2043	1936	1988
	8	1903	1838	2409	1999	2415	2520	1955	2018	2022	2113
	7	1808	2000	2463	2183	2478	2566	2283	2114	2113	2014
	6	1955	2072	1965	1828	2013	2427	2493	2399	2006	2143
	5	2040	2067	1944	2056	2266	2443	2249	2420	1785	1901
	4	1790	2140	1594	1858	2369	2281	2313	2113	1948	1722
	3	1982	1905	1879	2001	2335	2174	2019	1976	1863	1805
	2	2015	2028	1695	1985	2247	2191	1866	2034	1739	1809
	1	1716	1902	1900	2061	2067	2118	1867	1921	1778	1652
S4, Derin ve Kısmi Ayrışma	10	1670	1785	1624	1470	2074	2148	1907	1645	1915	1760
	9	1691	1755	1670	1364	1959	2082	1739	1521	1754	1841
	8	1779	1774	1619	1328	2045	2074	2014	1665	1794	1907
	7	1866	1910	1647	1623	1994	1975	1998	1921	1976	1978
	6	1730	1714	1597	1619	2023	2004	1880	1828	1508	1861
	5	1605	1710	1703	1635	1956	1672	1818	1888	1789	1713
	4	1805	1678	1622	1644	1761	2137	1834	1713	1399	1261
	3	1601	1577	1627	1661	1979	1861	1869	1765	1338	864
	2	1608	1593	1581	1539	1910	1791	1810	1846	1648	1435
	1	1588	1682	1685	1628	1883	1964	1475	1525	1404	1138
S3, Yüzeysel ve Tüm Ayrışma	10	1503	1295	1083	913	1288	1514	1107	945	1185	982
	9	1600	1210	953	1122	1182	1565	1176	1086	1160	1085
	8	1696	1494	1532	1318	1486	1600	1081	1102	1261	967
	7	1685	1709	1295	1047	1261	1715	1137	1184	1110	1107
	6	1525	1622	1520	1365	1533	1328	1415	1446	1307	1082
	5	1793	1581	1508	1344	1743	1573	1400	1362	1207	1008
	4	1748	1676	1601	1590	1617	1755	1136	1136	1065	1148
	3	1798	1895	1524	1241	1641	1755	989	1071	1368	1155
	2	1873	1768	1646	1500	1926	1498	1024	1051	1087	1133
	1	1794	1655	1597	1387	1577	1541	1348	1355	1259	1185
S2, Yüzeysel ve Kısmi Ayrışma	10	1924	1846	1584	1631	1729	1838	1612	1482	1491	1430
	9	1931	1906	1530	1425	1938	1828	1687	1549	1271	1653
	8	2049	1849	1715	1580	1660	1732	1636	1557	1518	1660
	7	1807	1914	1707	1496	1530	1766	1812	1753	1515	1502
	6	1960	1897	1749	1803	1725	1730	1510	1710	1549	1681
	5	2038	1982	1936	1408	1588	1791	1569	1592	1371	1751
	4	1939	2103	1859	1750	1900	1890	1475	1482	1380	1561
	3	1971	1854	1764	1580	1652	1822	1725	1541	1534	1519
	2	1738	1935	1847	1774	1857	1828	1569	1434	1305	1630
	1	1800	1759	1776	1759	1783	1664	1858	1609	1782	1580
S1, İntak Bölgesi	10	2018	2051	1755	1833	1926	2000	1933	1984	1868	1826
	9	1969	1900	1720	1796	1641	1653	1734	1890	1830	1782
	8	1991	1906	1794	1783	1731	1848	1675	1784	1926	1763
	7	1902	1996	1861	1582	1446	1516	1845	1692	1757	1578
	6	2115	1831	1699	1670	1629	1741	1738	1814	1912	1692
	5	1846	2024	1782	1666	1667	1860	1786	1814	1757	1651
	4	1840	2256	1843	1640	1662	1839	1794	1820	1897	1782
	3	1751	1973	1645	1677	1690	1872	1871	1717	1808	1930
	2	1531	1800	1779	1532	1560	1806	1664	1726	1893	1937
	1	1519	1666	1788	1429	1453	1779	1513	1767	1878	2106

Çizelge EK 3.7. PSPA Sonuçları (Üst Tabaka). İnce Karışım ve Geçiş bölgesi (Sıcak Hava Koşullarında)

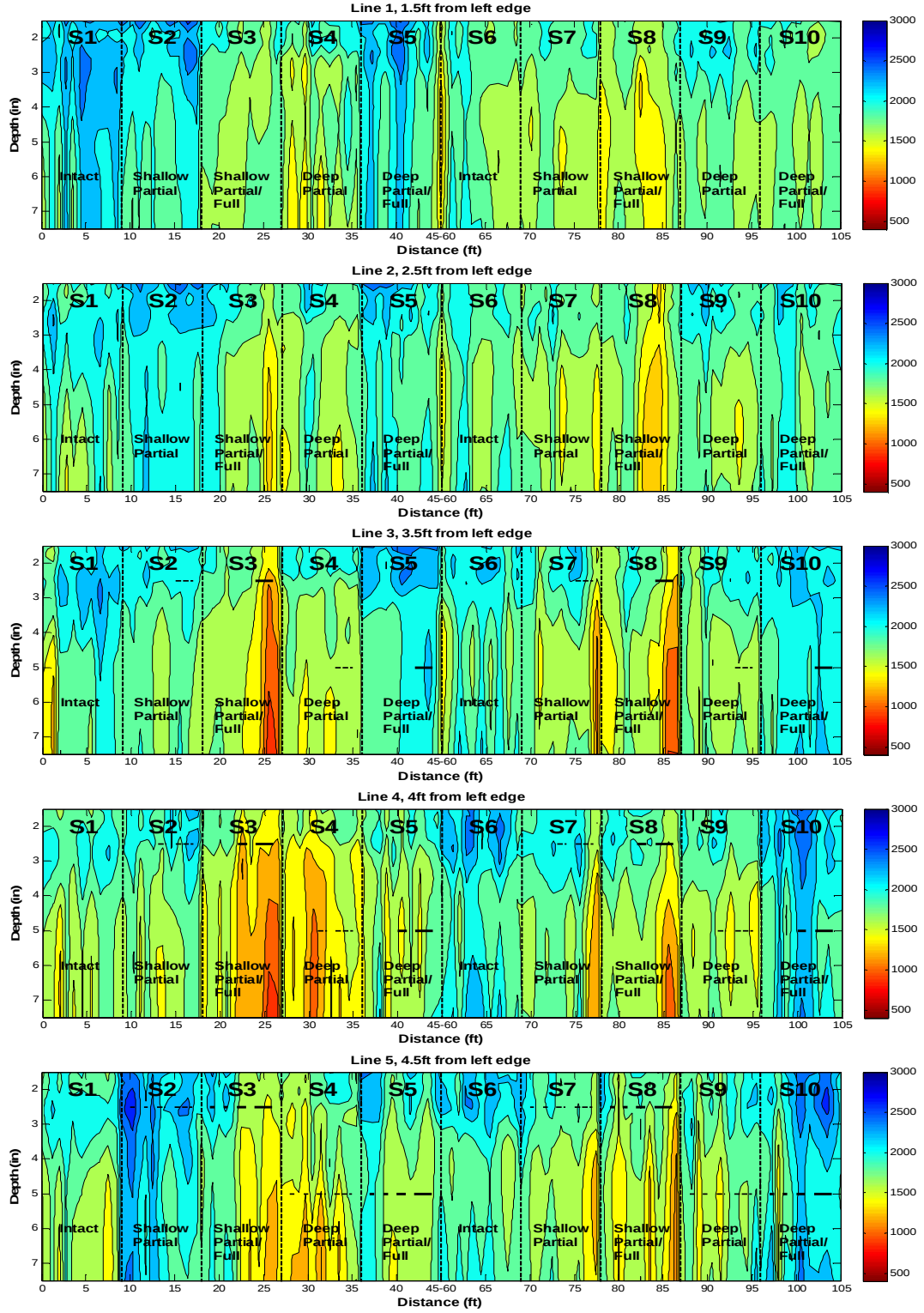
Kesit	Nokta No	PSPA Sismik Modülleri (6 cm için), ksi									
		Sıra 1	Sıra 2	Sıra 3	Sıra 4	Sıra 5	Sıra 6	Sıra 7	Sıra 8	Sıra 9	Sıra 10
S10, Derin ve Tüm Ayrışma	10	2106	2033	2260	2031	1812	1797	2023	2021	2085	1964
	9	2216	1832	1926	2150	1964	2178	1857	1728	1899	1688
	8	2048	2041	1974	2106	2209	2508	2387	1753	1842	1872
	7	2117	1946	1876	2305	2183	2047	1728	2131	1724	1680
	6	2059	2183	1957	2213	2034	2279	2056	2268	2294	1460
	5	1957	2344	2128	1826	2105	2066	2228	1898	1749	2164
	4	1953	2286	2074	1903	1930	2205	1959	1501	1552	1541
	3	2019	1744	1931	1911	1655	2221	2151	1855	1697	1894
	2	1872	1916	1997	1903	1983	1953	1795	1941	1758	1864
	1	1909	1993	1960	1955	1772	1954	1964	2190	1641	1966
S9, Derin ve Kısmi Ayrışma	10	1557	1884	1696	1507	2009	1824	1853	1811	1702	1645
	9	1471	1697	1837	2035	1558	1701	1963	1967	1763	1814
	8	1752	1746	1624	1696	2180	2262	1856	1944	1719	1736
	7	1887	1588	1619	1622	2139	2026	2120	1759	1740	1838
	6	1702	2053	1760	2099	2065	2091	1880	2050	1949	1867
	5	1738	1685	1882	1964	2070	2533	2231	1877	1940	1988
	4	1622	2006	1690	1853	2049	2078	1955	1852	2116	1832
	3	1688	1619	1816	1587	1581	1980	1956	2111	1966	1982
	2	1604	1799	1754	1592	1673	1936	1966	2141	1945	1914
	1	1665	1752	1626	1827	1776	1902	1858	1706	1383	1428
S8, Yüzeysel ve Tüm Ayrışma	10	1901	1840	1666	1323	1377	2280	1641	1702	1484	1548
	9	1866	1871	1525	1438	1392	1930	2081	1680	1399	1522
	8	1682	1881	1671	1967	1690	1799	1735	1583	1473	1514
	7	1843	1861	1966	2125	1674	1896	1750	1637	1901	1668
	6	1765	1726	2020	2111	1803	2078	1770	1853	1737	1617
	5	2061	2071	1732	2020	1808	2062	1851	1718	1860	1733
	4	2218	1942	2138	1918	1777	2289	1790	1671	1880	1711
	3	1837	1764	2008	1615	1678	1856	1727	1974	1421	1529
	2	1829	1845	1872	2074	2074	2234	1736	1554	1735	1653
	1	1665	1785	1923	1803	2094	2031	2040	1688	1858	1784
S7, Yüzeysel ve Kısmi Ayrışma	10	1653	1827	1466	1333	1825	1967	1614	1498	1582	1375
	9	1729	1700	1313	1444	1458	2075	1872	1633	1797	1784
	8	1594	1487	1665	1888	1936	1492	1732	1850	1523	1632
	7	1412	1514	1555	1483	1751	1727	1709	1845	1558	1765
	6	1995	1799	1756	1881	2116	1730	1785	1668	1715	1711
	5	1639	1974	1895	2081	1954	1954	1658	1939	1994	1877
	4	1688	1994	1913	2313	1884	1938	1960	1930	1932	1611
	3	1343	1905	2024	2010	2069	1844	1795	1722	1589	1696
	2	1525	1883	1800	1832	2140	1939	1650	1652	1873	1611
	1	1800	1677	2014	1546	1963	2211	1737	1739	1758	1677
S6, İntak Bölgesi	10	1435	1754	1661	1946	1759	1841	1622	2032	1701	2366
	9	1587	1988	1962	1897	1896	1889	1756	1719	1914	2254
	8	1858	1691	1729	1840	1579	1836	1667	1936	2249	2029
	7	1720	1784	1841	1722	1888	1857	1641	2000	1899	1864
	6	1811	1999	2177	2009	1904	1900	2042	2059	1987	2002
	5	1638	1978	1719	1886	1763	1800	2007	1862	1991	1884
	4	1380	2005	1910	1988	1767	2143	1910	1870	1997	1915
	3	2775	2076	2210	2107	1504	1792	1872	1926	1599	1805
	2	2171	1766	1946	1899	1690	1923	1846	1841	1903	1983
	1	1491	2077	1883	1948	1938	2016	1803	1929	1793	2072

Çizelge EK 3.7 Devam. PSPA Sonuçları (Üst Tabaka). İnce Karışım ve Geçiş bölgesi (Sıcak Hava Koşullarında)

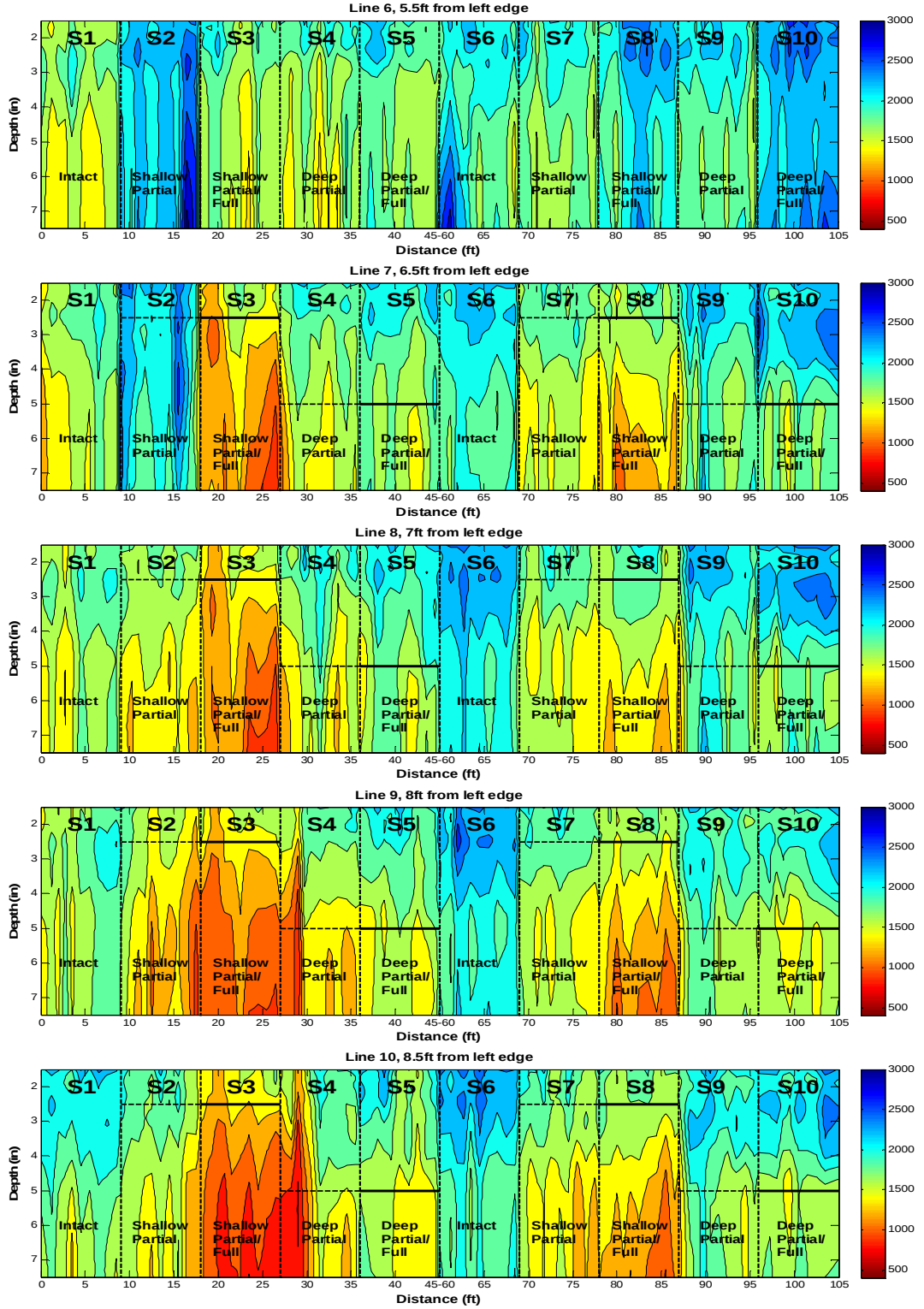
GEÇİŞ	15	1337	1586	1550	1584	1426	1937	2554	2272	1836	2060
	14	1456	1712	1630	1678	2170	3233	2127	2342	2531	2074
	13	1462	1400	1309	1673	1651	1497	2215	2413	1718	2031
	12	1463	1742	1592	1526	1590	1899	1527	1881	2028	2220
	11	1508	1151	1371	1381	1521	1982	1877	1932	1875	2338
	10	1542	1472	1742	2015	1950	1863	2421	2570	1753	1994
	9	1164	1428	1813	2022	1705	2274	2115	2361	1791	2056
	8	1657	1791	2138	1747	1594	1313	1410	1560	1491	1630
	7	1870	2306	2070	1789	1346	2022	1584	1609	1966	2113
	6	1960	1761	2010	1968	1338	1609	1798	1370	1723	1890
	5	1698	1782	2312	1839	1399	1765	1649	1807	1941	1570
	4	1648	2022	1883	2011	1989	1849	2029	2448	2025	2439
	3	2144	1945	1955	1875	2049	2063	2170	2044	2090	1954
	2	1930	2096	2027	1878	2079	2166	2201	2174	1991	1748
	1	2111	2078	2095	1987	2057	2053	2023	2434	1916	2108

Çizelge EK 3.8. PSPA Sonuçları (Üst Tabaka). İri Karışım (Sıcak Hava Koşullarında)

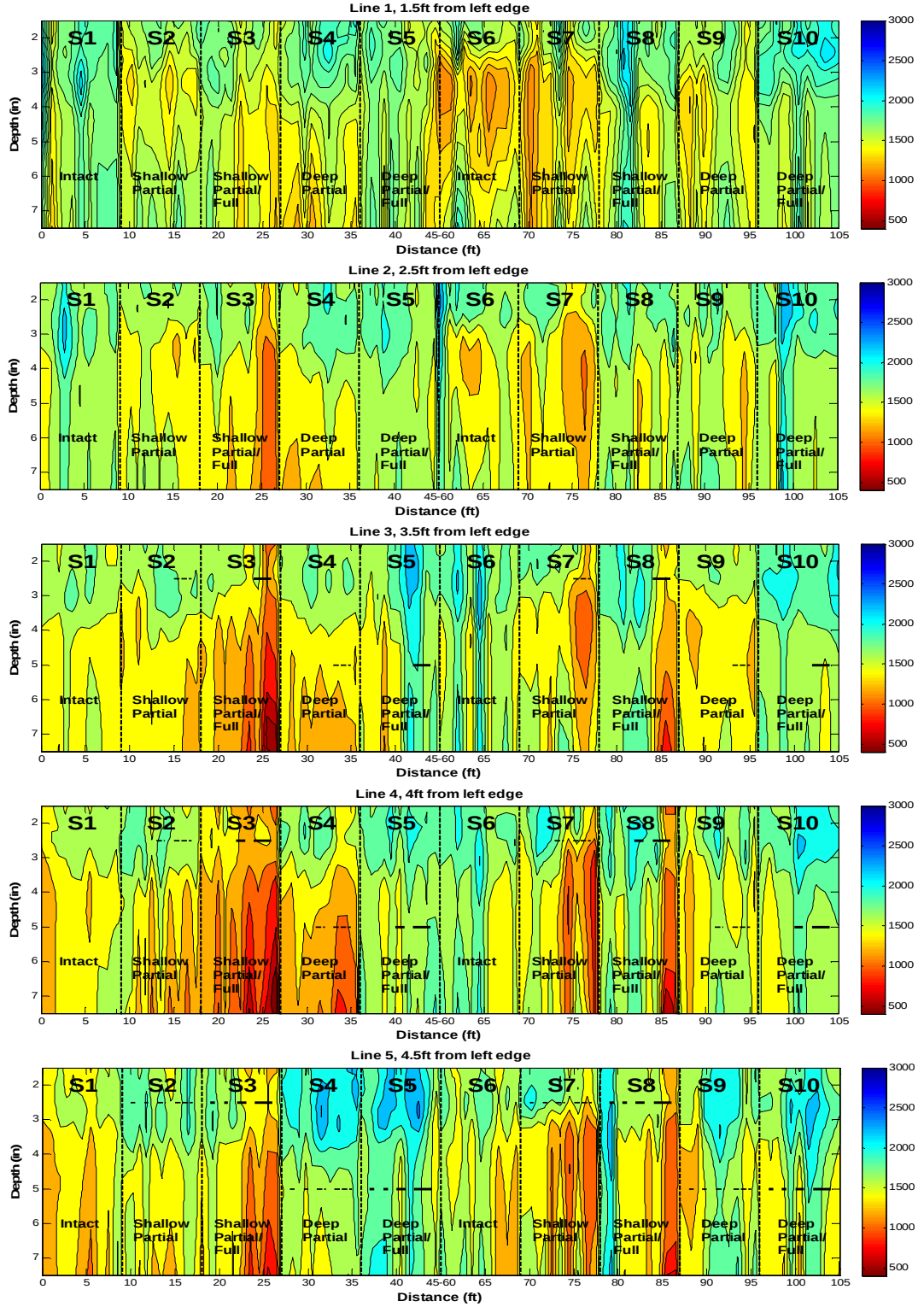
Kesit	Nokta No	PSPA Sismik Modülleri (6 cm için), ksi									
		Sıra 1	Sıra 2	Sıra 3	Sıra 4	Sıra 5	Sıra 6	Sıra 7	Sıra 8	Sıra 9	Sıra 10
S5, Derin ve Tüm Ayrışma	10	1465	1745	1771	1890	1626	1766	1906	1875	1644	1927
	9	1816	1679	1840	1990	2109	1725	1938	1973	1919	2046
	8	1555	1601	2257	1983	2404	2215	1786	1806	1989	2265
	7	1551	1843	2324	2080	2390	2346	2152	2127	2129	1859
	6	1786	1872	2040	1832	2188	2355	2308	2298	2076	2215
	5	1715	1898	1941	2126	2325	2364	2264	2261	1954	2013
	4	1822	2069	1785	1961	2238	2123	2152	2225	2147	1856
	3	1836	1846	1725	1836	2050	1985	1933	2044	1924	1922
	2	1939	1980	1616	1903	1875	2082	1946	2048	1776	1896
	1	1628	1722	1901	1783	2026	2042	1882	1981	1769	1853
S4, Derin ve Kısmi Ayrışma	10	2079	1899	1948	1709	1802	1960	1916	2108	1988	1966
	9	2100	1927	2051	1897	2026	2071	2021	1972	1970	1874
	8	1940	1885	1941	1874	2097	1882	1918	1755	1917	1972
	7	2027	1863	2021	1752	2063	2136	1899	2043	1902	1922
	6	1942	2090	1914	1740	1866	1722	1989	2194	1959	2120
	5	2193	2114	2040	1502	1892	1968	2000	1859	1938	1787
	4	1691	2269	2106	1617	1595	2139	2103	2223	1952	1492
	3	1938	1961	1950	1823	1767	1838	2139	1830	1482	1189
	2	1785	1824	2081	1600	1655	1840	1902	1758	1710	1711
	1	2085	1827	2008	1795	1848	1976	1777	1956	1724	1552
S3, Yüzeysel ve Tüm Ayrışma	10	1515	1574	1599	1383	1642	1600	1510	1541	1824	1483
	9	1682	1350	1223	1523	1403	1706	1554	1594	1596	1624
	8	1776	1569	1740	1447	1615	1778	1504	1551	1579	1379
	7	1669	1864	1617	1378	1585	1937	1577	1574	1721	1368
	6	1552	1707	1723	1402	1543	1464	1571	1638	1444	1444
	5	1791	1784	1811	1528	1933	1888	1631	1668	1559	1400
	4	1729	1664	1835	1676	1625	1929	1412	1259	1394	1671
	3	1776	2068	1732	1411	1680	1857	1176	1337	1508	1541
	2	1782	1956	1806	1608	1923	1536	1163	1208	1236	1581
	1	1836	1645	1753	1538	1695	1759	1528	1460	1586	1570
S2, Yüzeysel ve Kısmi Ayrışma	10	1742	1713	1831	1758	1741	1956	2175	1729	1459	1769
	9	1563	1751	1735	1659	2152	1900	1911	1797	1429	1811
	8	1630	1799	1831	1679	1748	1842	1836	1689	1638	2076
	7	1563	1596	1809	1893	1546	2004	2036	1878	1631	1630
	6	1792	1758	1957	1835	1882	1916	1604	1792	1702	1836
	5	1767	1744	1927	1612	1724	1975	1939	1724	1481	2026
	4	1666	1815	1440	1908	1998	2082	1863	1727	1644	1758
	3	1629	1632	1430	1882	1868	1700	2021	1759	1694	1785
	2	1561	1722	1572	1892	1912	1825	2115	1757	1500	1734
	1	1471	1596	1688	1806	1918	1759	2081	1684	1841	1712
S1, İntak Bölgesi	10	1956	1962	1603	1709	1706	1852	1589	1856	1783	1723
	9	1797	1767	1614	1727	1645	1592	1603	1784	1731	1613
	8	1863	1782	1773	1765	1692	1697	1624	1572	1748	1732
	7	1858	1772	1908	1659	1492	1507	1755	1617	1580	1545
	6	1940	1754	1726	1743	1603	1752	1614	1772	1778	1711
	5	1799	1917	1782	1678	1628	1846	1766	1832	1649	1624
	4	1710	2222	1700	1636	1556	1895	1710	1865	1870	1613
	3	1734	1876	1600	1635	1754	1758	1776	1745	1726	2004
	2	1502	1760	1793	1625	1535	1697	1591	1698	1783	1786
	1	2252	1718	1759	1438	1480	1768	1475	1653	1698	1890



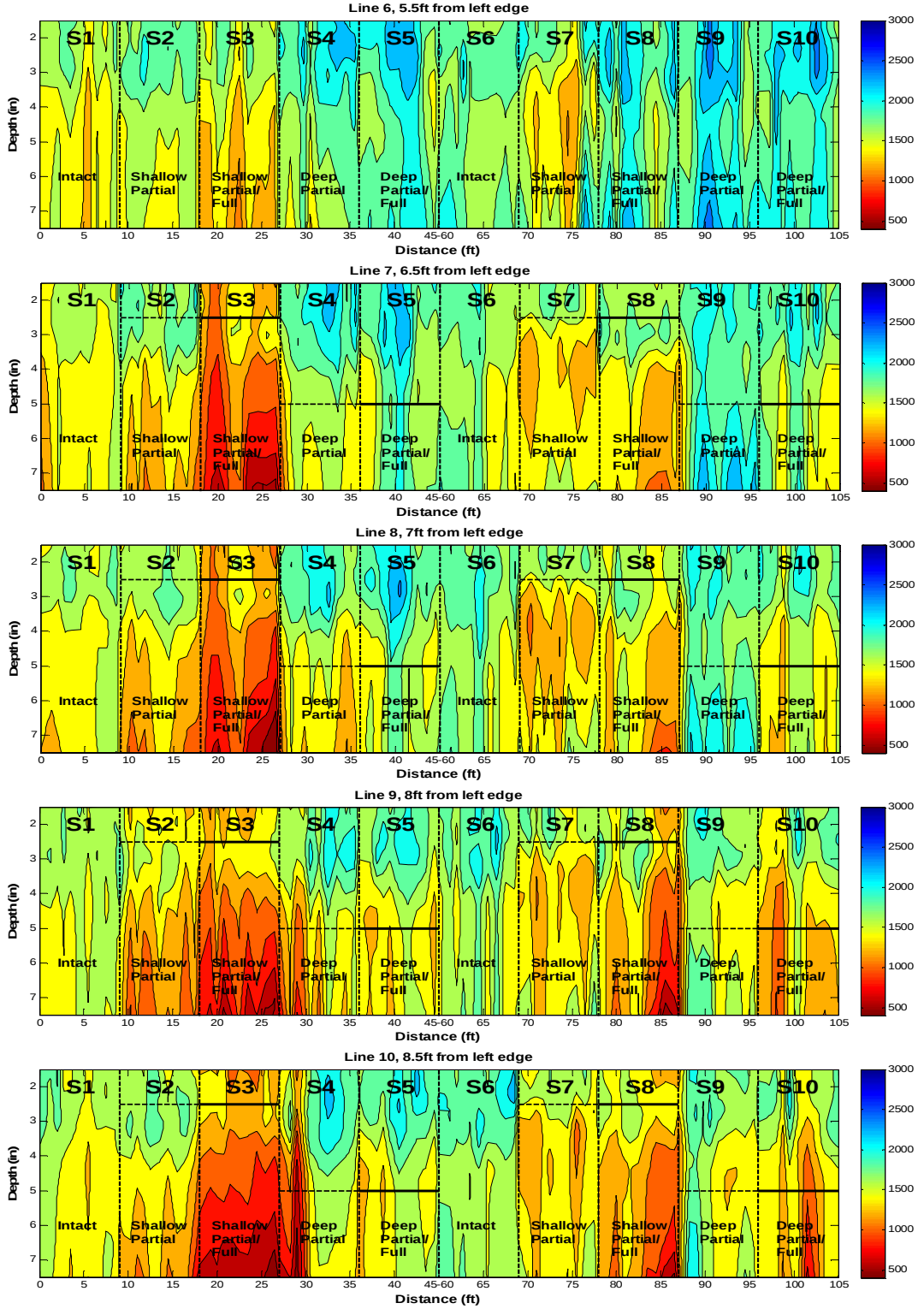
Şekil EK 3.1. Geniştirilmiş Deneylerin Dağılım Eğrileri (Soğuk hava koşulları altında – En Kesit)



Şekil EK 3.1 Devam. Genişleştirilmiş Deneylerin Dağılıma Eğrileri (Soğuk hava koşulları altında – En Kesit)



Şekil EK 3.2. Genişleştirilmiş Deneylerin Dağılıma Eğrileri (Sıcak hava koşulları altında – En Kesit)



Şekil EK 3.2 Devam. Genişleştirilmiş Deneylerin Dağılıma Eğrileri (Sıcak hava koşulları altında – En Kesit)

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Fadime Selcan ÖZEN
Doğum Tarihi : 16/04/1980
Doğum Yeri : Yalvaç
Medeni Hali : Evli
Yabancı Dili : İngilizce



Eğitim ve Akademik Durumu:

Lise : 1995-1998 Isparta Gürkan Süper Lisesi / Ş.A.İ.K. Lisesi
Lisans : 1998-2002 Süleyman Demirel Üniversitesi İnşaat Müh. Bölümü
Yüksek Lisans : 2003-2005 Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Müh. Anabilim Dalı

Çalıştığı Kurumlar:

2004 – 2010 : Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Araştırma
Görevlisi
2010 - ... : T.C. Ulaştırma Bakanlığı Demiryollar, Limanlar ve Hava
Meydanları İnşaatı Genel Müdürlüğü

Yayınlar:

Uluslar arası hakemli dergilerde yayınlanan makaleler :

M. Saltan, **F.S. Fındık**, “Stabilization of Subbase Materials with Waste Pumice in Flexible Pavement”, Building and Environment, 43 (4), 415–421, 2008.