

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**





KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce

Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : / /

Tezin Savunma Tarihi : / /

Tez Danışmanı :

Trabzon

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında

Mehmet Tevfik SEFEROĞLU Tarafından Hazırlanan

**BETON ÜSTÜ ASFALT KAPLAMALARDA OLUŞAN YANSIMA ÇATLAKLARININ
İNCELENMESİ**

**başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 24 /09/2019 gün ve 1820 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda
DOKTORA TEZİ
olarak kabul edilmiştir.**

Jüri Üyeleri

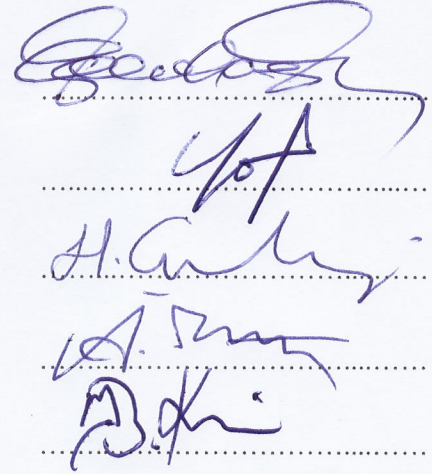
Başkan : Prof. Dr. Şakir ERDOĞDU

Üye : Prof. Dr. Muhammet Vefa AKPINAR

Üye : Prof. Dr. Hamdullah ÇUVALCI

Üye : Prof. Dr. Ahmet TORTUM

Üye : Prof. Dr. Baha Vural KÖK



Prof. Dr. Asim KADIOĞLU

Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Bu tez Karadeniz Teknik Üniversitesi Hızlandırılmış Yol Testi Tesisinde yaptığımız ekip çalışması neticesinde oluşmuştur. Tesisini kuran, kullanmamıza izin veren, tezimin başından sonuna kadar süre sınırı olmadan tavsiye ve önerilerini esirgemeyen, her türlü bilgi ve deneyimlerini tarafıma alçakgönüllülükle açan danışman hocam Prof. Dr. Muhammet Vefa AKPINAR'a minnet ve şükranlarımı sunarım.

Bu tez literatür, TÜBİTAK proje başvuru süreci ve deneyler ile birlikte 3 yıllık bir emeğin sonucudur. 3 yıl boyunca her aşamasını birlikte başardığım, değerli dostum Dr. Muhammet ÇELİK'e ayrıca teşekkür ederim.

Deneyler için gerekli maddi destek 217M481 numaralı TÜBİTAK 1001 Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projeleri Destekleme Programı ve Karadeniz Teknik Üniversitesi Öğrenci Yetiştirme Programı tarafından sağlanmıştır. Trabzon Büyükşehir Belediyesi'nin (TBB) ekipman ve malzeme konusunda sağladığı her türlü desteğin bu tezin oluşmasına katkısı büyüktür. Bu tezde Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği'nin ve Hassas El Torna firmalarının da değerli katkıları bulunmaktadır. Buradan her birine desteklerinden ötürü teşekkürü bir borç bilirim. Çalışmaya fikirleriyle destek veren, değerli tez izleme komitesi hocalarım Sayın Prof. Dr. Şakir ERDOĞDU ve Sayın Prof. Dr. Hamdullah ÇUVALCI'ya teşekkürlerimi sunarım.

Tezin deneysel çalışmalarında ve yazım aşamasında bana bizzat yardımcı olan, fikir ve bilgilerini paylaştığım hocam, biricik eşim ve hayat arkadaşım Dr. Öğr. Üyesi Ayşegül Güneş SEFEROĞLU başta olmak üzere, değerli dostlarım Dr. Öğr. Üyesi Hasan SESLİ, Dr. Öğr. Üyesi Serhat DEMİR, Dr. Ahmet KUVAT, Arş. Gör. Ufuk KANDİL, Arş. Gör. Sinan NACAR, ayrıca çalışma boyunca fikren ve fiziken yardımlarını esirgemeyen İnş. Tek. Hasan Tahsin SELİM'e, meslektaşım Fatih DOKUMACI'ya, iş insanı Ali Osman KOÇ'a ve TBB'nin asfalt serim ekibine teşekkürlerimi sunarım.

Tüm hayatımın en büyük destekçileri babam Necmettin SEFEROĞLU, annem Zübeyde SEFEROĞLU, kardeşim Dr. Kübra SEFEROĞLU KAYNAK ve İnş. Müh. Ensar SEFEROĞLU'na teşekkürlerimi sunarım.

Bu tezi, hayatıma girdikleri günden bu yana moral ve motivasyon kaynağım olan evlatlarım Mustafa Eymen, Yaren ve Furkan'a ithaf ediyorum. Sizlerin de bu günlerinizi görebilmek ümidiyle...

Mehmet Tevfik SEFEROĞLU
Trabzon, 2019

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum ‘‘Hızlandırılmış Yol Testi (HYT) ve Sonlu Elemanlar (SE) Yöntemi Kullanılarak Beton Üstü Asfalt Kaplamalarda Yansıma Çatlaklarının Araştırılması.’’ başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Muhammet Vefa AKPINAR’ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 16/10/2019

Mehmet Tefik SEFEROğLU

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET.....	IX
SUMMARY.....	X
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	XI
TABLolar DİZİNİ.....	XIX
SEMBOLLER DİZİNİ.....	XX
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.1.1. Çalışmanın Amacı.....	4
1.1.2. Çalışmanın Özgün Değeri.....	4
1.2. Türkiye’de Beton Yollar.....	6
1.3. Beton Kaplama Tasarım Yöntemleri.....	7
1.3.1. Derzli-Donatısız Beton Kaplamalar (JPCP).....	8
1.3.2. Derzli-Donatılı Beton Kaplamalar (JRCP).....	9
1.3.3. Sürekli Donatılı Beton Kaplamalar (CRCP).....	10
1.4. Beton Yollarda Derz Tasarımı.....	11
1.5. Derz Çeşitleri.....	13
1.5.1. Enine Derzler.....	13
1.5.2. Boyuna Derzler.....	13
1.5.3. Büzülme Derzleri.....	14
1.5.4. Genleşme Derzleri.....	14
1.5.5. Yapım (İnşaat) Derzleri.....	15
1.6. Beton Kaplamalarda Oluşan Gerilmeler.....	15
1.6.1. Sıcaklığa Bağlı Oluşan Gerilmeler.....	16
1.6.2. Sürtünme Gerilmeleri.....	16
1.6.3. Teker Yükü Gerilmeleri.....	17

1.7.	Yol Kaplamalarının Bakım-Onarımı.....	19
1.7.1.	Beton Kaplamaların Bakımı ve Rehabilitasyonu.....	19
1.8.	Takviye Tabakaları.....	22
1.8.1.	Beton Üstü İnce Asfalt Takviye Tabakaları.....	23
1.9.	Yansıma Çatlakları.....	24
1.9.1.	Yansıma Çatlaklarının Özellikleri.....	25
1.9.2.	Yansıma Çatlağı Oluşum Nedenleri.....	27
1.9.3.	Yansıma Çatlağı Oluşum Mekanizması.....	29
1.9.4.	Yansıma Çatlağı Oluşum Süresi ve Trafik Seviyesinin Etkisi.....	31
1.9.5.	Takviye Tabakası Kalınlığının Etkisi.....	33
1.9.6.	Temel ve Taban Zemini Desteğinin Etkisi.....	35
1.9.7.	Sıcaklığın Etkisi.....	36
1.9.8.	Yansıma Çatlağı Önleme/Geciktirme Yöntemleri.....	37
1.9.8.1.	Ara Tabaka Sistemleri.....	41
1.10.	Hızlandırılmış Yol Testi (HYT) Tesisleri.....	43
1.11.	HYT Tesisinde Kullanılabilecek Ölçüm Teknikleri.....	47
1.11.1.	Birim Şekil Değiştirme (BŞD) Ölçerler.....	47
1.11.2.	Basınç Ölçerler.....	50
1.11.3.	Deplasman Ölçerler.....	51
1.11.4.	Sıcaklık Ölçerler (Isılçiftler).....	52
1.12.	Yük Eşdeğerlik Faktörü (YEF)	53
1.13.	HYT Tesislerinde Kullanılan Tekerlek Basınçlarının ve Hızlarının Alınan Sonuçlara Etkisi.....	54
1.14.	Literatürde Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Yapılan Çalışmalar ve Sonuçları.....	55
1.15.	Literatürde HYT'de Yapılan Çalışmalar ve Sonuçları.....	61
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	63
2.1.	Birim Şekil Değiştirme (BŞD) Ölçer İmalatı.....	63
2.1.1.	BŞD Ölçer Tasarımının Yapılma Süreci.....	63
2.2.	Hızlandırılmış Yol Testi (HYT) Çalışmaları.....	74
2.2.1.	Hızlandırılmış Yol Testi Tesisinin Hazırlanması.....	74
2.2.2.	HYT Tesisinde Beton Yolun Hazırlanması.....	76
2.2.3.	HYT Aracının Hazırlanması.....	78

2.2.4.	Beton Yolda Deplasman Ölçümlerinin Alınması.....	79
2.2.5.	Derz Güçlendirmelerinin Uygulanması.....	81
2.2.5.1.	Kauçuk EPDM ve Is-Seal (RJF) Güçlendirme Yöntemi.....	81
2.2.5.2.	Kauçuk EPDM (RP) Güçlendirme Yöntemi.....	83
2.2.5.3.	Çelik Levha (SP) Güçlendirme Yöntemi.....	85
2.2.6.	BŞD Ölçer ve Sıcaklık Ölçerlerin Yerleştirilmesi.....	87
2.2.7	HYT Tesisinde Asfalt Kaplamanın Serilmesi.....	90
2.2.8.	Asfalt Kaplamaların HYT Test Aracıyla Yüklenmesi.....	97
2.2.9.	Asfalt Kaplamaların Ölçümlerinin Alınması.....	99
2.2.9.1.	Asfalt Kaplamada Deplasman Ölçümlerinin Alınması.....	99
2.2.9.2.	Asfalt Kaplamada BŞD Ölçümlerinin Alınması ve Yansıma Çatlaklarının Takibi.....	100
2.2.9.3.	Asfalt Kaplamada Tekerlek İzi Oluşumunun Takibi.....	101
2.2.9.4.	Asfalt Kaplamada Oluşan Gerilme Değerlerinin Takibi.....	102
2.3.	Sonlu Elemanlar (SE) Yöntemi.....	103
2.3.1.	Beton Kaplama Tasarımı.....	105
2.3.2.	Beton Üstü Asfalt Kaplama Tasarımı.....	108
3.	BULGULAR VE İRDELEME	113
3.1.	Birim Şekil Değiştirme Ölçerlerin Tasarım Sürecindeki Verileri.....	113
3.2.	Beton Kaplamalardan Alınan Ölçümler.....	123
3.2.1.	Düşey Deplasman Ölçümleri.....	125
3.3.	Asfalt Kaplamalardan Alınan Ölçümler.....	130
3.3.1.	Basınç Ölçerlerden Alınan Veriler.....	130
3.3.2.	Düşey Deplasman Ölçümleri.....	132
3.3.3.	Asfalt Kaplamadaki Tekerlek İzi Oluşumları ve Sıcaklık Ölçümleri.....	140
3.3.4.	Asfalt Kaplamalardaki BŞD Değerleri.....	151
3.3.4.1.	Batı Şeridindeki BŞD Değerleri.....	152
3.3.4.2.	Doğu Şeridindeki BŞD Değerleri.....	160
3.4.	SE Analiz Bulguları.....	170
3.4.1.	SE Modellerinin Boyut Analizi.....	170
3.4.2.	Beton Kaplama Modeli Sonuçları.....	172
3.4.3.	Derz Güçlendirme Elemanlarının Boyut Analizi.....	177
3.4.3.1.	RP Boyut Analizi.....	177

3.4.3.2.	SP Boyut Analizi.....	183
3.4.4.	Derz Güçlendirme Elemanlarının Beton Kaplama Derz Bölgesinde Oluşan Gerilmeler Üzerindeki Etkisi.....	188
3.4.4.1.	RJF Güçlendirme Türünün Etkisi.....	188
3.4.4.2.	RP Güçlendirme Türünün Etkisi.....	190
3.4.4.3.	SP Güçlendirme Türünün Etkisi.....	193
3.4.5.	Derz Güçlendirme Elemanlarının Karşılaştırması.....	195
3.5.	HYT Tesisi ve SE Analizinden Elde Edilen Bulguların Karşılaştırılması...203	
3.6.	Elde Edilen Sonuçların Literatürle Karşılaştırılması.....	204
4.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	206
5.	KAYNAKLAR.....	214
6.	EKLER.....	225
	ÖZGEÇMİŞ	

Doktora Tezi

ÖZET

BETON ÜSTÜ ASFALT KAPLAMALARDA OLUŞAN YANSIMA ÇATLAKLARININ
İNCELENMESİ

Mehmet Tevfik SEFEROĞLU

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Muhammet Vefa AKPINAR
2019, 224 Sayfa, 40 Sayfa Ek

Beton yollar üzerine yapılan ince asfalt kaplama yöntemlerinde en sık karşılaşılan problemlerden biri derz bölgelerinde oluşan yansima çatlaklarıdır. Literatürde, yansima çatlaklarının önlenmesi amacıyla asfalt içerikli ara tabaka sistemleri ya da kaplama boyunca serilen güçlendirme elemanlarının uygulandığı bilinmektedir. Ancak bu yöntemler, bir süre sonra yenilenme ihtiyacı duymakta veya ekonomik olmayan sonuçlar doğurmaktadır.

Bu tez kapsamında, beton yolların sadece tam derz bölgelerinde kauçuk dolgu (RJF), çelik (SP) ve kauçuk levha (RP) güçlendirme malzemeleri kullanılarak beton üstü ince asfalt kaplamalarda meydana gelen yansima çatlaklarının engellenmesi ya da geciktirilmesi üzerine araştırmalar yapılmıştır. Araştırmalar, sonlu elemanlar (SE) yöntemi ve arazideki gerçek yükleme koşullarının temsil edilebildiği Hızlandırılmış Yol Testi (HYT) tesisi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. HYT tesisindeki beton yolun tam derz bölgeleri RJF, SP ve RP malzemeleriyle güçlendirildikten sonra üzeri 50 ve 100 mm kalınlığındaki ince asfaltla kaplanmıştır. Yol platformu iki ayrı şerit halinde hazırlandıktan sonra her bir şerit 1,192,000 ESAL karşılığı olan 100,000 geçişe tabi tutulmuştur. Deneyler süresince, asfalt kaplamada oluşan yansima çatlakları, gerilme, düşey deplasman ve birim şekil değiştirme (BŞD) değerleri ölçülmüştür. SE yöntemiyle derz güçlendirme elemanlarının optimum genişlikleri tespit edilmiş, hareketli yük modeli kullanılarak HYT'de yapılan testler doğrulanmıştır.

Sonuçlar değerlendirildiğinde, asfalt kaplamada oluşan gerilmeler ve BŞD ölçümleri açısından en iyi derz güçlendirme yönteminin RJF olduğu tespit edilmiştir. Tam derz bölgelerinde yansima çatlağı oluşumunun engellenmesi için 100 mm asfalt kalınlığının daha uygun olduğu, RP ve SP güçlendirme yöntemlerinin yansima çatlağı oluşumunu engelleyemedikleri belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Hızlandırılmış Yol Testi, Yansima Çatlakları, Beton Üstü Asfalt Kaplama, Sonlu Eleman Yöntemi, Derz Güçlendirme

PhD. Thesis

SUMMARY

INVESTIGATION OF REFLECTIVE CRACKING OF ASPHALT OVERLAY ON CONCRETE
PAVEMENTS

Mehmet Tefrik SEFEROĞLU

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural Sciences
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Muhammet Vefa AKPINAR
2019, 224 Pages, 40 Page Appendix

One of the most common problems encountered in thin asphalt overlays associated with joints in plain jointed concrete pavements is reflective cracking. It is known in the literature that asphalt-containing interlayer systems or reinforcing elements laid along the pavement are applied to prevent reflection cracks. However, these methods need renewal after a while or have non-economic results.

Within the scope of this thesis, studies are carried out to mitigate or delay reflective cracking of asphalt overlays over plain jointed concrete pavement construction joints through rubber filler (RJF), steel plate (SP) and rubber plate (RP) reinforcement materials. The researches were carried out using the Finite Element (FE) method and the Accelerated Pavement Test (APT) facility where real traffic loading conditions in the field can be represented. The construction joint areas of the concrete road pavement in the APT plant were reinforced with RJF, SP and RP materials and then covered with 50 and 100 mm thick asphalt overlays. After the road platform was prepared in two separate lanes, each lane was subjected to 100,000 passes, corresponding to 1,192,000 ESAL. The reflection cracks, vertical displacements, stresses and strains of asphalt overlays were measured during the experiments. The optimum widths of the joint reinforcement elements were determined by the FE method and using the moving load model, the tests performed at the APT facility were verified.

When the results were evaluated, it was found that the best joint reinforcement method was RJF in terms of stress and strain measurements. It was determined that 100 mm asphalt overlay thickness is more suitable for preventing reflective cracking in full depth construction joint areas and, RP and SP reinforcements cannot prevent reflection crack formation.

Keywords: Accelerated Pavement Test, Reflective cracks, Asphalt Overlay on Concrete Pavements, Finite Element Method, Joint Reinforcing

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1. Beton kaplama tipleri.....	7
Şekil 1.2. Derzli donatısız beton kaplama örneği.....	8
Şekil 1.3. Beton kaplamalarda kullanılan kayma ve bağ donatıları.....	9
Şekil 1.4. Derzli donatılı beton kaplama örneği.....	10
Şekil 1.5. Sürekli donatılı beton kaplama örneği.....	11
Şekil 1.6. Büzülme derzi ve istenilen çatlak.....	14
Şekil 1.7. Yapım derzleri.....	15
Şekil 1.8. Beton kaplamalarda sıcaklığa bağlı oluşan gerilmeler.....	16
Şekil 1.9. Beton plaklarda kritik teker yükleme bölgeleri.....	17
Şekil 1.10. İç ve kenar yükleme durumlarında oluşan çekme gerilmeleri.....	18
Şekil 1.11. Köşe yükleme durumlarında oluşan çekme gerilmeleri.....	18
Şekil 1.12. Rehabilitasyon zamanlama grafiği.....	20
Şekil 1.13. Farklı şiddet düzeylerindeki yansıma çatlakları.....	25
Şekil 1.14. Tekil ve çift yansıma çatlak oluşum aşamaları.....	26
Şekil 1.15. Asfalt kaplamalarda tekil ve çift yansıma çatlağının oluşumu.....	26
Şekil 1.16. Yansıma çatlağı oluşumunda beton plak hareketleri.....	28
Şekil 1.17. Yansıma çatlağı oluşum mekanizmaları.....	30
Şekil 1.18. Yansıma çatlaklarının enine ve boyuna derzlerde oluşumu.....	31
Şekil 1.19. Asfalt takviye tabakası yerleştirilmesinden sonraki yansıma çatlağı oluşuncaya kadar geçen zaman.....	32
Şekil 1.20. Farklı takviye tabakası kalınlıkları için zaman içinde oluşan yansıma çatlağı yüzdeleri.....	35
Şekil 1.21. Asfalt takviye tabakalarında oluşan yansıma çatlağı gelişim evreleri: (a) Yatay ve düşey BŞD'ler asfalt kaplama altında gelişir.(b) Kritik mikro çatlaklar asfalt altında gelişir ve asfalt içinden yansıma çatlağı olarak yukarı doğru büyür. (c) Yansıma çatlağının ilk evresi (Mod I) çatlak yüzeyden görünür. (d) Yansıma çatlağının 2. evresi (Mod II) çok sayıda çatlak ve bozulmuş yüzey.....	37
Şekil 1.22. Ara tabaka sistemi kullanılmasının yansıma çatlağı oluşumuna etkisi.....	41
Şekil 1.23. Avrupa'da HYT tesislerinin bulunduğu ülkeler.....	44

Şekil 1.24.	Amerika’da HYT tesislerinin bulunduğu eyaletler.....	44
Şekil 1.25.	Tipik bir BŞD sensör konfigürasyonu.....	48
Şekil 1.26.	Tokyo Sokki KM-100HAS H-BŞD ölçer.....	48
Şekil 1.27.	Dynatest Past-IIA H tipi BŞD ölçer.....	49
Şekil 1.28.	BŞD ölçerlerin kaplamalardaki çalışma prensibi.....	50
Şekil 1.29.	Yol kaplamalarında kullanılan basınçölçer modelleri.....	51
Şekil 1.30.	Yol kaplamalarında yatay ve düşey hareketleri ölçmede kullanılan LVDT’ler.....	52
Şekil 1.31.	a)Referans model, b)Kum tabakalı model, c)Çelik telle güçlendirilmiş model.....	57
Şekil 1.32.	ANSYS programı kullanılarak yükün adım adım uygulanması.....	58
Şekil 1.33.	CESAR-LCPC programı kullanılarak yükün adım adım uygulanması.....	59
Şekil 2.1.	BŞD ölçer üretiminde kullanılan ekipmanlar.....	64
Şekil 2.2.	Çelik levha türündeki SG-1 tasarımı.....	64
Şekil 2.3.	Çelik silindir asfalt kalıbı ve BŞD ölçer aparatı.....	65
Şekil 2.4.	Asfalt karışımın hazırlanıp kalıba konulması.....	66
Şekil 2.5.	SG-2 tasarımı.....	67
Şekil 2.6.	SG-3 tasarımı.....	67
Şekil 2.7.	Yeni asfalt kalıbının tasarımı.....	68
Şekil 2.8.	Hazırlanan asfalt numunesine otomobil yükünün uygulanması.....	69
Şekil 2.9.	SG-5 tasarımı.....	69
Şekil 2.10.	BŞD ölçerlerin ilk arazi denemeleri.....	70
Şekil 2.11.	Arazi çalışmalarının yapıldığı D010/E70 Devlet Sahil Yolu Trabzon Havalimanı çıkışı.....	71
Şekil 2.12.	Arazide BŞD ölçerlerin yerleştirilmesi.....	72
Şekil 2.13.	Arazide silindirle sıkıştırma işleminin yapılması.....	72
Şekil 2.14.	Farklı türdeki araçların geçişi sırasında araziye yerleştirilen BŞD ölçerlerden veri alınması.....	73
Şekil 2.15.	SG-5 tasarım aşamaları.....	74
Şekil 2.16.	Beton yoldan karot numunelerin alınması.....	76
Şekil 2.17.	Beton kaplamaların boyuna yönde şeritlere ayrılması.....	77
Şekil 2.18.	BŞD ölçerlerin total station ile yerlerinin belirlenmesi.....	78
Şekil 2.19.	Beton kaplama üzerine uygulanan basıncın ayarlanması.....	79
Şekil 2.20.	Deplasman ölçümlerinde kullanılan PLC ölçüm aleti.....	80

Şekil 2.21.	Derzlere yerleştirilen PLC'ler.....	81
Şekil 2.22.	Derze yerleştirilen kauçuk EPDM ve Is-Seal (RJF) malzemesi.....	82
Şekil 2.23.	Derze yerleştirilen kauçuk karolar.....	83
Şekil 2.24.	Derze yerleştirilen kauçuk karoların yerleşmiş görünümü.....	84
Şekil 2.25.	Kauçuk EPDM (RP) uygulanması.....	84
Şekil 2.26.	SG pullarının çelik levhaya yapıştırılması.....	86
Şekil 2.27.	Çelik levhaların derz bölgesine yapıştırılması.....	86
Şekil 2.28.	Üretimi tamamlanan BŞD ölçerler.....	87
Şekil 2.29.	BŞD ölçer yerlerinin işaretlenmesi.....	88
Şekil 2.30.	BŞD ölçer kablolarının derz içine yerleştirilmesi.....	88
Şekil 2.31.	Asfalt serimi öncesinde yerleştirilen tüm ölçüm cihazlarının görünümü...	90
Şekil 2.32.	Asfalt kaplama kalınlık ayarlamaları, a)Yükseklik ayarı, b)Kot çizgisinin çizilmesi.....	91
Şekil 2.33.	HYT test aracının dışarı çıkarılması.....	92
Şekil 2.34.	TBB'ye ait robotun tesise alınması.....	93
Şekil 2.35.	BŞD ölçerlerin ve basınç ölçerlerin tabanının asfalt kaplama ile desteklenmesi.....	93
Şekil 2.36.	Asfalt kaplama yüzeyinin teraziye alınması.....	94
Şekil 2.37.	Asfalt kaplamanın serilmesi.....	94
Şekil 2.38.	Asfalt kaplamanın sıkıştırılması.....	95
Şekil 2.39.	a)Boyuna şeritlerin boyanması b)Enine derzlerin boyanması.....	96
Şekil 2.40.	Ölçüm cihazlarının bulunması a)Metal tespit cihazıyla b)Total station aletiyle.....	96
Şekil 2.41.	Tespit edilen ölçüm aletlerinin boyanması ve geçiş güzergâhının belirlenmesi.....	97
Şekil 2.42.	HYT aracının teraziye alınması ve dış lastiklerin havasının indirilerek çelik ayakların üzerine oturtulması.....	98
Şekil 2.43.	Asfalt kaplama yüzeyine uygulanan basınç değerinin ölçülmesi.....	98
Şekil 2.44.	PLC ölçüm aletleri ve veri toplama cihazı.....	100
Şekil 2.45.	Teraziye alınan çelik masterla tekerlek izi oluşumunun ölçülmesi.....	102
Şekil 2.46.	Sokkia marka SDL serisi dijital nivo aletinin kullanılması.....	102
Şekil 2.47.	Yüklemeler sırasında asfalt kaplama yüzeyinden basınç ölçümü alınması.....	103
Şekil 2.48.	Sekiz düğüm noktalı eleman tipi.....	105
Şekil 2.49.	ANSYS beton kaplama geometrik modeli.....	106

Şekil 2.50.	Asfalt kaplama modelinin sonlu elemanlara bölünmüş hali.....	107
Şekil 2.51.	Beton kaplama modelinin sonlu elemanlara bölünmüş hali.....	108
Şekil 2.52.	RJF güçlendirme modeli.....	109
Şekil 2.53.	RP güçlendirme modeli.....	109
Şekil 2.54.	SP güçlendirme modeli.....	110
Şekil 2.55	a)20°C’de asfalt gerilme-BŞD grafiği, b)9°C’de asfalt gerilme-BŞD grafiği.....	111
Şekil 3.1.	Asfalt kaplama numunelerinin plaka yükleme deneyinde sıkıştırılması....	114
Şekil 3.2.	Plaka yükleme deney düzeneğinden elde edilen yük-BŞD eğrileri.....	115
Şekil 3.3.	Beton kaplama üzerindeki asfalt numunenin otomobil ile yüklenmesi.....	116
Şekil 3.4.	Beton kaplama üzerine yerleştirilen asfalt numunenin otomobil geçişi sırasında oluşan BŞD değerleri.....	117
Şekil 3.5.	Ahşap plaklar üzerindeki asfalt numunenin otomobil ile yüklenmesi.....	118
Şekil 3.6.	Süreksiz beton kaplama üzerine yerleştirilen asfalt numunenin otomobil geçişi sırasında oluşan BŞD değerleri.....	119
Şekil 3.7.	Arazide BŞD ölçerlerin yerleştirilmesi.....	120
Şekil 3.8.	Arazide silindire sıkıştırma sırasında enine BŞD ölçerlerden okunan veriler	120
Şekil 3.9.	Arazide silindire sıkıştırma sırasında boyuna BŞD ölçerlerden okunan veriler.....	121
Şekil 3.10.	Arazide farklı türdeki araçların geçişi sırasında BŞD ölçerlerden okunan veriler.....	122
Şekil 3.11.	Betondan alınan küp numuneler.....	123
Şekil 3.12.	Küp numunelerin kırılması.....	124
Şekil 3.13.	Beton basınç dayanım testinde elde edilen sonuçlar.....	124
Şekil 3.14.	HYT tesisinde PLC ölçüm aletlerinin yerleşimi.....	125
Şekil 3.15.	Beton kaplamaların yüklenmesi durumunda oluşan deplasman modları...	125
Şekil 3.16.	Batı şeridinde beton kaplama deplasman genliklerinin kıyaslanması.....	127
Şekil 3.17.	Doğu şeridinde beton kaplama deplasman genliklerinin kıyaslanması.....	129
Şekil 3.18.	Asfalt kaplamalarda oluşan basınç değişimi-geçiş sayısı ilişkisi.....	131
Şekil 3.19.	Batı şeridinde asfalt kaplama serimi sonrasında PLC-1 verileri.....	132
Şekil 3.20.	Batı şeridinde asfalt kaplama serimi sonrasında PLC-2 verileri.....	133
Şekil 3.21.	Batı şeridinde asfalt kaplama serimi sonrasında PLC-3 verileri.....	133
Şekil 3.22.	Batı şeridinde asfalt kaplama serimi sonrasında PLC-4 verileri.....	134
Şekil 3.23.	Batı şeridinde asfalt kaplama serimi sonrasında PLC-5 verileri.....	134

Şekil 3.24.	Batı şeridinde asfalt kaplama serimi sonrasında PLC-6 verileri.....	135
Şekil 3.25.	Batı şeridinde asfalt kaplama serimi sonrasında beton plak hareketlerinin yüklemelere göre değişimi.....	135
Şekil 3.26.	Doğu şeridinde asfalt kaplama serimi sonrasında beton plak hareketlerinin yüklemelere göre değişimi.....	138
Şekil 3.27.	Doğu ve Batı şeridinde asfalt kaplama serimi sonrasında beton plak hareketi.....	139
Şekil 3.28.	Batı şeridi 1. derzde (RJF) geçiş sayısına bağlı tekerlek izi oluşumu.....	141
Şekil 3.29.	Batı şeridi 2. derzde (RP) geçiş sayısına bağlı tekerlek izi oluşumu.....	142
Şekil 3.30.	Batı şeridi 3. derzde (SP) geçiş sayısına bağlı tekerlek izi oluşumu.....	142
Şekil 3.31.	Batı şeridi 3. derz bölgesinde tekerlek izi oluşumunun gösterimi.....	145
Şekil 3.32.	Batı şeridi 1. derz bölgesinde tekerlek izi oluşumunun gösterimi.....	145
Şekil 3.33.	Batı şeridi 2. derz bölgesinde tekerlek izi oluşumunun gösterimi.....	146
Şekil 3.34.	Doğu şeridi 1. derzde (RJF) geçiş sayısına bağlı tekerlek izi oluşumu.....	146
Şekil 3.35.	Doğu şeridi 2. derzde (RP) geçiş sayısına bağlı tekerlek izi oluşumu.....	147
Şekil 3.36.	Doğu şeridi 3. derzde (SP) geçiş sayısına bağlı tekerlek izi oluşumu.....	147
Şekil 3.37.	Doğu şeridi derz bölgelerinde oluşan tekerlek izi oluşumlarının gösterimi.....	148
Şekil 3.38.	Doğu ve Batı şeritlerinde 3. derz (SP) üstünde 100,000 geçiş (1,192,000 ESAL) sonrasında oluşan nihai tekerlek izi yükseklikleri.....	150
Şekil 3.39.	Asfalt kaplamalardan karot alınması.....	150
Şekil 3.40.	Batı şeridi (RJF) 1. derzde BŞD ölçümleri.....	155
Şekil 3.41.	Batı şeridi (RJF) 1. derzde yansımaya çatlağı ilerlemesi.....	155
Şekil 3.42.	Batı şeridi (RP) 2. derzde BŞD ölçümleri.....	156
Şekil 3.43.	Batı şeridi (RP) 2. derzde yansımaya çatlağı ilerlemesi.....	157
Şekil 3.44.	Batı şeridi (RP) 2. derzde yansımaya çatlağı son hali.....	157
Şekil 3.45.	Batı şeridi (SP) 3. derzde BŞD ölçümleri.....	158
Şekil 3.46.	Batı şeridi (SP) 3. derzde yansımaya çatlağı ilerlemesi.....	159
Şekil 3.47.	Batı şeridi çelik levhadaki BŞD ölçümleri.....	160
Şekil 3.48.	Doğu şeridi (RJF) 1. derzde BŞD ölçümleri.....	163
Şekil 3.49.	Doğu şeridi (RJF) 1. derzde yansımaya çatlağı ilerlemesi.....	164
Şekil 3.50.	Doğu şeridi (RP) 2. derzde BŞD ölçümleri.....	165
Şekil 3.51.	Doğu şeridi (RP) 2. derzde yansımaya çatlağı ilerlemesi.....	166
Şekil 3.52.	Doğu şeridi (RP) 2. derzde yansımaya çatlağı son hali.....	166
Şekil 3.53.	Doğu şeridi (SP) 3. derzde BŞD ölçümleri.....	167

Şekil 3.54.	Doğu şeridi (SP) 3. derzde yansıma çatlağı ilerlemesi.....	168
Şekil 3.55.	Doğu şeridi (SP) 3. derzde yansıma çatlağı son hali.....	168
Şekil 3.56.	Doğu şeridi çelik levhadaki BŞD ölçümleri.....	169
Şekil 3.57.	Mesh boyutunun deplasman değişimine etkisi.....	171
Şekil 3.58.	Mesh boyutunun BŞD değişimine etkisi.....	172
Şekil 3.59.	Mesh boyutunun gerilme değişimine etkisi.....	172
Şekil 3.60.	Beton kaplama modelinde sonuçların alındığı iz.....	173
Şekil 3.61.	Beton kaplama derz bölgesinde oluşan düşey ve boyuna yöndeki gerilmeler.....	174
Şekil 3.62.	Beton kaplama enkesiti boyunca düşey deplasman hareketi.....	175
Şekil 3.63.	Beton kaplama derzinde zamana bağlı oluşan modlar ve deplasman mertebesi.....	175
Şekil 3.64.	Beton kaplama düşey deplasman hareketinin SE ve HYT tesisindeki sonuçları.....	176
Şekil 3.65.	Farklı genişliklerdeki RP güçlendirmesinin 50 mm kalınlığındaki asfalt kaplama altında oluşan boyuna doğrultudaki gerilme değişimine etkisi....	178
Şekil 3.66.	Farklı genişliklerdeki RP güçlendirmesinin 50 mm kalınlığındaki asfalt kaplama altında oluşan düşey doğrultudaki gerilme değişimine etkisi.....	178
Şekil 3.67.	Farklı genişliklerdeki RP güçlendirmesinin 100 mm kalınlığındaki asfalt kaplama altında oluşan boyuna doğrultudaki gerilme değişimine etkisi...	179
Şekil 3.68.	Farklı genişliklerdeki RP güçlendirmesinin 100 mm kalınlığındaki asfalt kaplama altında oluşan düşey doğrultudaki gerilme değişimine etkisi.....	180
Şekil 3.69.	Farklı genişliklerdeki RP güçlendirmesinin 50 mm kalınlığındaki asfalt kaplama altında oluşan boyuna doğrultudaki BŞD değişimine etkisi.....	181
Şekil 3.70.	Farklı genişliklerdeki RP güçlendirmesinin 50 mm kalınlığındaki asfalt kaplama altında oluşan düşey doğrultudaki BŞD değişimine etkisi.....	181
Şekil 3.71.	Farklı genişliklerdeki RP güçlendirmesinin 100 mm kalınlığındaki asfalt kaplama altında oluşan boyuna doğrultudaki BŞD değişimine etkisi.....	182
Şekil 3.72.	Farklı genişliklerdeki RP güçlendirmesinin 100 mm kalınlığındaki asfalt kaplama altında oluşan düşey doğrultudaki BŞD değişimine etkisi.....	182
Şekil 3.73.	Farklı genişliklerdeki SP güçlendirmesinin 50 mm kalınlığındaki asfalt kaplama altında oluşan boyuna doğrultudaki gerilme değişimine etkisi....	183
Şekil 3.74.	Farklı genişliklerdeki SP güçlendirmesinin 50 mm kalınlığındaki asfalt kaplama altında oluşan düşey doğrultudaki gerilme değişimine etkisi.....	184
Şekil 3.75.	Farklı genişliklerdeki SP güçlendirmesinin 100 mm kalınlığındaki asfalt kaplama altında oluşan boyuna doğrultudaki gerilme değişimine etkisi....	184
Şekil 3.76.	Farklı genişliklerdeki SP güçlendirmesinin 100 mm kalınlığındaki asfalt kaplama altında oluşan düşey doğrultudaki gerilme değişimine etkisi.....	185

Şekil 3.77.	Farklı genişliklerdeki SP güçlendirmesinin 50 mm kalınlığındaki asfalt kaplama altında oluşan boyuna doğrultudaki BŞD değişimine etkisi.....	186
Şekil 3.78.	Farklı genişliklerdeki SP güçlendirmesinin 50 mm kalınlığındaki asfalt kaplama altında oluşan düşey doğrultudaki BŞD değişimine etkisi.....	186
Şekil 3.79.	Farklı genişliklerdeki SP güçlendirmesinin 100 mm kalınlığındaki asfalt kaplama altında oluşan boyuna doğrultudaki BŞD değişimine etkisi.....	187
Şekil 3.80.	Farklı genişliklerdeki SP güçlendirmesinin 100 mm kalınlığındaki asfalt kaplama altında oluşan düşey doğrultudaki BŞD değişimine etkisi.....	187
Şekil 3.81.	RJF güçlendirmesi ve 50 mm kalınlığındaki asfalt kaplamanın derz bölgesinde boyuna doğrultudaki gerilmelere etkisi.....	188
Şekil 3.82.	RJF güçlendirmesi ve 50 mm kalınlığındaki asfalt kaplamanın derz bölgesinde düşey doğrultudaki gerilmelere etkisi.....	189
Şekil 3.83.	RJF güçlendirmesi ve 100 mm kalınlığındaki asfalt kaplamanın derz bölgesinde boyuna doğrultudaki gerilmelere etkisi.....	189
Şekil 3.84.	RJF güçlendirmesi ve 100 mm kalınlığındaki asfalt kaplamanın derz bölgesinde düşey doğrultudaki gerilmelere etkisi.....	190
Şekil 3.85.	RP güçlendirmesi ve 50 mm kalınlığındaki asfalt kaplamanın derz bölgesinde boyuna doğrultudaki gerilmelere etkisi.....	191
Şekil 3.86.	RP güçlendirmesi ve 50 mm kalınlığındaki asfalt kaplamanın derz bölgesinde düşey doğrultudaki gerilmelere etkisi.....	191
Şekil 3.87.	RP güçlendirmesi ve 100 mm kalınlığındaki asfalt kaplamanın derz bölgesinde boyuna doğrultudaki gerilmelere etkisi.....	192
Şekil 3.88.	RP güçlendirmesi ve 100 mm kalınlığındaki asfalt kaplamanın derz bölgesinde düşey doğrultudaki gerilmelere etkisi.....	192
Şekil 3.89.	SP güçlendirmesi ve 50 mm kalınlığındaki asfalt kaplamanın derz bölgesinde boyuna doğrultudaki gerilmelere etkisi.....	193
Şekil 3.90.	SP güçlendirmesi ve 50 mm kalınlığındaki asfalt kaplamanın derz bölgesinde düşey doğrultudaki gerilmelere etkisi.....	194
Şekil 3.91.	SP güçlendirmesi ve 100 mm kalınlığındaki asfalt kaplamanın derz bölgesinde boyuna doğrultudaki gerilmelere etkisi.....	194
Şekil 3.92.	SP güçlendirmesi ve 100 mm kalınlığındaki asfalt kaplamanın derz bölgesinde düşey doğrultudaki gerilmelere etkisi.....	195
Şekil 3.93.	50 mm kalınlığında asfalt kaplama altında farklı güçlendirme modellerinin kullanılması durumunda ortaya çıkan boyuna doğrultudaki gerilmeler.....	196
Şekil 3.94.	50 mm kalınlığında asfalt kaplama altında farklı güçlendirme modellerinin kullanılması durumunda ortaya çıkan düşey doğrultudaki gerilmeler.....	197
Şekil 3.95.	100 mm kalınlığında asfalt kaplama altında farklı güçlendirme modellerinin kullanılması durumunda ortaya çıkan boyuna doğrultudaki gerilmeler.....	197

Şekil 3.96.	100 mm kalınlığında asfalt kaplama altında farklı güçlendirme modellerinin kullanılması durumunda ortaya çıkan düşey doğrultudaki gerilmeler.....	198
Şekil 3.97.	50 mm kalınlığında asfalt kaplama altında farklı güçlendirme modellerinin kullanılması durumunda ortaya çıkan boyuna doğrultudaki BŞD değerleri.....	199
Şekil 3.98.	50 mm kalınlığında asfalt kaplama altında farklı güçlendirme modellerinin kullanılması durumunda ortaya çıkan düşey doğrultudaki BŞD değerleri.....	199
Şekil 3.99.	100 mm kalınlığında asfalt kaplama altında farklı güçlendirme modellerinin kullanılması durumunda ortaya çıkan boyuna doğrultudaki BŞD değerleri.....	200
Şekil 3.100.	100 mm kalınlığında asfalt kaplama altında farklı güçlendirme modellerinin kullanılması durumunda ortaya çıkan düşey doğrultudaki BŞD değerleri.....	200
Şekil 3.101.	50 mm kalınlığında asfalt kaplama altında farklı güçlendirme modellerinin kullanılması durumunda beton kaplama deplasman hareketliliği.....	201
Şekil 3.102.	100 mm kalınlığında asfalt kaplama altında farklı güçlendirme modellerinin kullanılması durumunda beton kaplama deplasman hareketliliği.....	202

TABLULAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.1. Türkiye'de beton yol uygulamalarına örnek.....	6
Tablo 1.2. Ara tabaka malzemelerinin özellikleri.....	42
Tablo 1.3. Yansıma çatlağı iyileştirmeleri.....	42
Tablo 1.4. KTÜ-HYT ve ESAL ilişkisi.....	54
Tablo 1.5. Asfalt kaplamaların sonlu eleman modelinde kullanılan malzeme özellikleri.....	60
Tablo 1.6. Taban zemininin sonlu eleman modelinde kullanılan malzeme özellikleri.....	60
Tablo 1.7. ATLAS tesisinde alınan BŞD değerleri.....	61
Tablo 1.8. ATLAS tesisinde alınan tekerlek izi oluşum değerleri.....	61
Tablo 2.1. Asfalt karışım elek analizi.....	93
Tablo 2.2. Sonlu eleman modellerinin isimlendirmesi.....	104
Tablo 2.3. Sonlu eleman modeli malzeme özellikleri.....	107
Tablo 2.4. Sonlu eleman modeli asfalt kaplama gerilme-BŞD grafiğinin girdileri....	111
Tablo 3.1. Beton yol plaklarından alınan numunelerin 7 ve 28 günlük basınç dayanımları.....	124
Tablo 3.2. Batı şeridinde beton kaplamanın deplasman grafikleri.....	126
Tablo 3.3. Doğu şeridinde beton kaplamanın deplasman grafikleri.....	128
Tablo 3.4. Asfalt kaplamalar altında oluşan basınç değişimleri.....	130
Tablo 3.5. Doğu şeridinde 100 mm asfalt serimi sonrasında düşey deplasman verileri.....	137
Tablo 3.6. HYT tesisinde asfalt kaplamalardan yapılan geçişler ve sıcaklık değerleri.....	140
Tablo 3.7. Batı şeridinde 100,000 geçiş sonrasında oluşan tekerlek izi oluşumları...	143
Tablo 3.8. Doğu şeridinde 100,000 geçiş sonrasında oluşan tekerlek izi oluşumları..	149
Tablo 3.9. Asfalt kaplamalardan alınan karotlardan elde edilen BHA ve boşluk oranları.....	151
Tablo 3.10. Batı şeridindeki başlangıç ve bitiş geçişlerinde alınan BŞD ölçümleri.....	153
Tablo 3.11. Doğu şeridindeki başlangıç ve bitiş geçişlerinde alınan BŞD ölçümleri...	161
Tablo 3.12. HYT tesisi ve SE analizinden elde edilen BŞD değerleri.....	204

SEMBOLLER DİZİNİ

\$: Amerikan Doları
Al	: Alüminyum
AR	: Asfalt lastik
ARMI	: Kauçuk membran ara tabaka
BHA	: Birim hacim ağırlık
BSK, HMA	: Bitümlü sıcak asfalt karışım
BŞD, ϵ	: Birim şekil değiştirme
CBR	: Kaliforniya taşıma oranı
CP	: Beton kaplama
Cr	: Krom
CRCP	: Sürekli donatılı beton kaplamalar
Cu	: Bakır
e	: Boşluk oranı
E	: Elastisite modülü
ϵ	: Şekil değiştirme
EDBŞD	: Elektriksel dirençli birim şekil değiştirme
EPDM	: Etilen Propilen Dien Monomer
ESAL	: Eşdeğer teker dingil yükü
ESAL, ETDY	: Eşdeğer tek dingil yükü
Fe	: Demir
FOBŞD	: Fiber optik birim şekil değiştirme
FWD	: Düşen ağırlıklı deflektometre
GPR	: Yeraltı radarlar
HYT	: Hızlandırılmış yol testi
ISAC	: Gerilme emici kompozit ara tabaka
in	: İnç
İSFALT	: İstanbul Asfalt Fabrikaları A.Ş.
JPCP	: Derzli-donatısız beton kaplamalar
JRCP	: Derzli-donatılı beton kaplamalar
KGM	: Karayolları Genel Müdürlüğü
km/s	: Kilometre/saat
kN	: KiloNewton
kPa	: KiloPaskal
KTŞ	: Karayolu Teknik Şartnamesi
L	: Yük
LVDT	: Lineer değişen deplasman transdüser
MPa	: MegaPaskal
Ni	: Nikel
°C	: Santigrat derece
PCC	: Portland çimento kaplama
PLC	: Potansiyometrik lineer cetveller
pt	: En son servis indeksi
R	: Çökme
RJF	: Rubber joint filler

RP	: Rubber plate
RS 485	: Sinyal dönüştürücü
S	: Kabarma
SAMI	: Stress Absorbing Membrane Interlayer
SE	: Sonlu Elemanlar
SG	: Birim şekil değiştirme ölçer (strain gauge)
SN	: Üstyapı sayısı
SP	: Steel plate
T	: Sıcaklık
TBB	: Trabzon Büyükşehir Belediyesi
TÇMB	: Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği
TÜBİTAK	: Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu
ν	: Poisson oranı
YAV	: Yük aktarma verimliliği
YOGT	: Yıllık ortalama günlük trafik
σ	: Gerilme
Ω	: Ohm

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Beton yollar asfalt yollara kıyasla çok daha uzun servis ömrüne sahip olması, daha az bakım onarım gerektirmesi ve ağır tonajlı trafik yüküne karşı dayanıklı olması gibi avantajları bakımından özellikle ağır taşıt trafiğinin yoğun olduğu, sık sık bakım-onarım yapılmak zorunda olan şehir içi ve şehirlerarası yolların yapımında şüphesiz ki en uygun üstyapı kaplama tipidir. Fakat bu gibi pek çok üstünlüğünün yanı sıra en büyük sakıncası uzun servis ömrü sonunda sürüş konforu ve güvenliğini etkileyecek duruma gelen çatlak açıklıkları ve çatlakların büyüklüğüdür. Beton kaplamalarda destek kayıplarının neden olduğu göçme gibi hasarlar oluşmadığı sürece genellikle karşılaşılan hasar türü çatlak şeklinde olmaktadır. Çatlaklar, derz yapımı ile kontrol altına alınıyor olsa da sürüş konforunu etkilemeye başlayan çatlaklar genellikle doldurulmak suretiyle bakım işlemine tabii tutularak beton kaplamaların servis ömürleri arttırılmaktadır. Fakat çatlakların sürüş güvenliğini de etkilemeye başladığı durumlarda veya yolun servis ömrü sona erdiğinde kaplama tabakasının onarımına ihtiyaç vardır. Beton kaplama onarımı; hasarlı kısmın kesilip/kırılıp çıkartılması yerine aynı türden malzemeyle veya bitümden yama yapılması, frezeleme gibi yöntemlerle yapılabilmektedir. Beton kaplamanın, büyük bir alanında hasar olması durumunda ise beton yol plaklarının yerinden kaldırılması ve yeniden yapımı söz konusu olabilmektedir. Bu gibi durumlarda, yerinden kaldırma maliyeti, gerek trafiğin engellenmesi ve gerekse yeniden yapım maliyeti ve işçilik düşünülerek beton yol yapımından kaçınılmaktadır. İşte bu noktada tüm bu maliyetleri düşürecek ve uygulamada kolaylık sağlayacak bir yöntem duyulan ihtiyaç, ince asfalt takviye tabakaları kullanımıyla kompozit kaplama tasarımını gündeme getirmiştir. Asfalt takviye tabakaları hasarlı, servis ömrünü tamamlamış eski mevcut kaplama (asfalt betonu veya beton kaplama) üzerine ince asfalt kaplama serilmesi suretiyle bu hasarların giderilmesi ve yolun servis ömrünün uzatılmasını hedefleyen bir rehabilitasyon stratejisidir.

Esnek kaplamalar, servis ömürleri boyunca beton kaplamalara kıyasla daha sık bakım-onarımdan geçmektedir. Bunun başlıca nedenlerinden biri de alt zemin tabakalarında meydana gelen destek kayıpları olmaktadır. Beton kaplamaların onarımında asfalt takviye tabakaları kullanılarak esnek kaplamanın sürüş konforundan ve kayma

direncinden faydalanılırken, alttaki mevcut beton kaplamanın da sağlam bir destek tabakası görevi göreceği olması, esnek kaplamada alt zemin problemlerinden kaynaklanan hasarların azalmasına katkıda bulunacaktır. Böylece esnek kaplama tabakalarının bakım onarım sıklığı ve getireceği maddi külfet azaltılmış olacaktır.

Asfalt takviye tabakaları kullanarak beton kaplamaların onarımının yapılması ile başlıca; mevcut üstyapıya su girişinin engellenmesi, yüzey düzgünlüğünün azaltılması, yüzey kayma direncinin iyileştirilmesi, yapısal taşıma kapasitesinin artırılması ve toplam olarak sürüş konforu ve güvenliğinin artırılması amaçlanmaktadır. Bununla birlikte, bozulmuş bir yolun üzerine takviye tabakası yerleştirilmesi halinde eski kaplamada yer alan çatlaklar ve derzler gibi süreksizlik bölgeleri, yeni takviye tabakasında zayıflık zonu oluşturmaktadır. Trafik ve çevre koşulları nedeniyle takviye tabakası altında yer alan bu süreksizlikler boyunca gerilme yoğunlaşması meydana gelmekte ve takviye tabakasının eski kaplamadaki süreksizlik bölgeleri üzerine gelen noktalarında çatlaklar oluşarak bu tabakanın bozulmasına neden olmaktadır. Takviye tabakasına alttaki kaplamadan yansıyan bu çatlaklar “yansıma çatlağı” olarak bilinmektedir. Beton kaplama takviyelerinde yansıma çatlağı sıkça karşılan bir durum olup, takviye tabakasının başarısı, yansıma çatlaklarını karşılayabilmesiyle doğrudan ilişkilidir (Güngör vd., 2009). Yansıma çatlakları genel olarak bir kaplamanın yapısal kapasitesini düşürmese de, nem girişi, çevresel ve trafik etkileri ile ilk hasarlara ve daha sonra da kaplamanın bozulmasına sebep olabilir. Yansıma çatlakları ile zayıflayan kaplama sistemine su girişi başlayarak alt tabakalara doğru ilerler ve bu da kaplama yapısını zayıflatarak takviye tabakasında ilk deformasyonların oluşmasına neden olur. Genel olarak bu deformasyonlar kendilerini çatlakta sökülme (malzeme kaybı), inişli çıkışlı sürüş... vb şeklinde gösterirler (Walker, 2012).

Blankenship (2012)'e göre, yansıma çatlaklı kaplama, düşük sürüş konforunun yanı sıra düşük sürüş güvenliğine ve bakım onarım masraflarının artmasına sebep olabilir.

Farklı araştırmacılar tarafından, rijit kaplama derzlerinin asfalt takviye tabakalarında oluşturduğu yansıma çatlaklarını azaltmak için bir dizi çözüm önerilmektedir. Bunların çoğunluğu asfalt kalınlığı artışına, daha fazla çatlama dirençli asfalt kullanımına, geofabrik ara tabakalara, bitümlü ara tabakalara ve bunların kombinasyonuna dayanmaktadır. Fakat bu yöntemlerin başarısı, mevcut hasarlı kaplamanın durumu, çevresel faktörler, trafik yüklemesi gibi etkenlere bağlı olarak değişmektedir. Ayrıca çoğu durumda da bu onarım tekniklerinin birlikte kullanılması durumunda başarı sağlanmaktadır. Fakat bu durumda da onarım maliyetleri artmaktadır.

Yansıma çatlağı oluşumuna sebep olan esas faktörler sıcaklık ve trafik yüklemesidir. Bu faktörlerin iyi incelenmesi gerekmektedir. Araştırmacılar yansıma çatlağı önleme/geciktirme stratejilerini araştırırken sadece deneysel veya sayısal incelemeleri göz önüne alması sahada karşılaşılabilecek performansı gerçek olarak yansıtmamaktadır. Deneysel ve sayısal incelemelere ek olarak kompozit kaplamalarda yansıma çatlağı mekanizmasını daha iyi anlamak için, tam ölçekli testlerin de yapılması gerekmektedir (Mehta vd., 2017).

Bu çalışmada, derzli donatısız beton kaplamalar için onarım tekniği olarak mevcut hasarlı kaplama üzerine ince asfalt takviye tabakası yerleştirme stratejisi araştırılmıştır. Karadeniz Teknik Üniversitesi (KTÜ) hızlandırılmış yol testi laboratuvarında bulunan Hızlandırılmış Yol Test (HYT) tesisi kullanılarak arazi şartlarında ve gerçek ağır taşıt dingil yüklemesi ile hasarlı tam derzli donatısız beton kaplama üzerine yerleştirilen asfalt takviye tabakalarında meydana gelen yansıma çatlakları incelenmiştir. Yansıma çatlaklarının önlenmesi/geciktirilmesi amacıyla mevcut hasarlı beton plaklar arasındaki derzlerin farklı malzemelerle güçlendirilmesi stratejisi yöntem olarak seçilmiştir. Böylece derz süreksizliklerinin neden olduğu takviye tabakası yansıma çatlağı oluşumunun önüne geçilmesi hedeflenmiştir. Bu bağlamda plaklar arasında tam derz olarak bırakılan her bir enine derz boşluğu sırasıyla kauçuk EPDM-Is seal (RJF), kauçuk levha (RP) ve çelik levha (SP) ile güçlendirilmiştir. Ağır taşıt trafiğini simüle eden çift tandem teker ile hazırlanan kaplama tasarımının üzerinden 100,000 geçiş yapılmıştır. Test sistemine dâhil edilen ısılıçiftlerle ortam sıcaklıkları sürekli olarak kaydedilirken, plak derz köşelerine yerleştirilen potansiyometrik lineer cetveller (PLC) ile de her bir teker geçişinde plakta oluşan düşey deformasyonlar kaydedilmiştir. Mevcut beton plak ile asfalt takviye tabakası ara yüzeyine, enine derz hattı üzerine boyuna doğrultuda yerleştirilen birim şekil değiştirme (BŞD) ölçerler sayesinde de yük tekerrür sayısı-birim şekil değiştirme ilişkisi belirlenmiştir. Test sonunda yük tekerrürleri boyunca asfalt takviye tabasındaki yansıma çatlağı oluşum mekanizmaları, çatlak açıklıklarının ve şiddetlerinin teker yükü tekrar sayılarına bağlı olarak değişimleri incelenmiştir. Kullanılan üç farklı yöntemin yansıma çatlağı oluşumundaki etkileri değerlendirilerek hangi yöntemin yansıma çatlağı oluşumunun geciktirilmesi ya da engellenmesinde en etkili yöntem olduğu belirlenmiştir. Ayrıca arazi yükleme koşullarını simüle eden HYT yönteminin yanı sıra ANSYS sonlu elemanlar programı kullanılarak modellemeler yapılmış, güçlendirme elemanlarının geometrik boyutlarına bu modellerden elde edilen sonuçlara göre karar verilmiş ve HYT-SE modeli arasındaki sonuçlar kıyaslanmıştır.

1.1.1. Çalışmanın Amacı

Beton yollar üzerine yapılan ince asfalt kaplama yöntemlerinde en sık karşılaşılan problem yansıma çatlaklarıdır. Bu tez kapsamında, ince asfalt kaplamalarda meydana gelen yansıma çatlaklarının, HYT tesisinde kauçuk-dolgu, çelik levha ve kauçuk levha güçlendirme malzemeleri kullanılarak engellenmesi/geciktirilmesi amaçlanmaktadır.

Bu amaca ulaşabilmek için, çalışmada, farklı derz güçlendirme malzemeleri ve farklı asfalt kalınlıkları bir arada kullanılarak trafik tekerrür sayısına göre ideal tasarımın belirlenebilmesi hedeflenmektedir. Çalışmanın ana amacına ulaşabilmek için, gerçek trafik yüklerinin etkisini kısa sürede görebileceğimiz HYT tesisi kullanılmıştır. HYT tesisinde yapılacak çalışmalar esnasında, asfalt kaplama içerisinde meydana gelen gerilme ve birim şekil değiştirmeler takip edilerek, yansıma çatlaklarının oluşması ile ilgili neden-sonuç ilişkilerinin kurulması hedeflenmiştir. Bu bağlamda basınç, birim şekil değiştirme ve sıcaklık ölçüm cihazları ile asfalt kaplamada oluşan ilk çatlakların gelişmesi ve yansıma çatlama dönüşüm süreci incelenerek, kalınlık-ömür, güçlendirme malzemesi tipi-ömür ve trafik dingil tekerrür sayısı-çatlak parametreleri belirlenmiştir. Ayrıca HYT tesislerinin kullanımının ülke genelinde yaygınlaştırılması bu tezin hedefleri arasındadır. Bu çalışma sonunda elde edilen verilerin beton yolların iyileştirilmesiyle ilgili kullanılacak teknik şartnamelere rehber oluşturması hedeflenmektedir.

1.1.2. Çalışmanın Özgün Değeri

Yapılan literatür araştırmalarında, yansıma çatlaklarının engellenmesi için beton ile asfalt kaplama arasına çeşitli ara yüzey katmanlarının ve derz güçlendirme malzemelerinin (geogridler, çelik ızgaralar, geokompozitler) uygulandığı görülmüştür. Ancak bu yöntemde, beton derzlerinin üzerine gelen ara katman tabakaları da asfalt kaplamaya benzer bir imalat olduğu için yansıma çatlakları önce ara katmanda oluşmuş daha sonra bu yansıma çatlama bir üst tabakaya yani asfalt kaplamaya ulaşarak sorunun devam ettiği anlaşılmıştır. Derz güçlendirme malzemeleri ise kaplama boyunca uygulandığından ekonomik bir çözüm yöntemi olmamıştır. Bu çalışmada ise beton kaplama derz bölgeleri üzerine çelik ve kauçuk levhaların konmasıyla ve derz içerisine kauçuk-dolgu karışımının uygulanmasıyla birlikte bu bölgedeki süreksizlik giderilecek ve derz bölgelerinde oluşan

gerilmelerin yukarıya doğru çıkması engellenerek, yansıma çatlaklarının oluşumu engellenmeye çalışılmıştır.

Yansıma çatlaklarının engellenmesi için asfalt kalınlığının artırılması dünyada uygulanan bir yöntemdir. Ancak bu yöntemde de, iyileştirme maliyetlerinin arttığı ve istenilen düzeyde fayda sağlamadığı görülmüştür. Bununla beraber, asfalt kaplama kalınlığının artmasının tekerlek izi oluşumunun da artmasına neden olduğu görülmüştür. Bu çalışma kapsamında ise belirlenen derz güçlendirme malzemeleri ile birlikte en fazla 100 mm kalınlığında asfalt kaplama kullanılacak ve bu sayede hem maliyet düşürülecek hem de tekerlek izi oluşma potansiyeli azaltılacaktır.

Literatürde beton üstü asfalt kaplamalarda oluşan yansıma çatlağının engellenmesi için yapılmış araştırmalar incelendiğinde, derz güçlendirme malzemesi olarak çelik ve kauçuk levha malzemesinin kullanılmadığı görülmüştür.

Bu çalışmada seçilen derz güçlendirme malzemeleri, yapılan araştırmalar neticesinde kolay temin edilebilir, kolay uygulanabilir, uygun tasarım yapılması durumunda üretim ve uygulama maliyeti düşük aynı zamanda uzun ömürlü yüksek malzemeler olması sebebiyle tercih edilmiştir.

Kauçuk levhaların tasarımı, daha önce literatürde olmayan bir yöntemle hazırlanmıştır. Tasarımın “T” biçiminde yapılmasıyla birlikte derzin üstüne gelen kısımlar, beton plakların derz süreksizliğini giderecektir. Derzin içerisine yerleştirilen kısımlar ise derzlerdeki genleşme ve dinamik yükler göz önünde bulundurularak tasarlanmıştır.

Derz güçlendirme malzemesinden çelik levha daha rijit olduğu için kauçuk levha ise daha esnek olduğu için tercih edilmiştir. Bu sayede yansıma çatlaklarının engellenmesi için rijit bir malzemenin mi yoksa esneyebilen bir malzemenin mi kullanılmasının daha etkin olacağına karar verilecektir. Bu şekilde bilimsel literatüre önemli bir katkının sağlanacağı düşünülmektedir.

Dünyada yıllardır kullanılmasına rağmen ülkemizde daha yeni kurulmuş ve sadece KTÜ bünyesinde bulunan tam ölçekli HYT tesisinin kullanılması, bu çalışmanın diğer bir özgün yanını oluşturacaktır. Bu tesis sayesinde 10 ila 20 senelik yüklemeler bir yıldan kısa süre içerisinde yapılabilmektedir. Bu da kısa sürede farklı ince asfalt kalınlıkları için değişik derz güçlendirme kombinasyonlarının denenmesine ve karşılaştırılmasına imkân verecektir. Ayrıca bu çalışma, ileride ülkemizde yapılacak olan HYT çalışmalarının da öncüsü niteliğindedir.

Asfalt kaplamalarda ilk çatlakların görülmesi ve bu çatlakların yansıma çatlağına dönüşüm süreci, HYT sayesinde hızlı ve arazi şartlarındaki gibi yüklenerek incelenecektir. Bu sayede, dünya literatüründe fazlaca eksikliğini gördüğümüz yansıma çatlaklarının oluşum mekanizmaları hakkında yeni bilgiler sunulacaktır.

1.2. Türkiye’de Beton Yollar

Ülkemizde beton yol uygulamaları genellikle köy yollarında, belediyeler veya il özel idareleri tarafından yapılmış olup istatistiksel bir veri toplama havuzu sağlanamadığı için ortalama uzunluklar hakkında bilgi edinilememiştir. Türkiye’de özellikle Doğu Karadeniz Bölgesi’nde beton yol uygulamaları bulunmakta ancak yapıldıkları dönemde asgari koşullar altında inşa edildiğinden bir süre sonra bozulmalar gözlemlenmiştir. Bir bölümü ise kullanılmaya devam etmektedir. Adana, Ordu, Antalya ve Mersin gibi bazı şehirlerde caddeler ve şehir içi yollarda yapılmış beton yollar onarım gerektirmeden kullanılmaktadır. Günümüzde, beton yolların performansını belirlemek, uygulama şartlarını incelemek, üstünlük ve sakıncaları ile değerlendirebilmek amacıyla Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) tarafından beton yol deneme kesimleri yapılmıştır (URL-1). Beton yol uygulamasının yapıldığı pilot uygulama alanları ve özellikleri ile ilgili bilgiler Tablo 1.1’de verilmektedir.

Tablo 1.1. Türkiye’de beton yol uygulamalarına örnek

Yer	Afyonkarahisar-Emirdağ	Hasdal-Kemberburgaz	Ordu-Ulubey	Karamürsel
Uzunluk	2 km	3.5 km	1 km	1.6 km
Şerit sayısı	3	2	2×2	2×2
Yapım yılı	2004	2006	2007	2010

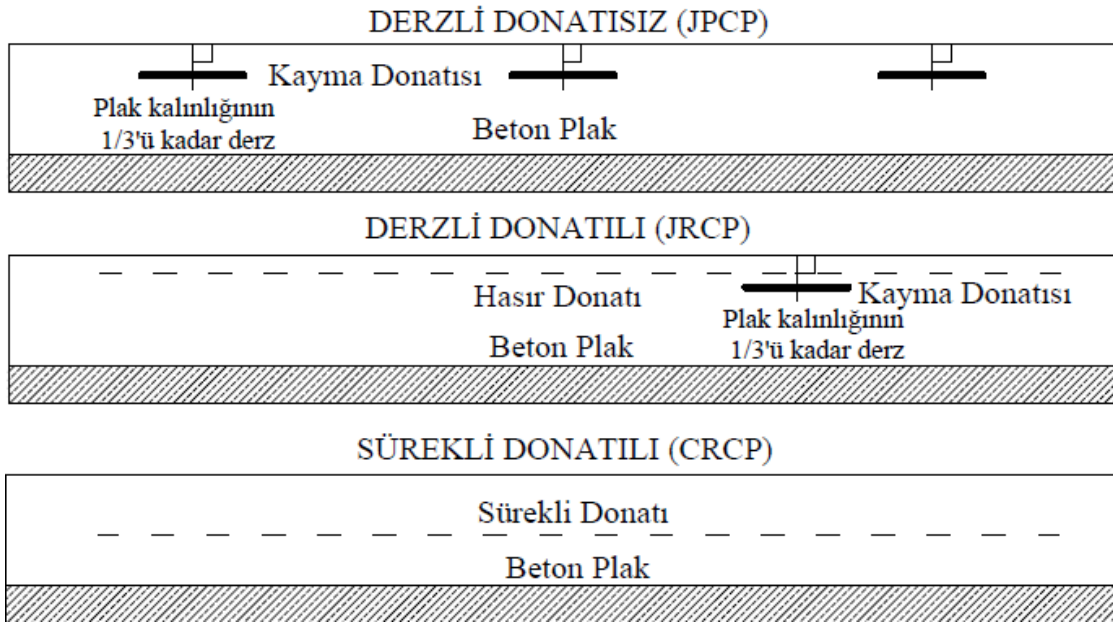
Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) ve Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği (TÇMB) işbirliğiyle Türkiye’nin ilk beton yolu 2004 yılında Afyonkarahisar’da yapılmıştır. Çoğu ağır tonajlı olmak üzere günlük ortalama 30,000’den fazla aracın geçiş yaptığı Afyonkarahisar-Ankara bölünmüş karayolunun, Afyonkarahisar’a gidiş yönünde 5. ile 7. kilometreleri arasına 2 km uzunluğunda ve 12 m genişliğinde inşa edilmiştir (URL-2, 2015).

1.3. Beton Kaplama Tasarım Yöntemleri

Beton kaplamalar, bir başka deyişle rijit kaplamalar veya beton yollar, bağlayıcı malzeme olarak Portland çimentosunun kullanıldığı yol üstyapısını ifade etmektedir. İlk beton yol 1891 yılında A.B.D.'nin Ohio Eyaleti'nin Bellefontaine şehrinde bir sokakta yapılmıştır. Yol halen hizmet vermeye devam etmektedir.

Beton kaplamalar genel olarak üç çeşide ayrılırlar (Şekil 1.1). Bunlar, çatlak kontrollerinin farklılığı, zeminin kalitesi ve harcanabilecek maddiyata bağlı olarak şekillenmişlerdir. Bunlar;

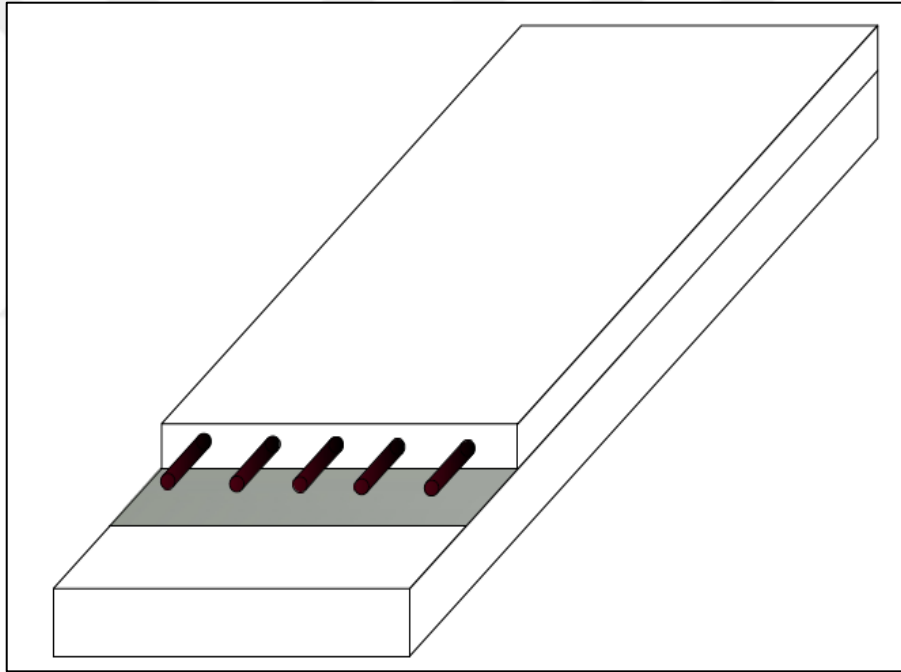
- Derzli-donatısız beton kaplamalar (JPCP)
- Derzli-donatılı beton kaplamalar (JRCP)
- Sürekli donatılı beton kaplamalar (CRCP) dir.



Şekil 1.1. Beton kaplama tipleri

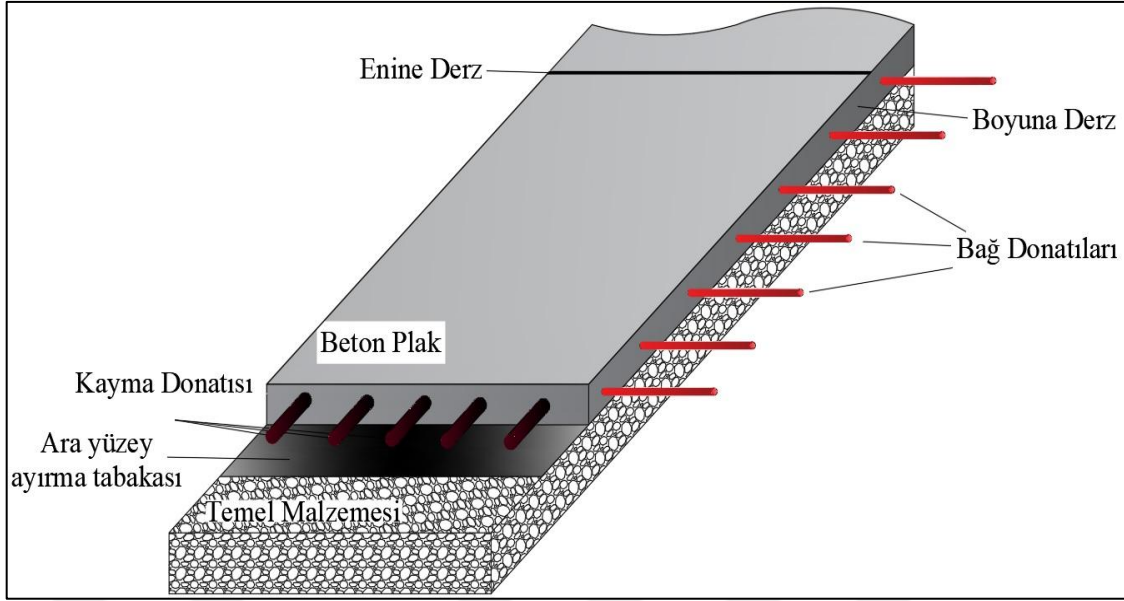
1.3.1. Derzli-Donatısız Beton Kaplamalar (JPCP)

Maliyet açısından verimli olmaları ve gvenilirliklerinden dolayı bugün beton kaplamaların büyük çoğunluğu JPCP tasarımı ile inşa edilmektedir. JPCP tipindeki kaplamaların derz arası uzunlukları (ano uzunlukları) 4.5-6 m arasında değişmektedir (şekil 1.2). Beton plaklar genellikle 125-350 mm kalınlığında yapılır. Temel tabakası kalınlıkları 100-200 mm arasında değişebilmektedir. Derzli donatısız beton kaplamalarda kısa derz aralığı, ano ortası çatlamaları en aza indirmek ve derz açıklıklarını kk tutmak için kullanılır. Derzli donatısız beton kaplamalar, donma ısısındaki bölgelerde ve nemli bölgelerde tercih edilmektedir (Kozak, 2011).



şekil 1.2. Derzli donatısız beton kaplama rneği

Plak boyutları enine ve boyuna derzlerle sınırlandırılır. Bu plakların üretiminde elik donatı bulunmaz. Trafik yüklerini beton plaklara aktarmak için (yük aktarımı) enine derzler boyunca; kayma çubukları (dowel bar), plaklar arası agrega kenetlenmesini sağlamak için de boyuna derzler boyunca bağ demirleri (tie bar) içerirler (şekil 1.3).

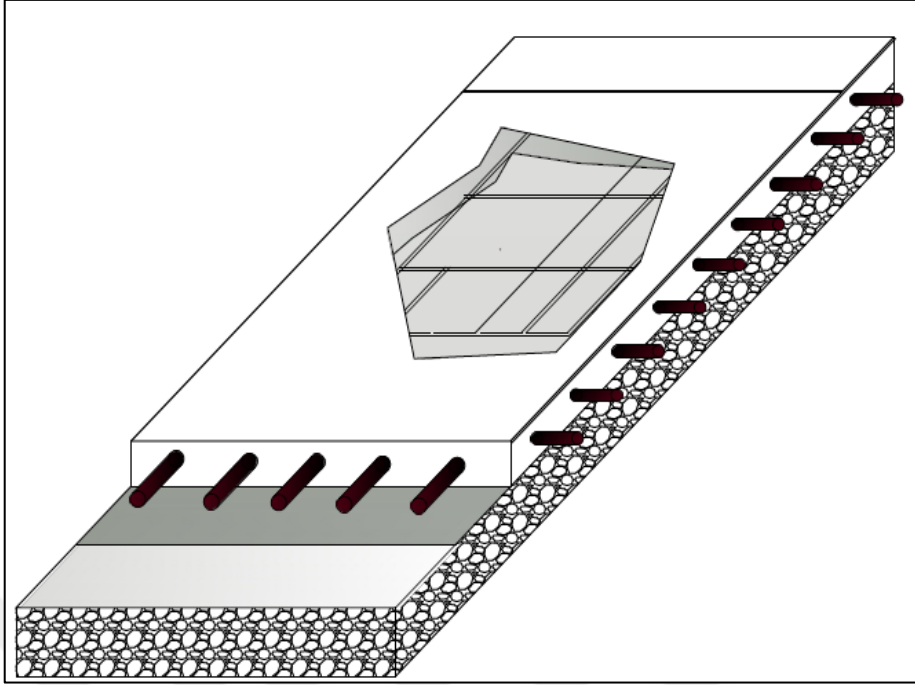


Şekil 1.3. Beton kaplamalarda kullanılan kayma ve bağ donatıları (Çelik, 2019).

1.3.2. Derzli-Donatılı Beton Kaplamalar (JRCP)

Derzli donatılı beton kaplama (JRCP) tipinde derz aralıkları JPCP'ye nazaran daha fazla olup yaklaşık 7.5-9 m'dir (Şekil 1.4). Plak içinde enine ve boyuna doğrultuda çelik donatı kullanılır. Kayma çubukları ve bağ demirleri ilaveten kullanılabilir. Çelik donatı kullanılmasının amacı; bu ano ortası çatlakların oluşmasını engellenmesidir. Çatlakları sıkı tutarak, yük transferinin sağlanması donatı tarafından yapılır. Burada donatı, beton plağın esneklik kapasitesini artırmak için kullanılmamaktadır.

Derzli donatılı beton kaplamalar, enine derz aralıkları arasındaki mesafeyi artırması dışında derzli donatısız beton kaplamalar ile benzer özelliklere sahiptir. Plak kalınlıkları genellikle 150-350 mm olarak yapılır. Temel tabakası kalınlığı 100-200 mm'dir. Daha uzun derz aralıkları yapılması durumunda, kurumadan dolayı büzölmeye ve ısıdan dolayı kıvrılmaya bağlı olarak çatlaklar oluşmaktadır (Kozak, 2011).

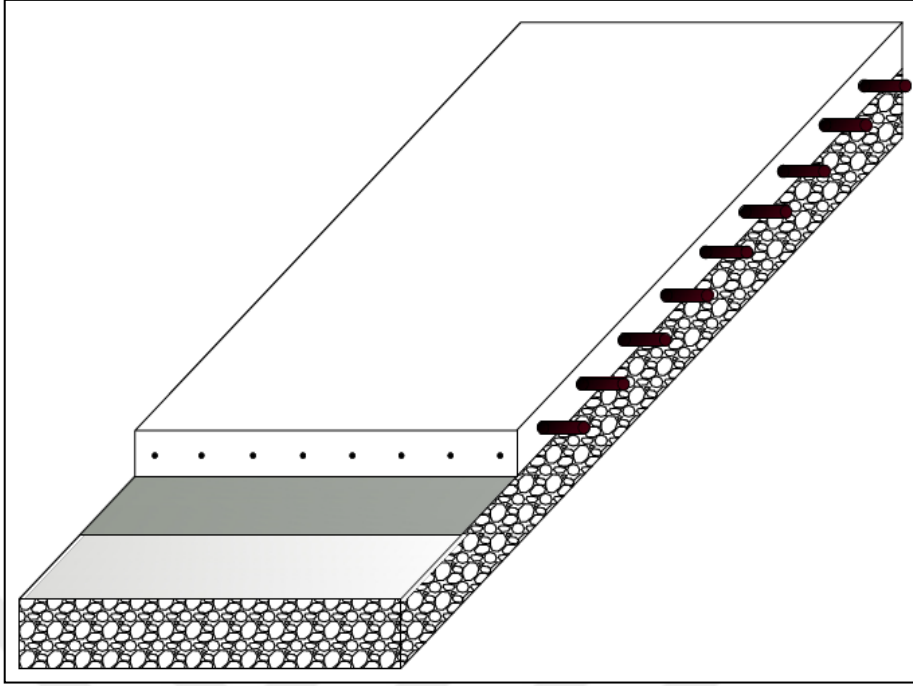


Şekil 1.4. Derzli donatılı beton kaplama örneği

Kullanılacak çelik donatı miktarı çatlak kontrolünde önemli rol oynar. Döşeme boyunca kullanılacak olan donatı miktarı kesit alanının yaklaşık olarak %0.2'si civarında olup, plakta oluşması muhtemel enine çatlakları sıkı biçimde bir arada tutmak için tasarlanır. Çelikle donatıyla güçlendirilmiş beton plaklarda güçlendirme olmasına rağmen, donatının yetersiz kaldığı durumlarda diğer plaklarla bağlantıyı sağlayan ankraj çubukları devreye girer.

1.3.3. Sürekli Donatılı Beton Kaplamalar (CRCP)

Sürekli donatılı (CRCP) tipi beton kaplamalar, önemli miktarda enine ve boyuna doğrultuda çelik donatı içermektedir. Çelik donatı plak boyunca sürekli olarak vardır (Şekil 1.5). Genel olarak boyuna donatı miktarı, kesit alanının %0.6-0.8 katı kadardır.



Şekil 1.5. Sürekli donatılı beton kaplama örneği

Yapı itibariyle klasik bina radye temeline benzetilebilir. Yoğun trafik yüklerine maruz yollar için en uygun tasarımıdır. Kaplama içindeki boyuna donatının ilk görevi gelen taşınacak yükü karşılamaya yardımcı olmanın yanında yüzeysel çatlakları, nem etkileri, hacim değişiklikleri gibi çevresel etkileri azaltmaktır. Enine donatının görevi ise; kısa doğrultudaki bükülme yüklerini taşımaya yardım etmektir. CRCP tipi kaplamalarda enine derz yoktur, seçilecek çatlak ara uzaklığı 0.9-1.5 m arasında olmalıdır. Kabul edilebilir maksimum çatlak genişliği 1.2 mm kadar olmalıdır.

Plak kalınlıkları 150-250 mm arasında değişebilmektedir. Sonradan kesilen derz bulunmamakla birlikte derzler yalnızca her gün iş bitiminde konulur (yapım derzi). Bu kaplama türünde, uzun derz açıklıkları kullanıldığı için ilk bir kaç yılda 0.6-2.4 m arasında enine çatlaklar meydana gelir. Donatı çeliğinin sağlamlığı arttıkça oluşan çatlaklar arasındaki boşluk kapalı kalır. Eğer çelik yüksek çekme gerilmelerine maruz kalırsa, çatlaklar açılmaya başlar.

1.4. Beton Yollarda Derz Tasarımı

Beton kaplamaların tasarımında, gerekli beton dayanımı kadar nem ve sıcaklığa bağlı olarak meydana gelen çatlakların en aza indirilmeleri ve kontrol altında tutulmaları da

önemlidir. Betonda oluşan genleşme ve büzülme hareketleri nedeniyle ve trafik yüklerinin etkisiyle beton plakta bazı gerilmeler oluşmaktadır. Beton plak serbestçe hareket edecek biçimde yapılmazsa, oluşan bu gerilmeler sonucunda beton plak çatlamaktadır. Ancak, uygun aralıklarla derzler yapılması ve derzlerin çelik donatı ile kuvvetlendirilmesi durumunda, geniş çatlaklar oluşmasının bir noktaya kadar önlenmesi ve çatlakların belirli yerlerde oluşmasının sağlanması mümkün olabilmektedir. Derzler yol eksenine göre enine, boyuna veya bazen de çapraz olabilirler. Derzler yapılırken aşağıdaki sorunlar göz önünde tutulmalıdır;

- Derzler arasındaki mesafe doğru olarak belirlenmelidir. Genellikle derz sayısını azaltmak amacı ile bu mesafenin mümkün olduğu kadar büyük tutulması istenir.
- Derz açıklığı, en uygun şekilde belirlenmelidir. Bu açıklığın olabildiğince küçük tutulması daha iyidir. Ancak, derzler arasındaki mesafe büyüdükçe, derz açıklığının da büyüyeceği unutulmamalıdır.
- İki komşu plak arasında kot farkı oluşmamasına özen gösterilmelidir.
- Beton plak altına ve alt zemin tabakalarına su sızmasını önlemek için, derz boşluğu iyi bir şekilde doldurulmalıdır.

Derzler yapım derinliğine bağlı olarak yarım (yalancı) ve tam derz olarak iki şekilde yapılır. Tam derzler plak kalınlığı boyunca oluşturulurken, yarım derzler plak kalınlığının sadece bir bölümüne kadar (plak kalınlığının 1/3'ü) açılırlar ve çatlakların zayıflatılmış kesitte toplanmasını sağlarlar. Tam derzler, birlikte dökülmeyen plaklar veya kaplama ile diğer yapılar arasında yer alırlar.

Ortam sıcaklığı, betonun yerleştirildiği andaki sıcaklığın altına düştüğü zaman beton plak yüzeyleri büzülmekte ve çekme gerilmeleri oluşmaktadır. Betonun çekme gerilmesine karşı dayanımı az olduğundan, çatlak kontrolü için, yarım derzlerin belirli aralıklarla yapılması gerekmektedir. Bu amaçla beton plak kesiti belirli yerlerde, yeterli miktarda zayıflatılarak, plakta meydana gelecek gerilmelerin yol açacağı çatlakların zayıflatılmış kesitlerde oluşmasını sağlamak için yarım derzler yapılmaktadır. Yarım derzler genel olarak betonu testere ile keserek ya da beton prizini tamamlamadan, beton içine ahşap veya metal şerit yerleştirilerek açılır.

Derzler yol yüzeyinde kesiklilik meydana getirirler ve alt tabakalara su sızmasına neden olabilirler. Bu nedenlerle elastik dolgu malzemeleri ile doldurulup düzlenmeleri gerekir. Derz tasarımında aşağıdaki faktörler dikkate alınmalıdır:

- Derz kesme işleminde derz açıklığının freze genişliği kadar olması yeterlidir.

- Derz derinliği kaplama yüksekliğinin 1/3' kadar (~50 mm) olmalıdır.
- Kesim işlemi beton yerleştirilmesini takiben 2-30 gün içinde yapılabilir.
- Kesim işlemi sonrası derzde kalan toz temizlenmelidir.
- Su yalıtımı, fitil ve poliüretan çift komponentli kimyasal ile yapılabilir.

1.5. Derz eşitleri

1.5.1. Enine Derzler

Enine derzler, sürüş doğrultusuna dik doğrultuda ve enine çatlakları kontrol etmek için yapılırlar. Bu derzlerin, kayma demirlerinin üstünden geçmesine dikkat edilir. Tam derz veya yarım derz şeklinde yapılabilirler.

1.5.2. Boyuna Derzler

Boyuna derzler sürüş doğrultusuna paralel doğrultuda yapılır. Boyuna derzlerin mümkün olduğu kadar trafik şeridi ortalarında olması, tekerlek altına gelmemesi tercih edilir (Yeğinobalı, 2010). Boyuna derzler, boyuna çatlakları kontrol altında tutmak için ve kaplamanın enine yönde arpılmalarını önlemek amacıyla yapılmaktadır. Boyuna derzler genellikle basınç etkisi altındadırlar.

Beton kaplama yapılırken, beton plak yarım enkesit genişliğinde iki ayrı plak olarak yerleştiriliyorsa bu plaklar arasında kendiliğinden bir boyuna derz oluşmaktadır. Beton kaplama tüm enkesit genişliğinde tek bir plak olarak yerleştiriliyorsa boyuna derz, yarım derz olarak kesit zayıflatarak da yapılabilir.

Boyuna derzlerde bağlantı demirleri kullanılmaktadır. Boyuna derzlerdeki bu bağlantı demirlerinin görevi; kaplama plaklarının birbirlerinden ayrılmalarını ve trafik etkisi altında birbirine göre ileri kaymalarını önlemektir. Boyuna derzlerde yük aktarımı, agrega kenetlenmesi ve plakların birbirine olan teması ile sağlanmaktadır.

Beton Yollar Teknik şartnamesi'ne göre, genişliği 4 m'den daha fazla olan beton kaplamalarda bir, 9 m'den fazla olan kaplamalarda ise iki tane boyuna derz yapılması gerekmektedir (BYTş, 2016).

1.5.3. Büzülme Derzleri

Büzülme derzleri, beton kaplama plaklarının, ortam sıcaklığının aniden düşmesi durumunda büzülmesine olanak sağlamak amacıyla enine veya boyuna doğrultuda kesilmiş derzler şeklinde yapılmaktadır. Derzlerin uygun derinlikte ve zamanında kesilmesi ile büzülme derzlerinin etkinliği sağlanmalıdır ve büzülme derzinin altında istenilen çatlak oluşmasına müsaade edilmelidir (Şekil 1.6).



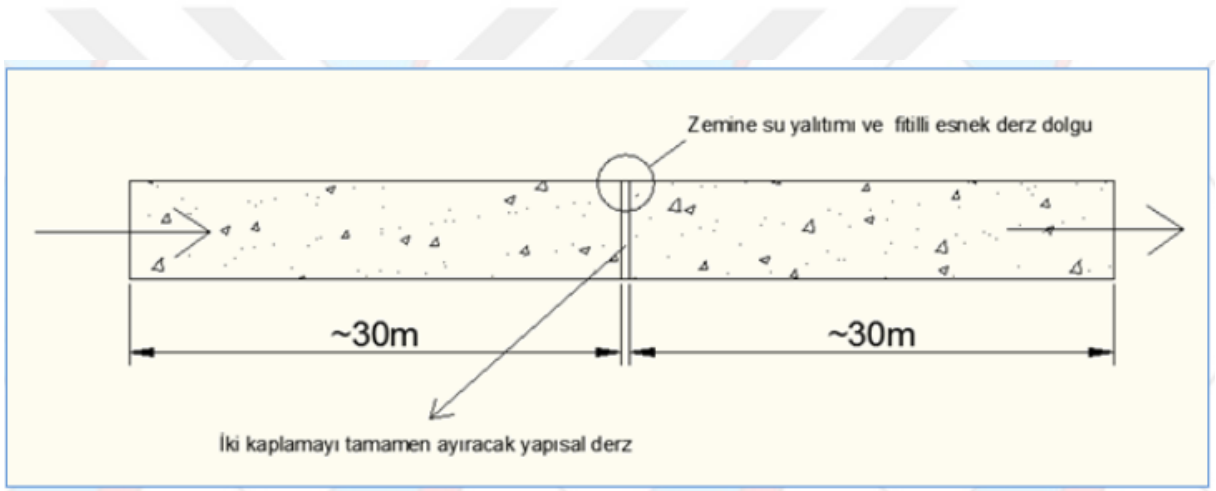
Şekil 1.6. Büzülme derzi ve istenilen çatlak

1.5.4. Genleşme Derzleri

Genleşme derzleri sıcaklığın aniden artmasıyla plakta oluşabilecek genleşmelere ve taban zemini nem değişikliklerinden kaynaklanan genleşme hareketine olanak sağlayan derzlerdir. Genleşme derzleri iki kaplamayı tamamen ayıran tam derz şeklinde ve enine doğrultuda yapılır. Yerleştirme esnasında minimum 20 mm derz açıklığı bırakılmalıdır. Genleşmeye engel olacak maddelerin derze girmemesi için derz, sıkışabilir bir malzeme ile doldurulmalıdır. Derz dolgu malzemesinin plağın hareketine uyum sağlayabilecek şekilde hareket etmesi ve her koşulda geçirimsiz olması gerekmektedir.

1.5.5. Yapım (İnşaat) Derzleri

Yapım derzleri farklı zamanda dökülen beton kaplama plaklarını birbirinden ayırır (gün sonunda iş bitimi gibi). Beton dökümü yan kalıpların bir tarafına yapılır, beton sertleştikten sonra yanındaki plağın betonu dökülerek yapım derzi oluşturulur. Yapım derzleri tam derz şeklinde yapılır (Şekil 1.7). Yapım derzlerinde, genleşme derzlerinde olduğu gibi genleşme payı yoktur. Bu derzlerin asıl amacı; plak yapımını kolaylaştırmaktır, ancak bunlar gerilme azaltıcı derzler olarak da görev yaparlar. Bazı tasarımlarda ise bunlar genleşme veya büzülme derzi olarak da görev yaparlar. Beton yollarda her 30 m'de bir yapısal derz bırakılmalıdır.



Şekil 1.7. Yapım derzleri (Mutyılmaz, 2014).

1.6. Beton Kaplamalarda Oluşan Gerilmeler

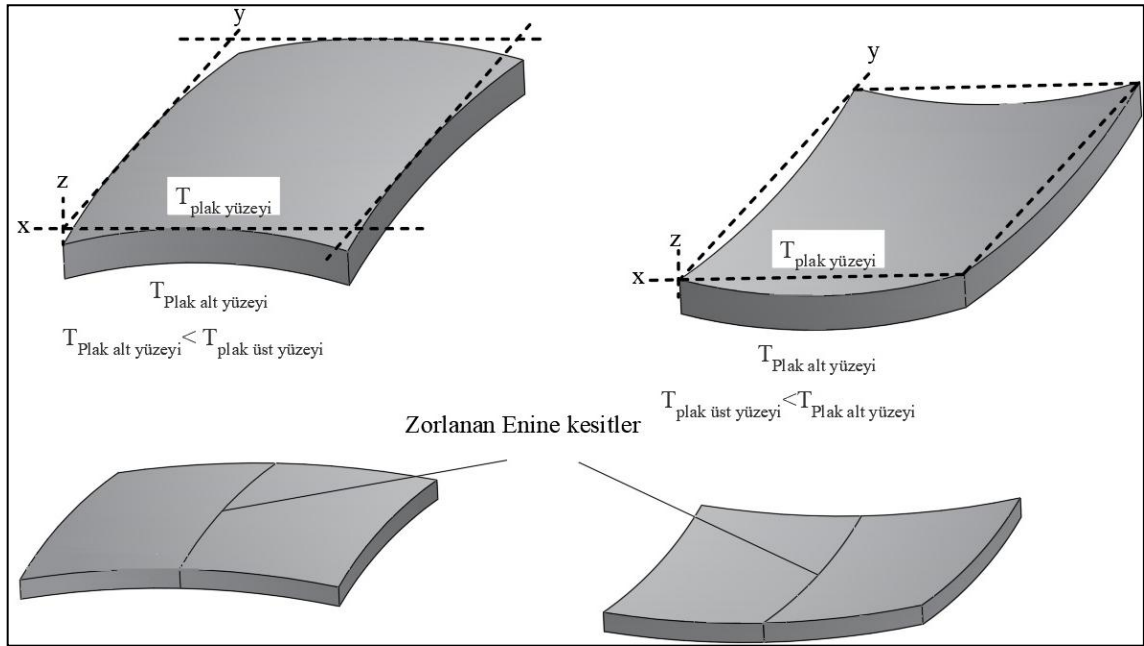
Beton kaplamalarda oluşan içsel gerilmeler; kaplamada varsa donatı yüzdesi, alt zemin tabakalarıyla olan sürtünmesi, sıcaklık genleşme katsayıları, tekerlek yükü, çatlak ara uzaklığı ve sıcaklık değişimleri gibi faktörlerden etkilenmektedir. Genel olarak beton kaplamalarda meydana gelen gerilmeler üç kategoriye ayrılır. Bunlar;

- Sıcaklığa bağlı oluşan gerilmeler
- Sürtünmeye bağlı oluşan gerilmeler
- Yüklemeyle bağlı oluşan gerilmelerdir.

1.6.1. Sıcaklığa Bağlı Oluşan Gerilmeler

Beton plağın üst ve alt kısmı arasındaki sıcaklık farkı nedeniyle, kıvrılma gerilmeleri (bükülme gerilmelerine benzer) plağın altında veya üstünde oluşur.

Plakanın üst ve alt kısmı arasındaki sıcaklık farkı, plakta kıvrılma (büzülme) gerilmesine neden olur. Levhanın üst yüzeyinin sıcaklığı alt yüzeyden daha yüksekse, üst yüzey genişleme eğilimi gösterir ve plakanın üst yüzeyi basınç gerilmesi, alt yüzeyi çekme gerilmesi alır (Şekil 1.8).



Şekil 1.8. Beton kaplamalarda sıcaklığa bağlı oluşan gerilmeler

1.6.2. Sürtünme Gerilmeleri

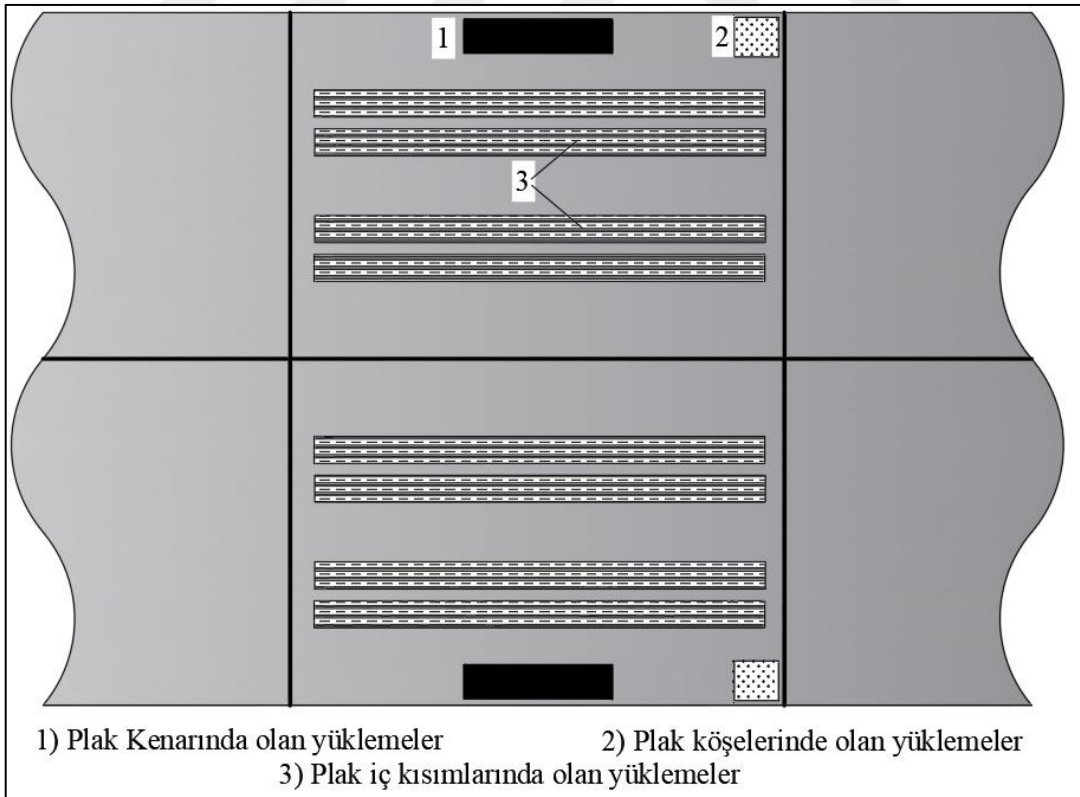
Plakanın büzülme nedeniyle kılmasına veya sıcaklıktaki ani düşümlere bağlı olarak plağın ortasında çekme gerilmeleri oluşur. Taban, beton plak genişlerken veya daralırken, bu hareketi durdurmaya çalışır. Beton plak ile üzerine oturduğu temel arasındaki sürtünme, betonda, çelik donatılarda ve bağ çubuklarında çekme gerilmelerine neden olur. Bu çekme gerilmeleri, plağın ortasında maksimumdur. Ayrıca, bağlantı noktalarındaki kayma çubuklarına baskı uygular ve yük aktarımı için agrega kenetlenmesine dayanan bağlantılarda yük aktarımını azaltır.

Derzli donatısız beton kaplamalarda, büzülme derzleri arasındaki mesafe, sürtünmeye bağılı gerilmelerin betonun çatlamasına neden olmayacağı şekilde seçilir. Bağlantı çubuklarının sayısı da sürtünme gerilmeleri ile belirlenir.

1.6.3. Teker Yükü Gerilmeleri

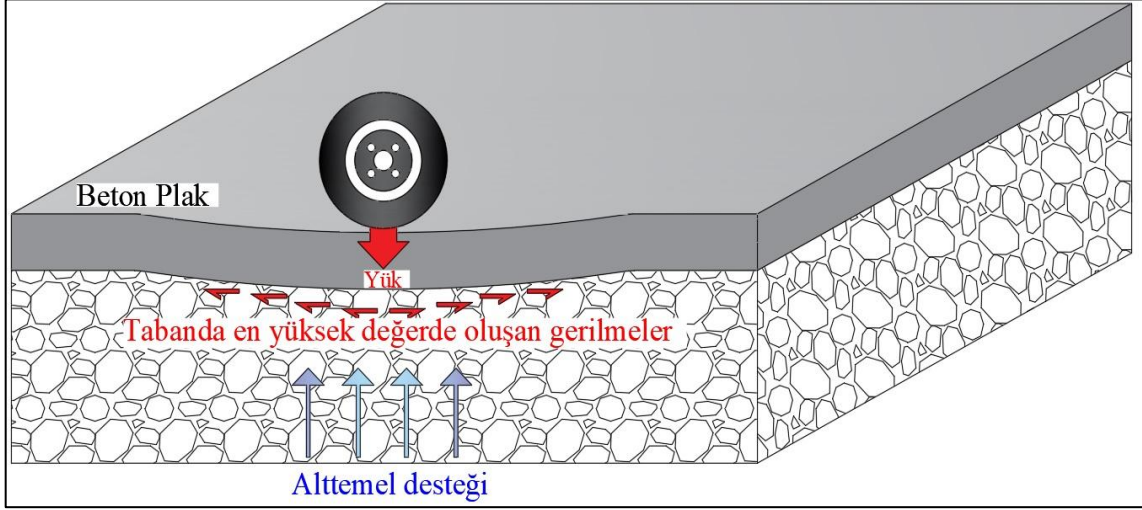
Rijit plak, tekerlek yüklerine bağılı olarak eğilme gerilmelerine maruz kalmaktadır. Beton plak üzerindeki yükler, hem yüklenen plağın hem de yük transfer etkisiyle komşu plaklar içinde çekme ve basınç gerilmeleri oluşturmaktadır. Bir rijit plakta teker yüklemesinin sebep olduğu 3 kritik yüklenme noktası mevcuttur (Westergaard, 1926). Bunlar;

- 1) Kenar (Edge) yüklenme
- 2) Köşe (Corner) yüklemesi
- 3) İç (Interior) yüklemesidir (Şekil 1.9).



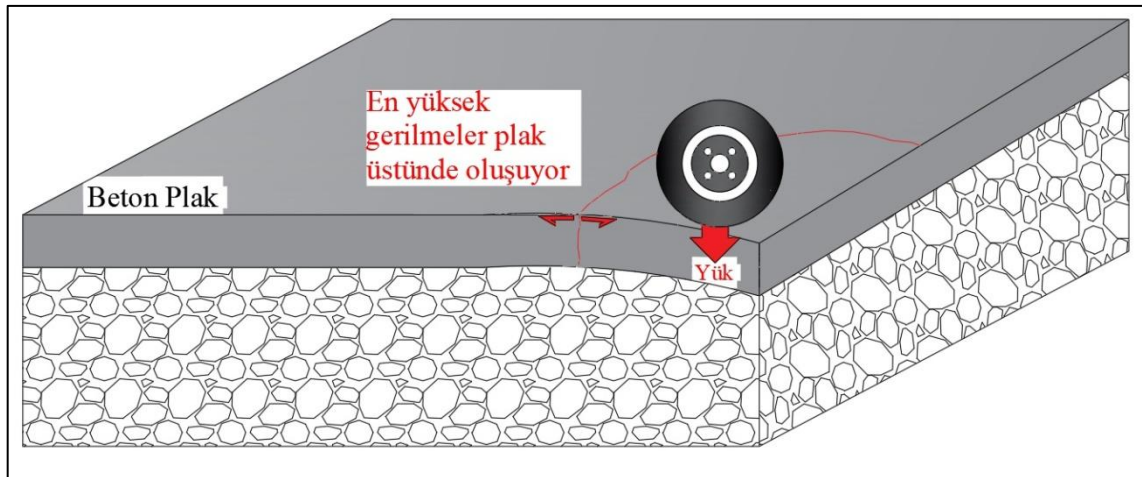
Şekil 1.9. Beton plaklarda kritik teker yüklenme bölgeleri

Kritik iç yüklemeler, tüm kenarlardan uzak olan bir plak yüzeyinin iç kısmına bir yük uygulandığında oluşur. Kritik kenar yüklemeleri, bir plak köşesinden uzaktaki bir plak kenarına yük uygulandığında oluşur. Bu yüklemeler sonucunda plak altında çekme gerilmeleri oluşur (Şekil 1.10).



Şekil 1.10. İç ve kenar yükleme durumlarında oluşan çekme gerilmeleri

Yük merkezi plak köşe açısının açıortayında bulunduğu anda ise köşe yüklemeleri oluşur. Bu durumda, plak yüzeyinde çekme gerilmeleri oluşmaktadır (Şekil 1.11).



Şekil 1.11. Köşe yükleme durumlarında oluşan çekme gerilmeleri

1.7. Yol Kaplamalarının Bakım-Onarımı

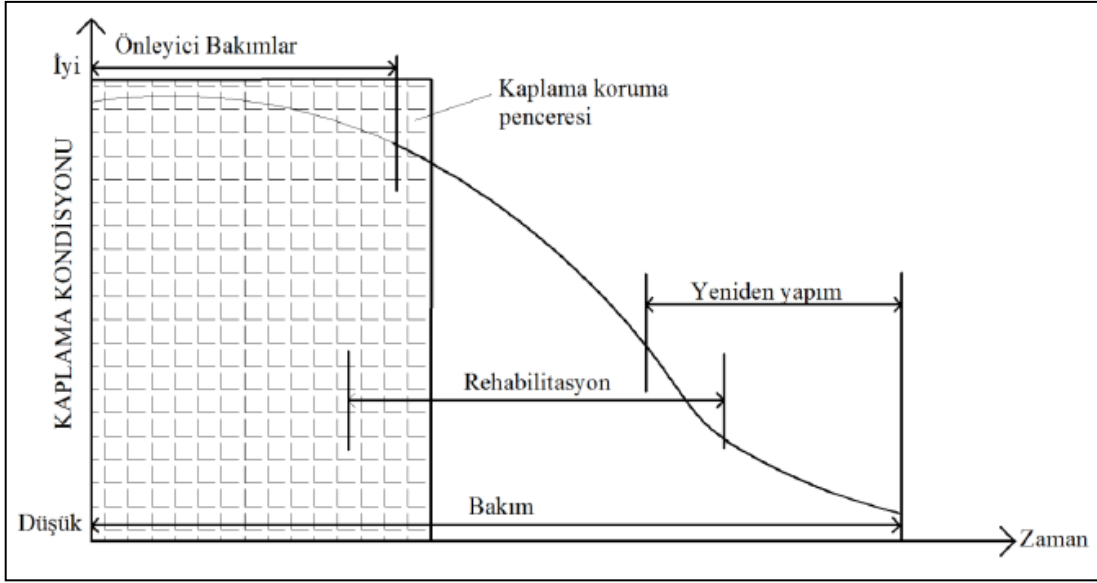
Trafik hacminin artışı ve bununla birlikte ortaya çıkan gerilmelerdeki artış, üstyapılardaki problemlerin daha sık aralıklarla oluşmasına ve kaplamaların servis ömürlerinin azalmasına neden olmaktadır. Bu durum ekonomik olarak büyük kayıplara yol açmaktadır. Ayrıca iklim, malzeme kalitesizliği gibi etkenlerin yollar üzerindeki olumsuz etkileri de servis ömrünü kısaltmaktadır. Yolun ekonomik ömrü içinde yeterince faydalanmanın ve servis ömrünü uzatmanın çözümü, yeterli bakım onarım faaliyetinin yükseltilmesine bağlıdır (Bağdatlı ve Yıldırım, 2017).

Ülkemizde, en sık kullanılan ulaşım ağının karayolu olmasından ötürü, yollarımızda önemli hasarlar oluşmaktadır. Özellikle aşırı kamyon ve ağır tonajlı araçların oluşturduğu gerilmelerden dolayı asfalt ve beton kaplamalarda zamana bağlı olarak önemli hasarlar oluşmaktadır. Bu hasarlar, ekonomik olarak büyük külfetler doğurduğu gibi kaplamanın yenilenmesine kadar geçen süre içerisinde de sürüş güvenliğini tehlikeye düşürmektedir. Kaplamalarda meydana gelen hasarlar aşağıdaki gibi şöyle sıralanabilmektedir;

- Malzeme ve işçilik hataları
- Tasarım
- Drenajın yetersizliği
- Zemin stabilite problemleri
- Aşırı trafik yükü
- Gece gündüz sıcaklık farklılıkları
- Beton yollarda derz bölgeleri vb.

1.7.1. Beton Kaplamaların Bakımı ve Rehabilitasyonu

Beton yolların rehabilitasyon stratejisi mevcut kaplamanın durumuna göre üç şekilde yapılabilmektedir. Bunlar; iyileştirme, yeniden kaplama ve yeniden yapımdır. Rehabilitasyon ile kaplamanın yapısal ve fonksiyonel durumu iyileştirilmiş olur. Yapısal iyileştirmedeki kasıt, trafiği taşıma yeteneğinde iyileştirme iken, fonksiyonel iyileştirmeden kasıt ise kullanıcıya rahatça hizmet verme kabiliyetinin iyileştirilmesidir. Rehabilitasyon zaman çizelgesi Şekil 1.12’de gösterilmektedir.



Şekil 1.12. Rehabilitasyon zamanlama grafiği (Smith, 2001).

İyileştirme, kaplamanın çok az hasara uğradığı durumlarda uygulanır. Hasarlı alanların onarımını içerir. Beton kaplamalardaki iyileştirme teknikleri aşağıdaki gibi sıralanabilmektedir;

- Tam derinlikte onarım
- Kısmi derinlikte onarım
- Elmas taşlama
- Derz ve çatlakların tekrar kapatılması
- Plak stabilizasyonu
- Güçlendirme kayma demirleri
- Uzun çatlaklar veya derzlerin dikilmesi

Beton kaplamaların iyileştirilmesi, mevcut kaplamanın servis ömrünü en az 10 yıl uzatmaktadır. Fakat iyileştirme uygulamasının göstereceği performansta doğru tasarım, yapım kalitesi ve zamanlama oldukça önemlidir.

Trevino vd. (2004)'ne göre, beton kaplama tasarımında çatlaklar ile ilgili kaplamadan ilk beklenti çatlak oluşumunun geciktirilmesidir. Çünkü beton kaplamalarda çatlak oluşumunun önüne geçilemez, sadece geciktirilebilir. Bir sonraki sonraki beklenti ise kullanım sırasında oluşan çatlak sayısının azaltılması ve var olan çatlakların şiddetinin artmamasını sağlamaktır. Böylece kaplamanın su geçirimsizlik kabiliyeti geliştirilirken, yol düzgünlüğü ve sürüş konforu da kontrol altında tutulabilecektir. Beton kaplamaların

rehabilitasyon teknikleri için çeşitli yöntemler mevcuttur. Bunları aşağıdaki gibi sıralamak mümkündür.

1) Takviye tabakası yerleştirmeden önceki iyileştirmeler

- Çatlat-yerleştir, kır-yerleştir (rubblizasyon)
- Tabaka stabilizasyonu/yük transferi restorasyonu
- Dikiş ve sızdırmazlık derzleri

2) Asfalt takviye tabakası

3) Kaplama sistemleri

- Geliştirilmiş karışım
- Derz dolgusu/stabilizasyonu
- Tesviye tabakası
- Ara tabaka sistemleri

İyileştirmenin artık yeterli olmadığı, orta veya büyük ölçekteki beton yol kaplama hasarlarında yüzey yenilemesi tekniği kullanılarak kaplamanın servis ömrü arttırılır. Bu teknik ile büyük ölçekte hasara uğramış mevcut beton kaplama yüzeyi üzerine takviye tabakası uygulanması ile gerçekleştirilmektedir. Beton kaplama yüzeyi üzerine yerleştirilen takviye tabakası yine beton kaplama olabileceği gibi asfalt takviye tabakası serilerek de rehabilite edilebilmektedir. Bu suretle iki tabakalı kaplama sistemleri oluşturulmaktadır. Bu tür kaplamalara kompozit kaplama da denilmektedir. Bu çalışmanın konusunu oluşturan beton üstü asfalt takviye tabakaları hakkında daha detaylı bilgi Bölüm 1.8'de verilecektir.

Takviye tabakalarının artık yeterli olmadığı, servis ömrünü tamamlamış, kaplamada çok büyük hasarların meydana geldiği durumlarda yeniden yapım tekniği kullanılmaktadır. Mevcut kaplama yerinden kaldırılarak yenisi yerleştirilir. Bu işlem mevcut kaplamanın tamamen kaldırılması veya bir bölümünün kaldırılarak dolgu yapılması şeklinde gerçekleştirilebilmektedir. Bu yöntemle, alt zemin yetersizlikleri onarılabilir, yol geometrisi düzeltilebilir ve yol drenajı iyileştirilebilir. Ayrıca kot yükselmelerinin önüne geçerek drenaj kanalı çukurları, kaldırım yükseklikleri de korunmuş olur. Yerinden kaldırılan eski kaplama tabakasının geri dönüşümü yapılarak tekrar kullanılması da mümkündür (URL-3, 2004).

1.8. Takviye Tabakaları

Karayolu üstyapısı yapım, bakım ve onarım maliyetleri açısından finansal sürdürülebilirlik göz önüne alınması gereken önemli bir husustur. İşlenebilirlik ve ilk yapım maliyetindeki ucuzluk sebebiyle beton yollara kıyasla daha çok tercih edilen asfalt yolların zaman içinde biriken bakım ve onarım maliyetlerinin servis süreleri içinde ciddi oranlara varması, ulaştırma üstyapılarında “ekonomik sürdürülebilirlik” konusunu ön plana çıkarmaktadır. Bu da temel olarak yatırım kararların sadece başlangıç maliyetleri yerine “yaşam döngüsü analizleri” sonuçları ile değerlendirilmesini gündeme getirmiştir (URL-1). Dolayısıyla, karayolu üstyapı tipi seçiminde etkili olan ekonomik faktör, yalnızca ilk yapım maliyetleri değil servis ömrü boyunca ihtiyaç duyduğu bakım-onarım giderlerini de kapsamaktadır. Bunun ötesinde kaplamanın ömrünü tamamladıktan sonra yenilenmesinden doğacak maliyetler de kaplama tipi seçiminde önemli bir kıstas olmuştur.

Beton yolların iyileştirilmesinde, beton kaplamanın yeniden yapımı oldukça zahmetli ve masraflı bir tekniktir. Yüzey yenileme tekniği olan takviye tabakaları 3 farklı şekilde inşa edilebilirler. Bunlar; bozulmuş asfalt betonu kaplama üzerine beton takviye tabakası, bozulmuş beton kaplama üzerine beton takviye tabakası veya asfalt takviye tabakası şeklindedir. Bozulan beton yol yüzeyinin düzeltilerek ömrünün uzatılması, sürüş konforu ve güvenliğinin artırılması amacıyla yıllardır yurtdışında başarılı bir şekilde beton üzeri asfalt takviye tabakaları kullanılmaktadır. Oluşturulan bu iki tabakalı sistemde; beton kaplama oldukça güçlü ve durabilitesi yüksek bir temel tabakası vazifesi görürken, üzerine serilen ince asfalt takviye tabakasının da sürüş konforunu artırması ve beton yüzeyindeki hasarları düzeltmesi avantajından faydalanılmış olacaktır.

İster asfalt ister beton olsun, bir takviye tabakasının genel amacı mevcut kaplamanın veya yol yüzeyinin işlevsel veya yapısal performansını iyileştirmektir. Takviye tabakaları, mevcut yüzey eksiklikleri ile ilgili problemleri gidermek ve/veya kaplamanın yük taşıma kapasitesini arttırmak için çok etkili olabilmektedirler. Asfalt ve beton takviye tabakaları, herhangi bir tasarım durumunda uygulanabilirliklerini veya uygunluklarını etkileyen başlangıç maliyetleri, trafik kontrol gereksinimleri ve potansiyel ömür gibi etkenler açısından bazı önemli farklılıklar göstermektedirler.

Asfalt takviye tabakaları, düşük hacimli yolların geliştirilmesinden, ağır trafikli otoyol ve karayollarının iyileştirilmesine kadar çok çeşitli uygulama yelpazesine sahiptir. Ağır ve sık uçak yüklerine maruz havaalanlarında da etkili bir şekilde kullanılmaktadır.

Ayrıca, yapısal ve karışım tasarımı sırasında trafik ve çevresel etkilere de dikkat edilerek, asfalt takviye tabakaları çok çeşitli iklim ve taban destek koşullarında başarıyla uygulanabilmektedir.

En yaygın kullanılan asfalt takviye tabakası, yoğun gradasyonlu, sıcak asfalt karışım betonu ile inşa edilmektedir (Finn ve Monismith, 1984). Asfalt takviye tabakaları, mevcut asfalt veya beton kaplamalar üzerine yerleştirilebilir. Mevcut kaplamadaki probleme ve takviyenin amacına bağlı olarak, asfalt takviye tabakasının kalınlığı 25-200 mm arasında olabileceği gibi daha fazla da olabilir (HMA, 2001). Bu çalışma kapsamında, beton yolların ince asfalt takviye tabakası ile iyileştirilme yöntemi seçilmiştir.

1.8.1. Beton Üstü İnce Asfalt Takviye Tabakaları

Beton kaplamalar yapısal iyileştirmelerden ziyade sürüş konforu iyileştirmelerine daha çok ihtiyaç duyar, asfalt takviye tabakaları da beton kaplamaların bu zaafını karşılar. Ayrıca asfalt takviye tabakalarının sağladığı avantajlar aşağıdaki gibi sıralanabilir (URL-4);

- Uzun servis ömrü, düşük kullanım ömrü maliyeti sağlar
- İnce takviye tabakaları sayesinde mevcut yol kaplamasının seviyesi ve eğimi korunur
- Yoğun trafiği kaldırabilir
- Pürüzsüz yüzey sağlar
- Mevcut kaplama yüzeyindeki çatlakları mühürler
- Yeni kaplama inşası sırasında oluşabilecek trafik gecikmelerini en aza indirir
- Düşük gürültü üretimi sağlar
- Geri dönüştürülebilir bir malzemedir
- Mevcut kaplamda kayma direncinde oluşan azalma problemini onarır

Fickes (2000)'e göre, asfalt takviye tabakaları, üzerlerine yerleştirildikleri mevcut kaplamanın kayma direncini artırarak sürüş güvenliğini artırır. Bazı asfalt takviye tabakaları, pürüzsüzlüğü ve drenajı iyileştirirler. Bazı eyaletler, otoyolların iyileştirilmesinde bu tabakaları başarılı bir şekilde kullanmaktadırlar.

Asfalt Enstitüsü (1977)'ne göre, birkaç eyaletteki eski bir beton kaplamanın asfalt takviye tabakalarıyla rehabilitasyonunun yapılması sonucunda, ilerleyen yıllarda trafik

hacmi arttığında bile minimum veya hiç bakım gerektirmediğini ve böylece mevcut kaplamanın ömrünü uzattığını belirtmiştir.

1.9. Yansıma Çatlakları

Asfalt takviye tabakalarının, bozulmuş haldeki mevcut bir beton kaplama üzerine yerleştirilmesi nadiren kalıcı bir iyileştirme yöntemidir. Mevcut kaplamanın devamlı hareketi nedeniyle, çatlaklar ve derzler gibi var olan süreksizlikler, yansıma çatlağına neden olarak yeni kaplamaya yayılır. Yansıma çatlakları, beton kaplama iyileştirme ile ilgili ciddi bir zorluktur. Pratik deneyim, yansıma çatlaklarının yılda 25 mm (1 in.) hızla ilerlediğini göstermektedir. Asfalt takviye tabakalarının yansıma çatlaklarına karşı performansını artırmak için yeni iyileştirme metodolojileri için ihtiyaç arttıkça, birçok devlet karayolu kuruluşu, rehabilite edilmiş kaplamalarda yansıma çatlamasını geciktirmek veya önlemek için mevcut muamele yöntemlerini kapsamlı bir şekilde incelemek ve bu sıkıntıyı gidermek için mevcut uygulama durumunu araştırmak için çalışmalar yürütmeye başlamıştır (Dhakal vd., 2016).

Asfalt takviye tabakaları, mevcut kaplama koşulları (yapısal ve işlevsel) kabul edilemez bir hizmet seviyesine ulaştığında, esnek ve beton kaplamalarda yaygın olarak uygulanmakta olan bir iyileştirme yöntemidir. Bozulmuş beton kaplamaların onarımında kullanılan asfalt takviye tabakalarında karşılaşılan en yaygın problemlerden biri; eski kaplamalardaki çatlakların veya varsa derzlerin, trafik ve sıcaklık koşullarına bağlı olarak oluşan gerilme yoğunlaşması nedeniyle yansıma çatlağı şeklinde yüzeye çıkmasıdır. Takviye tabakaları, yorulma ve/veya tekerlek izi hasar mekanizmalarına direnmek üzere tasarlanmış olmakla birlikte, takviye tabakasına kısa bir süre sonra eski kaplamalarda var olanlara benzer çatlak modelleri oluşabilmektedir (Pierce vd., 1993; Bayomy vd., 1996; Jacobs vd., 1992). Bu hasar, “yansıma çatlağı” olarak bilinmektedir. Alt tabakalardaki süreksizlikler (çatlaklar veya derzler), tabakadaki bu süreksizliklerin termal genişleme ve trafik yüklemesi ile sürekli hareket etmesi nedeniyle asfalt takviye tabakası boyunca yayılım gösteren yansıma çatlaklarına neden olmaktadır. Takviye tabakası hasarlı tabaka üzerine yapılıyorsa, mevcut kaplamadaki çatlaklar ve derzler genellikle 1-5 yıl içinde takviye tabakası yüzeyine yayılır; en erken birkaç ayda olabildiği de bildirilmiştir (Chen ve Frederick, 1992). Mevsimsel sıcaklık farklılıkları, özellikle rijit kaplama iyileştirilmesinde yansıma çatlağı oluşum sürecini hızlandırabilir. Yansıma çatlağı, kaplamanın erken hasar

görmesine neden olması ve çatlaklar boyunca su sızmasına izin vermesi nedeniyle kaplama iyileştirilmesi ile ilgili ciddi bir sorundur. Bu durum, asfalt takviye tabakalarında sıyrılmaya neden olur ve temel ve/veya taban zemininde zayıflama ve bozulmaya neden olur (Elseifi ve Bandaru, 2011).

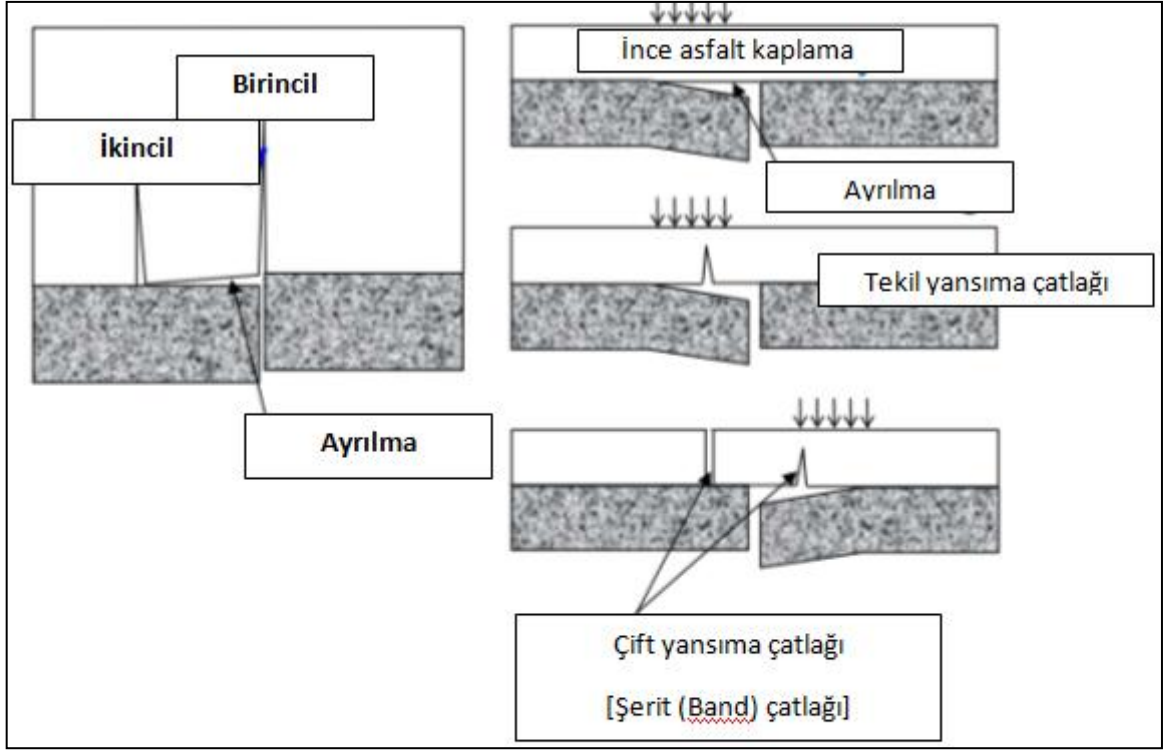
1.9.1. Yansıma Çatlaklarının Özellikleri

Asfalt takviye tabakalarında yansıma çatlaklarının yayılma hızı; takviye tabakasının kalınlığını, asfalt takviyenin özelliklerini, donatı türünü (eğer kullanılıyorsa) ve taban zemininin durumunu da içeren bir dizi faktöre bağlıdır (Von Quintus vd., 2009). Asfalt takviye tabakalarında gözlemlenen farklı şiddet düzeylerindeki yansıma çatlakları Şekil 1.13'te gösterilmektedir (Al-Qadi vd., 2008).

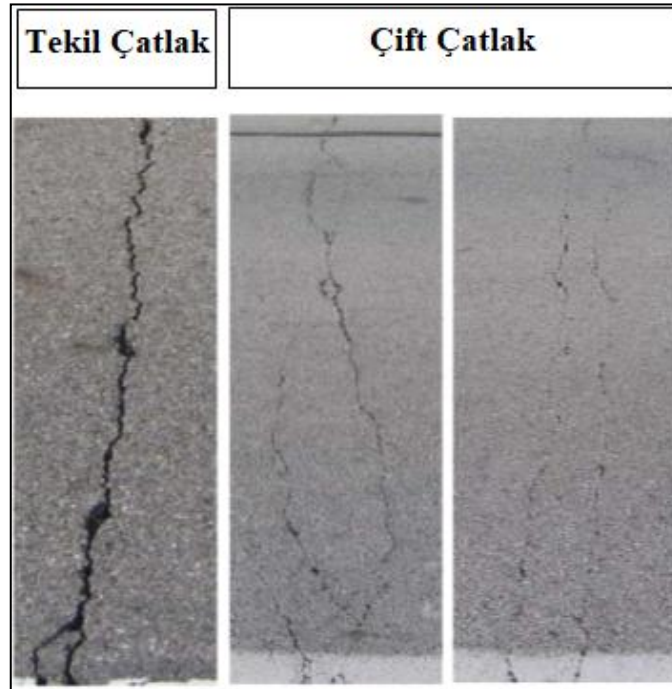


Şekil 1.13. Farklı şiddet düzeylerindeki yansıma çatlakları (Al-Qadi vd., 2008).

Yansıma çatlağı tek bir şerit halinde yüzeyde oluşabileceği gibi, çift şerit halinde de meydana gelebilmektedir (Şekil 1.14 ve 1.15).



Şekil 1.14. Tekil ve çift yansımaya çatlak oluşum aşamaları (Zhou ve Sun, 2002).



Şekil 1.15. Asfalt kaplamalarda tekil ve çift yansımaya çatlak oluşumu (Beak vd., 2008).

1.9.2. Yansımaya Çatlağı Oluşum Nedenleri

Yansımaya çatlakları sadece beton kaplamalar üzerindeki asfalt takviyelerde oluşan bir yol hasarı değildir. Çatlaklı asfalt kaplamalarda veya stabilize temeller üzerindeki asfalt kaplamalarda da meydana gelebilirler. Yansımaya çatlaklarının yaygın olarak kabul edilen oluşum sebepleri arasında; beton kaplamalardaki derzler ve çatlaklar, asfalt kaplamalarda düşük sıcaklık veya büzülme çatlakları, boyuna derz kusurları ve yorulma çatlakları gelmektedir. Yansımaya çatlakları ayrıca taban zemini büzülmesi ve tabaka altındaki kanal, menfez, ... gibi kamu hizmetlerinden kaynaklanan çökmelerden oluşabilir (Walker, 2012).

Yansımaya çatlaklarını başlatan etki genellikle yüklemeye bağlı değildir, ancak yükleme, bozulma oranını ve şiddetini hızlandırır. Yansımaya çatlağı mekanizmasını başlatan esas etmen, beton kaplama plağı altındaki çekme gerilmeleridir. Derz/çatlaklarda oluşan kesme gerilmeleri, yansımaya çatlağını başlatmaz, oluşumunu hızlandırır. Eğer oluşan çatlaklar iyileştirilebilirse, kesme gerilmeleri çatlakları başlatmaz (Bennert, 2010). Yansımaya çatlakları genelde termal ve nem değişiklikleriyle başlamakta olup, trafik yükleri bu süreci hızlandırmaktadır (URL-5).

Beton kaplama tabakası üzerinde yerleştirilen asfalt takviye tabakalarında meydana gelen yansımaya çatlakları esas olarak beton kaplama plaklarının hareketinden kaynaklanmaktadır. Plak hareketine ve dolayısıyla da takviye tabakasında yansımaya çatlağına neden olan sebepler aşağıdaki gibi sıralanabilir;

Mevcut beton kaplamadaki çatlak ve derzlerin diferansiyel düşey hareketi: Bu durum takviye tabakasında düşey kesme (shear) gerilmesi oluşumuna neden olur. Beton kaplamadaki derz ve çatlak gibi süreksizliklerde meydana gelen diferansiyel düşey hareket, ağır teker yükleri altında çeşitli şiddetlerde meydana gelebilir. Özellikle de beton plaklar kıvrılmış durumda ise bu hareket daha da büyük olabilir.

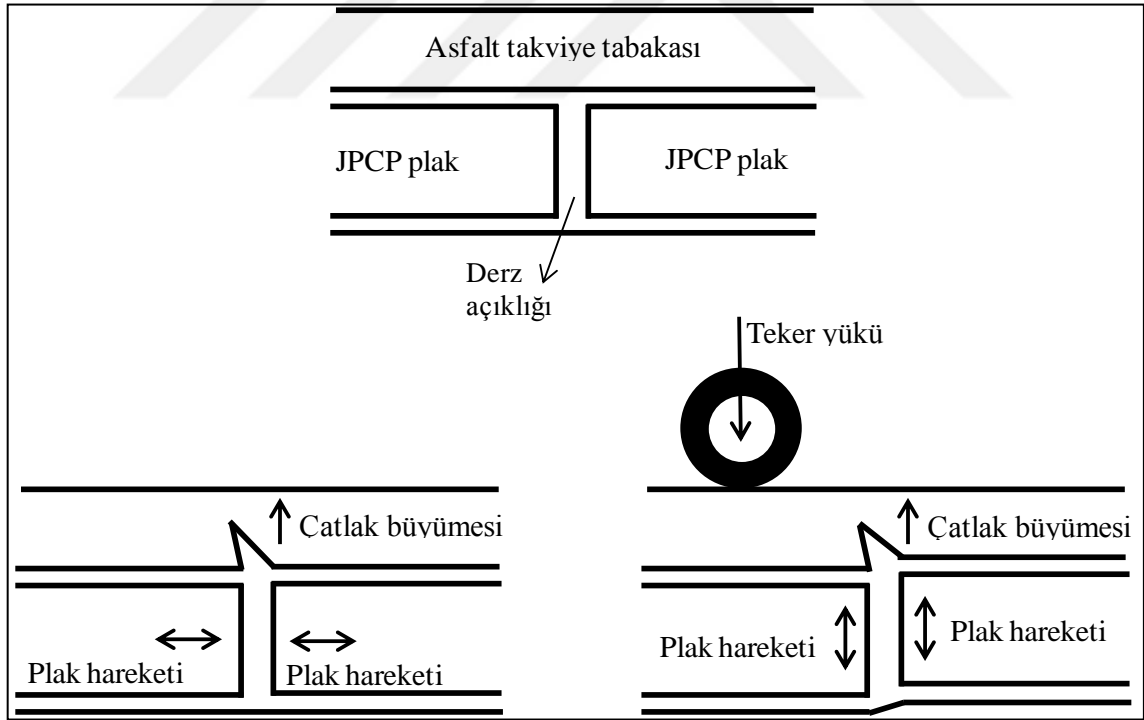
Beton plaklardaki sıcaklık ve nem değişimlerine bağlı olarak oluşan yatay hareket: Takviye tabakasında çekme (tensile) gerilmesine neden olmaktadır. Beton kaplamadaki mevsimsel veya günlük sıcaklık döngüleri nedeniyle oluşan termal gerilmeler asfalt takviye tabakasına iletilir. Sıcaklığın değişmesinden dolayı eski kaplamanın genleşmesi/büzülmesi veya kıvrılması, çatlakların açılmasına ve bu da asfalt takviye tabakasında yatay gerilmelere neden olabilir (Elseifi ve Al-Qadi, 2003).

Ağır taşıt yüklerinin neden olduğu defleksiyonlar sebebiyle takviye tabakasında eğilme yorulmaları oluşur ve bu gerilmeler doğrudan süreksizlikler (çatlak ve derz)

üzerinde yoğunlaşma eğilimindedirler. Bu durum genellikle çatlamış takviye tabakasından yüzey veya yağış suyunun içeri girmesiyle şiddetlenir (Smith, 1984).

Mevcut beton kaplamadaki derzlerin ve çatlakların hareketine neden olan en yaygın tetikleyici faktörler; düşük sıcaklık, tekerlek yükleri, donma-çözülme döngüsü, yüzeye yakın asfaltın yaşlanması (hava boşluğu seviyesi), beton, asfalt ve çimento bağlayıcılı temel tabakasının büzülmesidir (Von Quintus vd., 2009).

Trafik yükünün etkisiyle giriş plağında oluşan çökme ve yükün bitişik plağa geçişiyle giriş plağının eski haline dönerken çıkış plağında oluşan çökme gibi düşey yönde plağın hareket etmesi mevcut JPCP tabakasındaki çatlak veya derz üzerindeki takviye tabakasındaki çatlaklara neden olmaktadır. Bu durum Şekil 1.16'da gösterilmektedir. JPCP tasarımında kullanılan kayma demiri (dowel bar) denilen plaklar arasında yük aktarımını sağlayan yapı elemanlarının kullanımı trafik yüklemesinden kaynaklı yansıma çatlağı oluşumunu önleyebilir. Fakat bu durumda da farklı gerilmeler oluşabileceğinden takviye tabakasındaki çatlaklar görülebilir (Von Quintus vd., 2009).



Şekil 1.16. Yansıma çatlağı oluşumunda beton plak hareketleri (Hu vd., 2010).

Mevsimsel veya günlük sıcaklık farkları PCC (beton kaplama) plaklarında büzülme veya genişleme şeklinde hacimsel değişimlere sebep olmaktadır. Hava sıcaklığının ani düşmesi PCC plakların kıvrılmasına, sıcaklığın ani artışı ise plakların genişlemesine neden olmaktadır. Sıcaklığın etkisiyle yani termal olarak gelişen bu plak hareketi yatay yönde olmaktadır. Sıcaklık artışıyla JPCP plaklarında meydana gelen genişleme hareketi sebebiyle derz açıklıkları azalmakta, sıcaklık düşüşüyle oluşan büzülme sebebiyle ise bu açıklıklar artmaktadır. Oluşan bu yatay yönlü hareket derz açıklıklarının üzerindeki bölgelerdeki asfalt takviye tabakalarında çatlakların oluşmasına ve yayılmasına sebep olmaktadır.

Yansıma çatlakları, çatlak hareketinin (mevcut beton kaplamada derz olması halinde) oluşturduğu çekme gerilmeleri sebebiyle asfalt takviye tabakası yüzeyi boyunca ilerler. Bu çekme gerilmeleri; alt tabakadaki süreksizlikler, farklı sıcaklık koşulları ve eski kaplamadaki mevcut boyuna çatlaklardan kaynaklanır (Roberts vd., 1996).

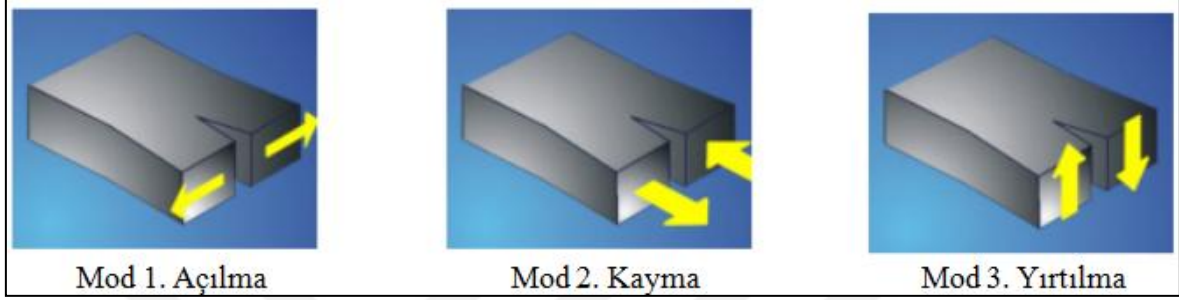
Asfalt takviye tabakası ile mevcut beton kaplama bağlantı ara yüzeyi, takviye tabakasının servis ömrünü etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Bunun yanısıra asfalt malzemesi tipi, yapıştırma tabakası malzemesi (varsa), yapıştırma tabakası uygulama oranı (varsa), PCC yüzey dokusu, sıcaklık ve nem durumu gibi çeşitli faktörler de ara yüzeydeki yapışma koşulunu etkileyebilmektedir (Leng vd., 2008).

1.9.3. Yansıma Çatlağı Oluşum Mekanizması

Mevcut beton kaplamadaki bir çatlak veya derz üzerinden bir teker yükünün geçmesi, üç kritik darbeye neden olur. Bunlar; bir maksimum eğilme (bending) ve iki maksimum kesme gerilmesidir (Lytton, 1989). Çatlak veya derz hareketi arttıkça, çatlakların takviye tabakasına yayılması daha hızlı gerçekleşir (Sheng vd., 2010). Şekil 1.17'de görüleceği üzere yükler kaplama yapısına üç farklı kırılma modunun kombinasyonu şeklinde uygulanabilirler (Elseifi ve Al-Qadi, 2003).

- Mod 1; çatlak veya derz düzlemine düşey olarak uygulanan yüklerden oluşur (termal ve trafik yükleri)
- Mod 2; çatlak ön yüzlerinin birbirine zıt yönlerde kaymasına yol açan düzlemsel kayma yüklerinden kaynaklanan yüklemelerden oluşur (trafik yükleri)
- Mod 3; çatlak ön kenarına paralel olarak düzlem dışı kesme yüklemesinden kaynaklanır. Kaplamalar için bu yükleme tarzı ihmal edilebilir.

Asfalt takviye tabakalarına çatlakların yansımalarının, karmaşık bir süreç olduğu ve genellikle Mod 1 ve Mod 2 yüklemesinin birleşimi olarak literatürde tanımlanan karışık yükleme tarzını içerdiği bilinmektedir. Yansıma çatlağına karşı takviye tabakasının ömrü; takviye tabakasına “çatlağın girmesi (çatlak başlaması)” ve “çatlağın yayılımı” süreci olarak tanımlanabilir (Elseifi ve Al-Qadi, 2005).

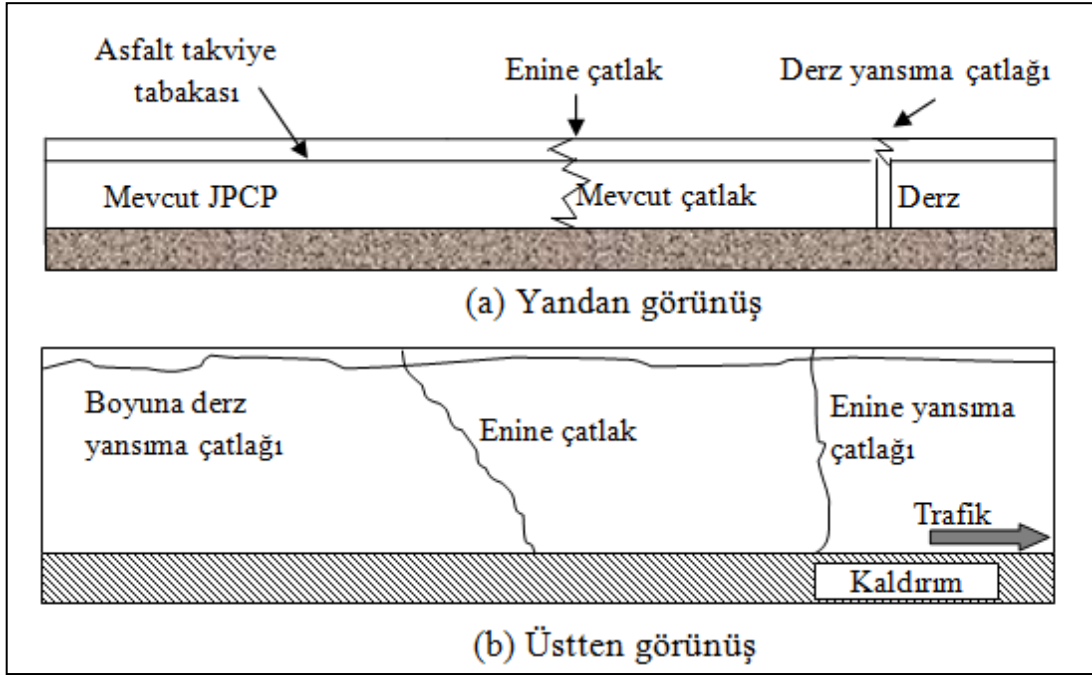


Şekil 1.17. Yansıma çatlağı oluşum mekanizmaları (Beak vd., 2008).

Kırılma mekaniğinde çatlaklar üç yükleme moduna göre sınıflandırılmıştır (Anderson, 2005). Mod 1’de (açılma modu), esas yük çatlak düzlemine dik olarak uygulanır ve çatlaklar çatlak düzlemine dik olarak büyür. Mod 2 ve Mod 3’de, yük çatlak düzlemine paralel olarak uygulandığında, sırasıyla, düzlemsel kesme yönünde ve düzlem dışı kesme yönünde çatlaklar meydana gelir. Bir JPCP üzerine bir asfalt takviye tabakası yerleşimi için, yansıma çatlağı kırılma şekilleri Şekil 1.18’de gösterilmiştir. Tipik olarak, hem sıcaklık hem de trafik yüklenmesi, Mod 1 kırılmasına neden olabilir. Sıcaklık değişimlerinin sebep olduğu beton plaktaki yatay yönlü hareketler ve teker yükünün doğrudan bir derz üzerinde olması durumunda asfalt takviye tabakasında oluşan basit eğilme nedeniyle asfalt takviyede yatay BŞD’ler yığılabılır (Beak vd., 2008).

Trafik yüklemesi aynı zamanda beton plakalarının farklı düşey (kesme) hareketinden dolayı Mod 2 çatlağına neden olabilir. Mod 3 çatlağı, beton plakaların yanıl (boyuna) hareketine bağlı olarak gelişir, ancak asfalt takviye tabakasında nadiren görülür (Lytton, 1989; Mukhtar ve Dempsey, 1996). Sıcaklık ve trafik yüklemeleri genellikle asfalt takviye tabakalarına birlikte etki eder, böylece yansıma çatlakları karışık modda gelişebilir. Aslında, pek çok çalışma, sıcaklık değişimlerine bağlı olarak gelişen Mod 1 yansıma çatlağı üzerine odaklanmıştır ve trafik yüklemesi nedeniyle karışık modda oluşan yansıma çatlağı davranışları bugüne kadar tam olarak araştırılmamıştır (Beak vd., 2008).

JPCP üzerine yerleştirilen asfalt takviye tabakalarında derz ve çatlak gibi süreksizliklerin takviye tabakasına yansıma mekanizması Şekil 1.18'deki gibi gerçekleşmektedir.



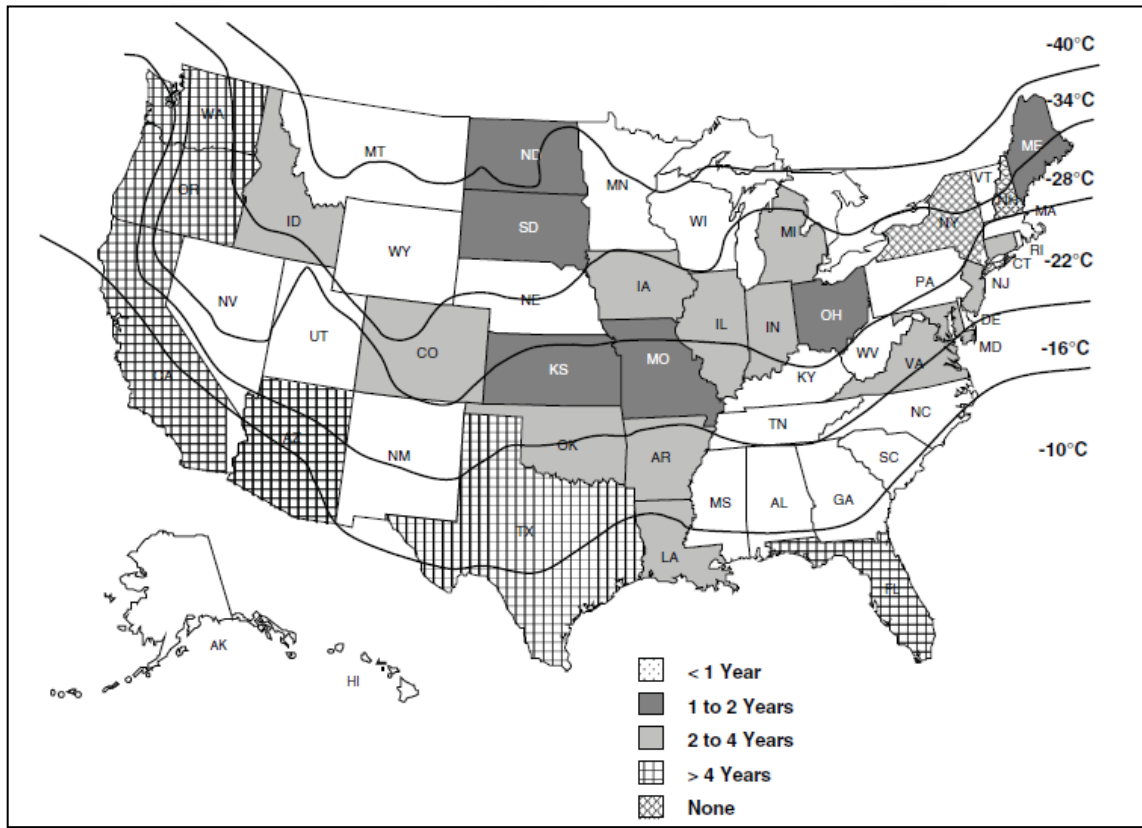
Şekil 1.18. Yansıma çatlaklarının enine ve boyuna derzlerde oluşumu

1.9.4. Yansıma Çatlağı Oluşum Süresi ve Trafik Seviyesinin Etkisi

Takviye tabakası, hasarlı bir beton kaplama tabakası üzerine yerleştirildiği takdirde, mevcut kaplamadaki çatlaklar ve derzler genellikle 1-5 yıl içinde yüzeye yayılır. Birkaç ay içinde yayıldığı da bildirilmiştir (Chen ve Frederick, 1992).

ABD'nin farklı eyaletlerinde beton kaplama üzerine asfalt takviye yerleştirilmesi ile ilgili toplam 26 farklı karayolu kuruluşu ile bir çalışma yürütmüştür. Çalışmada, temel tipi ile yansıma çatlağının oluşma süresi arasındaki ilişki, derz açıklığı ile yansıma çatlağının oluşma süresi arasındaki ilişki ve asfalt takviye tabakası serilmeden önce PCC kaplamaya yapılan iyileştirmeler araştırılmıştır. Karayolu kuruluşlarının çoğunluğu (22 tanesi yani %85'i) asfalt takviyesi serildikten sonraki ilk 4 yıl içinde yansıma çatlaklarının başladığını, 7 kuruluş ise ilk 2 yıl içinde başladığını belirtmiştir. Mevsimsel sıcaklık değişimleri ve taşıt yükleri özellikle beton kaplamaların onarımında yansıma çatlağı yayılım sürecini hızlandırabilir (Bennert, 2009).

Amerika'nın devlet karayolları ajanslarında, yansıma çatlaklarının sorun teşkil ettiği kompozit kaplamalardaki (beton üzerine asfalt yerleşimi) tipik trafik seviyelerini, ESAL (Equivalent Single-Axle Load, eşdeğer tek dingil yükü) değerlerini sorgulayan bir anket gerçekleştirmiştir. Ankette sorulan ESAL'lerin aralıkları (1)<3 milyon, (2) 3 ila 30 milyon ve (3)>30 milyon idi. Ajansların çoğu %58'i 3-30 milyon ESAL, % 39'u 30 milyondan fazla ESAL ve geri kalan % 3'ü de 3 milyondan az ESAL olduğu yanıtını vermiştir. Şekil 1.19'da görüleceği üzere 3-30 milyon ESAL içeren ve 3 milyon ESAL'den daha az olmamakla birlikte kompozit kaplamalarda görülen yansıma çatlaklarının oluşum süreleri verilmiştir (Bennert ve Maher, 2007).



Şekil 1.19. Asfalt takviye tabakası yerleştirilmesinden sonraki yansıma çatlağı oluşuncaya kadar geçen zaman (Bennert ve Maher, 2007).

Dhokal vd., (2016), uygulamadaki tecrübelerine dayalı olarak, yansıma çatlaklarının beton kaplama üzerine yerleştirilen asfalt takviye tabakalarında yılda 25.4 mm civarında yayıldığını belirtmiştir. Ayrıca takviye tabakalarında yansıma çatlaklarının önlenmesi veya geciktirilmesi ile ilgili olarak A.B.D.'deki bazı eyaletlerdeki bozulmuş beton kaplamalar

üzerine yerleştirilen 38.1-50.8 mm (1.5-2.0 in.) kalınlığındaki asfalt takviye tabakalarının yansıma çatlağına karşı ortalama servis ömürlerini belirlemeye yönelik bir çalışma yürütmüştür. Elde edilen istatistiksel verilere göre katılımcı eyaletlerin çoğu (%73) 38.1-50.8 mm kalınlıklarındaki asfalt takviye tabakalarının yansıma çatlağına karşı servis ömrünün 1-6 yıl gibi çok kısa bir zaman dilimi olduğunu belirtmiştir. Katılımcı eyaletlerin %12'si servis ömrünün 6-10 yıl arasında olduğunu, %15'i ise veri toplamadaki sorunlar sebebiyle bu konuda belirli bir süre hesaplayamadıklarını belirtmiştir. Bu yanıtlar, geçen 40 yıl boyunca bu konuda yapılan birçok çalışmaya rağmen, eyaletlerin çoğunluğunun hala yansıma çatlağı hasar mekanizmasını kontrol edemediğini göstermiştir. Ayrıca, kısa servis ömrü (1-3 yıl) bildiren eyaletlerin ABD ve Kanada'nın kuzey bölgesinde yer aldıkları bildirilmiştir. Bu eğilim, termal hareketlerin yansıma çatlaklarının hızlı yayılması üzerindeki etkilerini de kanıtlar nitelikte olmuştur.

1.9.5. Takviye Tabakası Kalınlığının Etkisi

Asfalt takviye tabakasının ve altındaki temel tabakasının kalınlığı azaldıkça, kalıcı deformasyonun bir göstergesi olarak kullanılan esnek kaplama yüzeyindeki düşey BŞD değerleri artmaktadır.

Yansıma çatlaklarının geciktirilmesi için daha kalın bir asfalt takviye tabakası kullanmak, bir ara tabaka eklemek kadar etkili bir yöntem değildir. Trafik yüklemesi daha kalın bir kaplama gerektirmedikçe, termal yüklemeye için daha kalın bir asfalt takviye tabakası gerekli değildir. Yaz aylarında asfalt takviye tabakasındaki gerilme büyüklüğünün, kış aylarındakine oranının %10 olduğu belirlenmiştir. Bu durum, asfalt takviye tabakasının sertliğinin yansıma çatlaklarının ne zaman gelişeceğini belirlemede kritik olduğu anlamına gelmektedir (Cho vd., 1998).

Genel olarak, asfalt takviye tabakasının kalınlığının artırılması, altta yatan kaplamadaki bir çatlak veya bir derz boyunca oluşan zayıf yük aktarımının etkisini azaltarak yüke bağlı oluşabilecek hasarı azaltabilir ve böylece, kaplama performansını etkili bir şekilde arttırabilir. Yansıma çatlaklarını geciktirmek için gereken takviye tabakası kalınlığının dört faktöre bağlı olduğu öne sürülmektedir (Williams vd., 2015):

1) Serilen takviye tabaka türü; bitümlü sıcak karışım (BSK) veya beton (PCC). Esnek kaplamalarda BSK takviye kaplama kalınlığı genellikle, derzli donatısız (JPCP) veya derzli donatılı beton kaplamaya (JRCP) göre daha azdır.

2) Kaplamadaki hasar türü; timsah sırtı çatlaklar, blok çatlaklar, enine çatlak, boyuna çatlak veya PCC derz çatlama; Yatay hareketler nedeniyle her türlü enine çatlak veya derzler için genellikle daha kalın kaplamalar gereklidir.

3) İklim; mevsimsel ve günlük sıcaklıklardaki çeşitlilik arttıkça, BSK takviye tabaka kalınlığı artar.

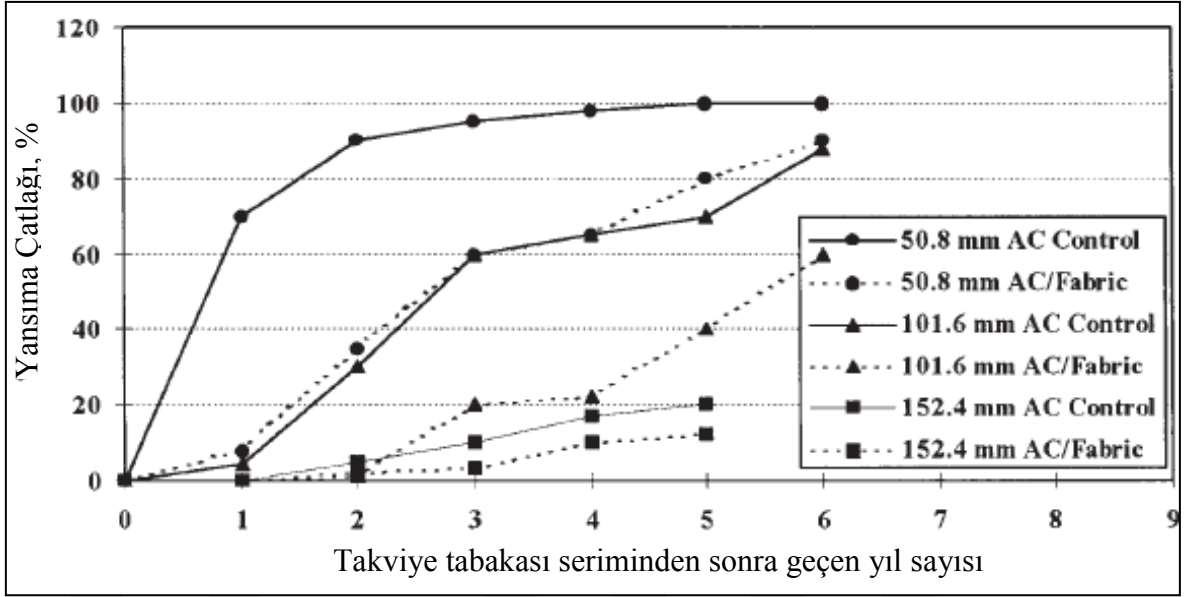
4) Aks yüklerinin sayısı ve ağırlığı; tekerlek yükleri, tekerlek ağırlıkları ve trafik hacmi ne kadar yüksekse, BSK takviye tabaka kalınlığı o kadar büyük olur (Williams vd., 2015).

Gürcistan'da yapılan bir çalışmada, takviye tabakasının kalınlığı arttıkça, yansımaya çatlaklarının oluşumunun önemli ölçüde azaldığı bulunmuştur. Başka bir rehabilitasyon tekniği kullanılmadığında minimum 100 mm'lik (4 in.) takviye tabakası kalınlığı önerilmiştir (Gulden ve Brown, 1983).

Başka bir çalışmada, 150 mm kalınlığındaki mevcut JPCP yol üzerine yerleştirilen 100 mm kalınlığındaki bir asfalt takviye tabakasının sahadaki incelemesi yapılmıştır. Yol kesitinin günlük ortalama trafiği 100-1,500 araç olup 20 yıllık tasarım yükü 1 milyon ESAL'dir. 2 yıl sonunda kaplama yüzeyinde yaygın şekilde enine yansımaya çatlakları olduğu gözlemlenmiştir. (Holdt ve Scullion, 2005).

Başka bir çalışmada, beton kaplama yüzeyine doğrudan takviye tabakası serilmesinin yansımaya çatlağı oluşması açısından rubblizasyon, çatlat-oturt ve ara tabaka kullanımı gibi pek çok sisteme göre daha riskli olduğu belirtilmektedir. Daha yüksek yansımaya çatlağı hasarı riski daha kısa bir kaplama hizmet ömrü ve daha sık kaplama rehabilitasyonuna yol açabileceği belirtilmiştir (Von Quintus vd., 2010).

Texas'ta yapılan bir çalışmada, farklı takviye tabakası kalınlığı ve kaplama kumaşı (paving fabric) kombinasyonunun yansımaya çatlağı yönünden etkileri incelenmiştir. Kaplama kumaşının farklı takviye tabakası kalınlıklarındaki etkisi araştırılmış ve sonuçlar Şekil 1.20'de gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, üç farklı kalınlıkta asfalt takviye tabakası kumaşlı ve kumaşsız olarak çalışılmıştır. Takviye tabakası kalınlığının artması, yansımaya çatlaklarını önemli ölçüde geciktirmiştir. 5 yıl sonra 152.4 mm'lik takviye tabakası %20'den daha az yansımaya çatlağı sergilerken, 50.8 mm'lik takviye tabakası %100 yansımaya çatlağı göstermiştir (Carmichael ve Marienfeld, 1999).



Şekil 1.20. Farklı takviye tabakası kalınlıkları için zaman içinde oluşan yansımaya çatlağı yüzdeleri (Carmichael ve Marienfeld, 1999).

Başka bir çalışmada, farklı aks yüklerinin neden olduğu BŞD ve gerilmelerin, asfalt kaplama tabakasının kalınlığının artmasıyla azaldığı belirtilmiştir. Aynı çalışmadan elde edilen verilere göre, asfalt tabakasının kalınlığının 100 mm'den 200 mm'ye yükseltilmesi, yüzey tabakasının altındaki çekme BŞD değerini azalmıştır. Daha kalın asfalt tabakası için bütün kaplamada belirgin biçimde daha küçük çekme BŞD değerleri görülmüştür. Bu bulgular, daha kalın asfalt kaplama tabakasının, ince tabakadan daha iyi bir yorulma ve tekerlek izi performansına sahip olduğunu göstermiştir (Huang, 2017).

1.9.6. Temel ve Taban Zemini Desteğinin Etkisi

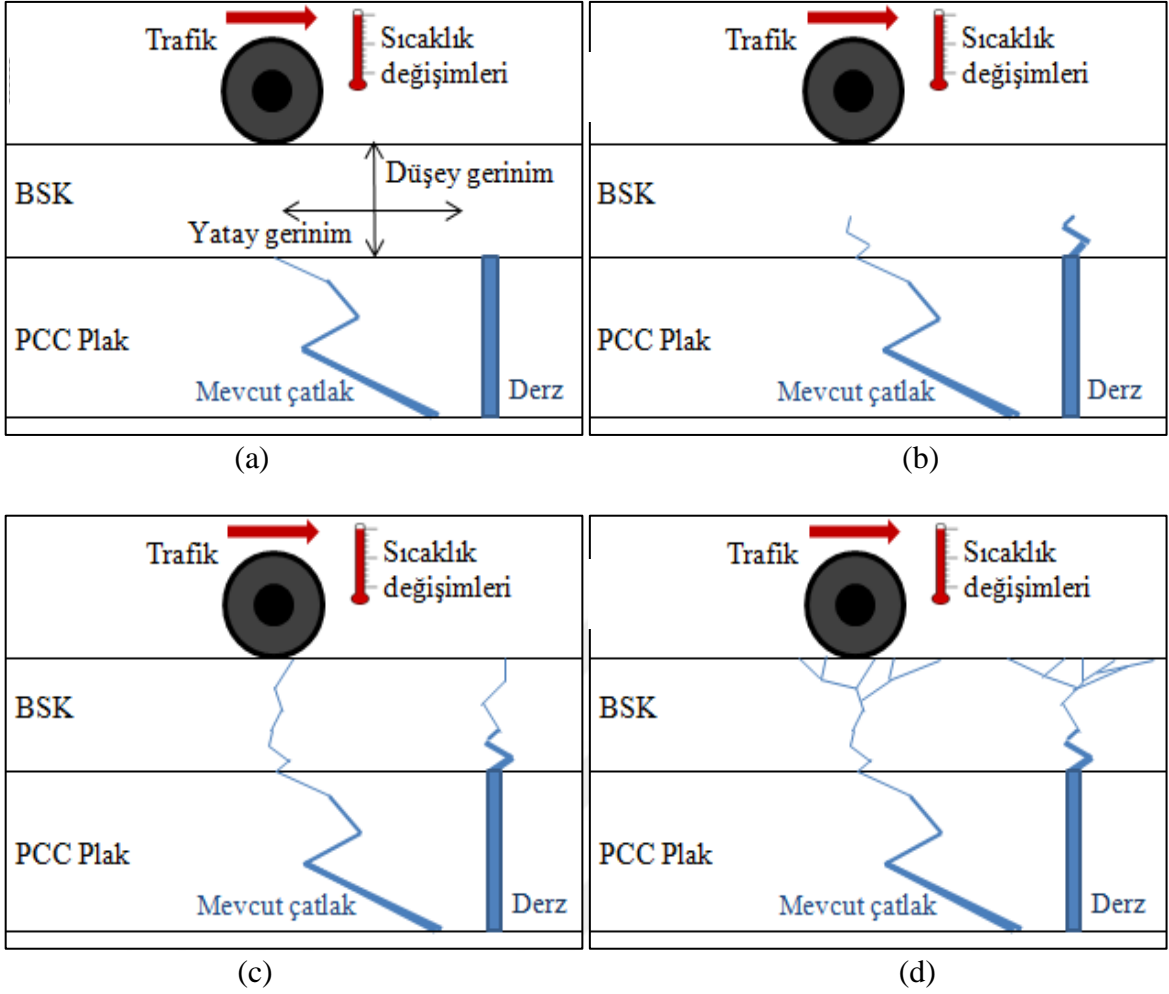
Temel ve taban zemini destek koşulları, kaplamanın uzun vadeli performansını da önemli ölçüde etkiler. Zayıf temel ve taban zemini desteği, daha büyük deformasyon ve daha yüksek gerilme/gerinim yoğunlaşmaları doğurur, bu da yansımaya çatlaklarının daha hızlı gelişmesine ve yayılmasına neden olur. Temel ve taban zemini koşullarını değerlendirmek için, görsel inceleme veya deformasyon testleri kullanılabilir. Düşen ağırlıklı deflektometre (FWD) testi gibi deformasyon testleri, kaplama tabakalarının modülleri için daha doğru yapısal bilgiler sağlayabilse de, drenaj gibi diğer fonksiyonel koşullar FWD testi ile belirlenemeyebilir. Bu sebeple görsel inceleme ve deformasyon

ölçümlerinin kombinasyonu önerilebilir. Yeraltı radarları (GPR) da nem içeriği, yeraltı anomalileri ve her bir tabakanın kalınlığı gibi ek bilgiler sağlayabilir (Nam vd., 2014).

1.9.7. Sıcaklığın Etkisi

Yansıma çatlakları, asfalt ve beton kaplamaların yatayda hareket etmelerine neden olan sıcaklık değişimleriyle doğrudan ilişkilidir. Kaplama sıcaklıkları periyodik olarak derinlik boyunca değişim göstermektedir. Periyodik sıcaklık dağılımları, tekrarlı büzülme ve genişleme hareketlerine neden olmaktadır. Büzülme durumunda asfalt kaplama alt yüzeyinde çekme gerilmeleri oluşmaktadır. Asfalt kaplamalarda oluşan bu termal gerilmeler, trafik yüklerinin düşey etkisiyle daha kritik bir hal almaktadır. Termal değişikliklerin neden olduğu yansıma çatlakları, özellikle asfalt kaplamaların beton kaplama derz bölgelerine yakın yerlerde gelişerek ilerlemektedir (Nunn, 1989; Sha, 1993; Castell vd., 2000; Nesnas ve Nunn, 2004; Song vd., 2006; Dave ve Buttlar, 2010).

Çatlamış bir beton kaplama üzerindeki asfalt takviye tabakasında oluşan yansıma çatlağının farklı gelişim evreleri Şekil 1.21’de gösterilmektedir. Bu işlem iki moda açıklanabilir. Mod 1’de, yansıma çatlağının ilerleyişi, sıcaklık ve/veya nem değişiminden dolayı beton plakların yatay hareketinden kaynaklanır. Mod 2’de, trafikten gelen düşey yük, çatlamış beton levhaların diferansiyel düşey hareketine neden olur ve büyük bir kesme gerilmesini doğurur ve bu nedenle kesme hasarına yol açar (Zaini vd., 2015).



Şekil 1.21. Asfalt takviye tabakalarında oluşan yansıma çatlakları gelişim evreleri: (a) Yatay ve düşey BŞD'ler asfalt kaplama altında gelişir. (b) Kritik mikro çatlaklar asfalt altında gelişir ve asfalt içinden yansıma çatlakları olarak yukarı doğru büyür. (c) Yansıma çatlaklarının ilk evresi (Mod I) çatlak yüzeyden görünür. (d) Yansıma çatlaklarının 2. evresi (Mod II) çok sayıda çatlak ve bozulmuş yüzey (Chen ve Jiang, 2008).

1.9.8. Yansıma Çatlakları Önleme/Geciktirme Yöntemleri

Asfalt takviye kaplamaları, derzli ve/veya ciddi şekilde çatlamış rijit ve/veya esnek kaplamalar üzerine yerleştirildiğinde, kaplama yapısındaki çatlaklar ve derzler zamanla yüzeye yansıyabilir. Düzgün korunmadığı takdirde, bu çatlaklar yüzey suyunun alttaki yol tabakalarına nüfuz ederek, asfalt takviye tabakası ile beton kaplama arasındaki bağı daha fazla zarar görmesine ve yol tabakalarında nem hasarına neden olabilir. Artacak olan pürüzlülüğü ve ileride ortaya çıkabilecek kaplama sorunlarını önlemek için yansıma çatlakları gözlemlenmeli ve gerekli onarımlar yapılmalıdır. Tasarım sürecinde yansıma

çatlaklarının oluşmasını önlemek için yöntemler ve materyaller geliştirmeye yönelik sayısız çalışma mevcuttur. Günümüzde kullanılan çoğu malzeme ve yöntem, ne yazık ki yansıma çatlaklarının şiddetini geciktirmek veya sınırlamaya yöneliktir. Kaplamaların hizmet ömrünün kısa olmasının bir nedeni, belirli bir proje için seçilen rehabilitasyon yönteminin, mevcut kaplama, yeraltı suyu ve drenaj koşulları durumu için yetersiz olmasıdır (URL-6).

1930'lu yılların başından bu yana, yansıma çatlaklarını geciktirmek için yeni ve nispeten ucuz teknikler bulmak için önemli kaynaklar ve çabalar harcanmıştır (Barksdale vd., 1989). Takviye tabakasının yansıma çatlağına olan direncini arttırmak için ara tabaka sistemlerinin kullanımı da dâhil olmak üzere farklı yöntemler önerilmiştir. 1980'lerin başındaki deneysel araştırmalar, ara tabaka sistemlerinin, eski bir çatlaklı kaplama üzerine yerleştirilen yeni takviye tabakasında oluşabilecek yansıma çatlaklarını geciktirmek veya önlemek için kullanılabilirliğini göstermiştir (Dhakal vd., 2016).

Karayolu kuruluşları arasında, uygulanan tekniğin yansıma çatlağını geciktirmede başarılı olması için çatlakların onarım maliyetine eşdeğer olduğu konusunda bir görüş vardır (Huges ve McGhee, 1973). Takviye tabakasının uygulanmasından birkaç ay sonra yansıma çatlaklı bir görünüm oluştuğunda bu düşünce yersiz olmaktadır (Steen, 2000).

Yansıma çatlaklarının rehabilitasyon stratejileri çatlakların şiddetine ve derecesine bağlıdır. Karaşahin (2017)'e göre, yansıma çatlağı bozulma düzeyleri şu şekilde sınıflandırılabilir;

- Az: Çatlak genişliği 6 mm'den küçüktür.
- Orta: Çatlak genişliği 6-19 mm arasındadır ve bölgesel rastgele çatlaklar oluşmaya başlar.
- Çok: Çatlak genişliği 19 mm'den büyüktür ve oldukça yoğun rastgele çatlaklar oluşur (URL-7, 2017).

Yansıma çatlaklarının oluşumunun önlenmesinde kullanılan pek çok yöntem ve malzeme mevcuttur. Bu amaçla kullanılan geosentetik malzemelerin kullanımı yeni olmamakla birlikte, özellikle son birkaç on yıl içerisinde yaygın olarak kullanılan ve araştırılan bir konu olmuştur. Uygulamada yansıma çatlaklarının önlenmesi ya da geciktirilmesi çeşitli yöntemler kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Bunlardan bazıları aşağıdaki gibi sıralanabilmektedir;

- 1) Eski bozulmuş kaplamada bulunan çatlakların tüm çatlak derinliğinde kaldırılarak aynı türden karışım ile kaplamak

2) Kalın takviye tabakası yapmak. Takviye tabakası kalınlaştıkça gerilmeler daha geniş alana dağılacak ve çatlakların genişliği ve büyüklüğü azalabilecektir.

3) Yüksek dayanımlı takviye tabakaları kullanmak (modifiye bitümlü asfalt, taş mastik asfalt v.b)

4) Takviye tabakasının altına açık gradasyonlu granüler malzeme yerleştirmek

5) Takviye tabakasının altında güçlendirme amaçlı (geogrid, geokompozit, çelik grid vb.) ve gerilme sönümleyici olarak ayırıcı ara tabaka (geotekstil, SAMI, ISAC) kullanmaktır.

Bu teknikler, takviye tabakasına aktarılan gerilmeleri en aza indirerek çatlakların bu tabakaya yansımalarını engelleyebilir.

Yansıma çatlaklarının ilk sinyallerinin verilmeye başladığı takviye tabakalarında, kaplama ömrünü uzatmak için yapılan ilk onarım stratejisi çatlak yalıtımı yapılarak nem girişini engellemektir (AASHTO, 1993; Walker, 2012; Blankenship, 2012).

Beton kaplama üzerine yerleştirilen asfalt takviye tabakalarında oluşması muhtemel yansıma çatlaklarının önlenmesinde/geciktirilmesinde kullanılacak diğer yöntemler aşağıdaki gibi sıralanabilmektedir.

- Mevcut beton plaktaki derz veya çatlak gibi süreksizliklerin dolgular ile onarımının sağlanması

- Mevcut plaktaki çatlakların hareketini en aza indirmek için çapraz dikiş kullanılması

- Mevcut plaktaki derzlerde yuvalar açılarak dowel bar yerleştirilmesi suretiyle plaklar arasındaki yük aktarma yeteneklerini geliştirilmesi

- Asfalt takviye tabakasının sertliğini azaltmak veya takviye-mevcut kaplama arasındaki gerilmeleri azaltmak için özel malzeme kombinasyonları kullanılması

- Asfalt lastik (AR) kaplamasını uygulanması

- Geosentetikler gibi polimerik ara tabakalar kullanılması (genellikle bir takviye tabakasının yapımından önce beton plak üzerin bir bitümlü tack coat (yapıştırma tabakası) serilmesi).

- Gerilme emici kompozit ara tabaka (ISAC) kullanılması

- Glasgrid blokları kullanılması (Trevino vd., 2004).

Takviye tabakası kalınlığının artırılması, çatlat-oturt, dikiş ve mühürleme, çatlak önleyici granüler tabaka ve ara tabaka sistemleri dâhil olmak üzere birçok yansıma çatlak kontrol sistemi yaygın olarak kullanılmaktadır (Mukhtar, 1994; Cleveland vd., 2002).

Yansima çatlağı kontrol sistemlerinin başarısı, esas olarak mevcut kaplama koşullarına bağlıdır. Yük aktarma verimliliği (YAV) olarak temsil edilen farklı derz defleksiyonları, yansima çatlaklarının gelişimini etkileyen en önemli faktördür (Zhou ve Sun, 2005).

Asfalt Enstitüsü'ne (1993) göre, mevcut JPCP'lerin YAV oranına dayanan farklı iyileştirme yöntemleri önerilmektedir. YAV oranı %75'ten daha büyükse dikiş veya mühürleme (saw-cut/seal) veya ara tabaka sistemleri; YAV %75'ten daha az fakat %60'tan daha büyük ise çatlak destek tabakası veya kırılmış tabaka ve YAV %60'dan daha az ise kırılmış tabaka. Ayrıca, Button ve Lytton (2007), JPCP'lerin YAV oranının %80'den daha büyük olması durumunda geosentetik ara tabaka sistemlerinin kullanımını önermektedir.

Yansima çatlağı kontrol sistemlerinin kullanımı bir dereceye kadar başarılı olmaktadır; ancak şimdiye kadar hiçbir teknik, yansima çatlaklarının önlenmesi için mükemmel çözümü sunmamaktadır. Bunun esas sebebi de yansima çatlağı mekanizmasının ve yansima çatlağı kontrol sistemlerinin tam olarak anlaşılammış olmasıdır (Lorenz, 1987; Button ve Lytton, 2007). Sınırlı uygulamalarından bağımsız olarak, ara tabaka sistemleri, hem performans hem de maliyet açısından yansima çatlağı kontrol sistemleri arasında etkili bir yöntem olarak görülmüştür (Button ve Lytton, 1987; Van Deuren ve Esnouf, 1996; Buttlar vd., 2000; Steen, 2004).

Bennert (2010)'a göre, yansima çatlaklarının oluşumuyla ilgili aşağıdaki sonuçlara varmıştır:

1) Yansima çatlakları, farklı trafik seviyelerinde ve temel tiplerinde eşit olarak ortaya çıkmaktadır.

2) Daha güçlü temel tabakası malzemesi kullanılmasıyla yansima çatlağı oluşumu için geçen süre, daha fazla olmaktadır

3) Kısa derz açıklıklarına sahip beton kaplamalar üzerine asfalt takviye tabakası yerleştirilmesiyle oluşturulan kompozit kaplama genellikle daha uzun ömre sahiptir.

4) Takviye tabakası malzemesi yansima çatlağı oluşumu üzerinde çok büyük bir etkiye sahiptir. Asfalt takviye tabakası düşük sıcaklıklarda, çatlama karşı dirençli olmalıdır.

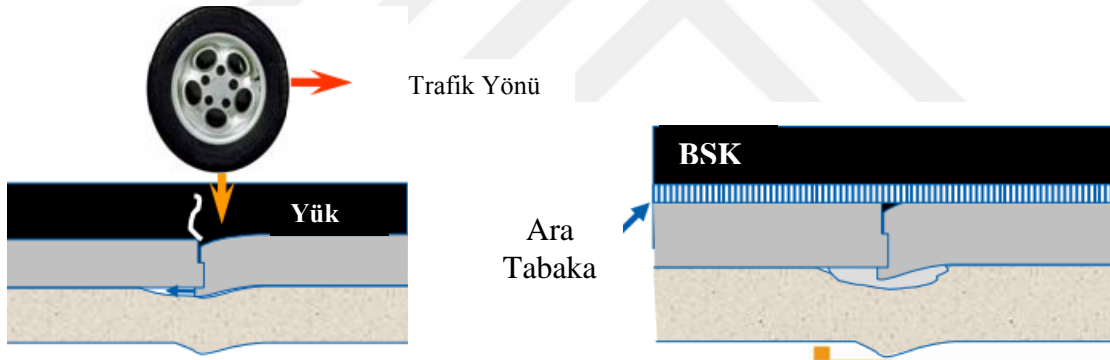
5) Yansima çatlağı önleme metotlarından en iyi performansa sahip olanlar asfalt bazlı olanlar olmuştur (SAMI karışımları).

6) Daha sıcak/ılıman iklimlerde yer alan ülkelerde, geotekstil, geosentetikler ve geogridlerle daha iyi bir başarı elde edilmişken daha soğuk iklimlerde aynı malzemelerin yansima çatlağını önlemediği görülmüştür (Button ve Lytton, 2007; Buttlar vd., 1999)

7) Takviye tabakasının kalınlığının artırılması, yansıma çatlaklarının geciktirilmesinde %33 oranında başarılı olmuştur.

1.9.8.1. Ara Tabaka Sistemleri

Ara tabaka sistemleri, Şekil 1.22’de görüleceği üzere bozulmuş kaplama tabakası ile takviye tabakası arasında yansıma çatlağı oluşumuna karşı direnci artırmak amacıyla uygulanan bir yöntemdir (URL-7, 2017). Ara tabakalar, hem geçirimsiz bir tabaka olarak kullanılırken hem de güçlendirme ve gerilme sönümleyici özellikleriyle yansıma çatlaklarının önlenmesinde kullanılmaktadır (Güngör vd., 2009). Ara tabaka, iki tabaka (beton kaplama-asfalt takviye) arasında donatı görevini yaparak dayanımı artırılmış kompozit asfalt kaplama tabakası elde edilmesine yararken, üst yapının deformasyonunu da en aza indirger (URL-8, 2018).



Şekil 1.22. Ara tabaka sistemi kullanılmasının yansıma çatlağı oluşumuna etkisi (Beak vd., 2008).

Ara tabaka kullanımı, uygun maliyet, asfalt takviye tabakasının gerilme ve birim şekil değiştirme (BŞD) özelliklerini iyileştirme, modifiye asfalt kullanılarak çatlama dirençli asfalt kaplamaların yapma gibi önemli avantajlar sağlayabilmektedir. Ara tabaka olarak kullanılan malzemeler; kum asfalt, SAMI (stress-absorbing membrane interlayer, gerilme sönümleyici membran ara tabaka), geotekstil, geomembran/geokompozit, ızgara/çelik ağ ve 3 boyutlu (3D) ızgara malzemeleri olabilmektedir. Kullanılan ara tabaka malzemelerinin özellikleri Tablo 1.2’de gösterilmektedir. Ara tabaka seçmek için dikkate alınması gereken ölçütler; performans ve maliyettir. Fakat doğru tasarım ve işçilik büyük önem arz etmektedir.

Tablo 1.2. Ara tabaka malzemelerinin özellikleri (Beak vd., 2008).

Ara tabaka malzemesi	Güçlendirme	Büyük BŞD'lere karşı direnç	Su geçirimsizlik
Kum asfalt		X	X
SAMI		XX	XX
Grid kompozit	X/XX	X	X/XX
Çelik ağ	XX	X*	X*
3D Izgaralar	XX		
BŞD tolerans tabakası		XX	XX
X:Kötü, XX:İyi, X*: Orta			

Bennert (2010)'a göre, beton kaplama üzerine yerleştirilen asfalt takviye tabakalarının yansıma çatlağı potansiyelinin değerlendirilmesine ilişkin mevcut uygulamalarda büyük bir boşluk vardır.

Loria-Salazar (2008) yansıma çatlağı mekanizmaları ve iyileştirme teknikleri hakkında yaptığı kapsamlı bir araştırmayla Tablo 1.3'teki bilgileri derlemiştir.

Tablo 1.3. Yansıma çatlağı iyileştirmeleri (Loria-Salazar, 2008; Williams vd., 2015).

İyileştirme Yöntemi	Tanım	Performans
Yerinde soğuk geri dönüşüm	Mevcut kaplamanın üst katmanlarını özel geri dönüşüm ekipmanlarıyla söktükten veya kırdıktan sonra, doğal malzemelerle karıştırarak güçlü esnek bir temel tabakası oluşturulmasıdır	13,000 YOGT'ye kadar ve 200,000 yıllık ESAL'e sahip yollar için umut veren performans sergilemektedir
Cam ızgara	Geosentetik malzeme, yeterli boyuttaki açıklıklara sahip kesişen paralel çubuklardan oluşur.	Yansıma çatlağı geciktirmede/önlemedeki faydaları net değildir. Engebeli yüzeylerde kullanımı ile ilgili kaygılar vardır.
Geotekstil ara tabaka	Geotekstil ara tabakası, genel olarak gerilme sönümleyici ve su yalıtım membranı olarak işlev görür. Gerilme ile ilgili performansı, takviye tabakalarındaki çatlakların azalması ile doğrulanmıştır.	Yüklemeye bağlı yorulma çatlağı için kullanıldığında etkilidir. Termal çatlamayı geciktirmede iyi performans göstermemektedir.
Asfalt kauçuk	Asfalt kauçuk yalıtımı, geleneksel yoğun gradasyonlu BSK veya süreksiz gradasyonlu BSK ile kaplanmıştır.	5 yıllık bir süre için yansıma çatlaklarını azaltır veya geciktirir.
Gerilme sönümleyici membran (SAMI)	Alt kaplamadaki çatlakların hareket ve gerilmelerini, takviye tabakasında gerilme yaratmadan önce dağıtmak amacıyla alttaki tabaka ile asfalt takviye tabakası arasına yerleştirilen ince tabaka	Yansıma çatlağı oluşum oranını azaltmada oldukça başarılıdır.
Kırıntı kauçuk kaplama	Lastik kauçuğunun ıslak işlemlerle BSK'ya ilave edilmesiyle üretilir.	Karışıma katılan lastik kauçuk oranına bağlı olarak performansı başarılıdan tahrip ediciye kadar değişebilir.

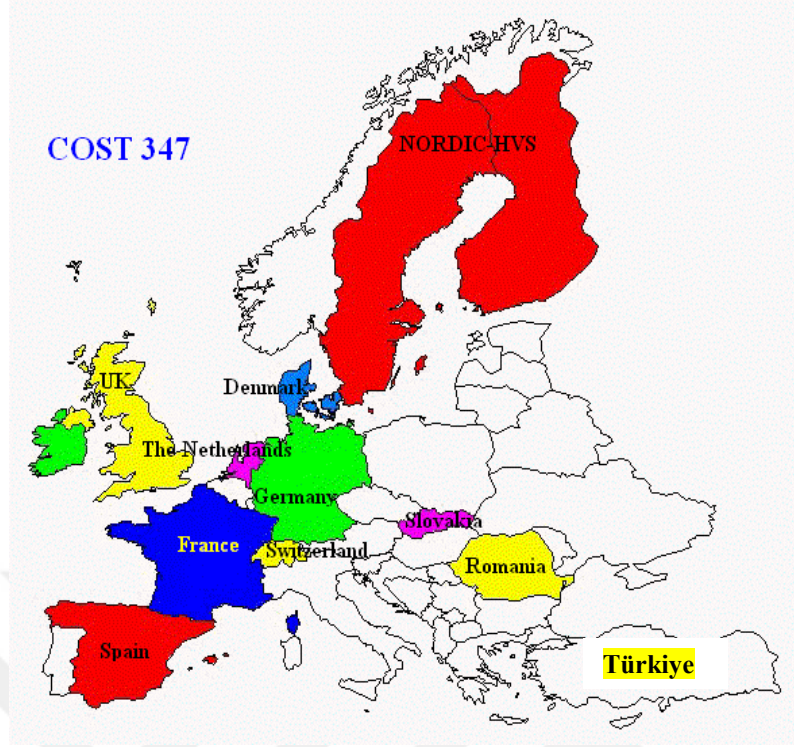
1.10. Hızlandırılmış Yol Testi (HYT) Tesisleri

Yeni ortaya çıkan kaplama teknolojilerinin veya yenilikçi konseptlerin değerlendirilmesi ve onaylanması, kaplamaların servis halinde uzun vadeli performanslarını değerlendirmeyi gerektirir. Servis değerlendirmesi ise trafik yüklemesi, malzeme özellikleri ve çevresel etkiler arasındaki etkileşimin dikkate alınmasını gerektirir. Böyle bir değerlendirme yaklaşımının birincil sakıncası, potansiyel olarak anlamlı sonuçlar elde etmek için gerekli olan geniş zaman aralığıdır. HYT tesisinin esas avantajı da, tam ölçekli bir kaplama yapısında 10-20 yıl (gerçek trafik yoğunluğuna bağlı olarak) içinde uygulanacak gerçek ağır trafik yüklerinin iki aydan daha kısa bir sürede uygulanmasını mümkün kılmasıdır (Perez vd., 2006).

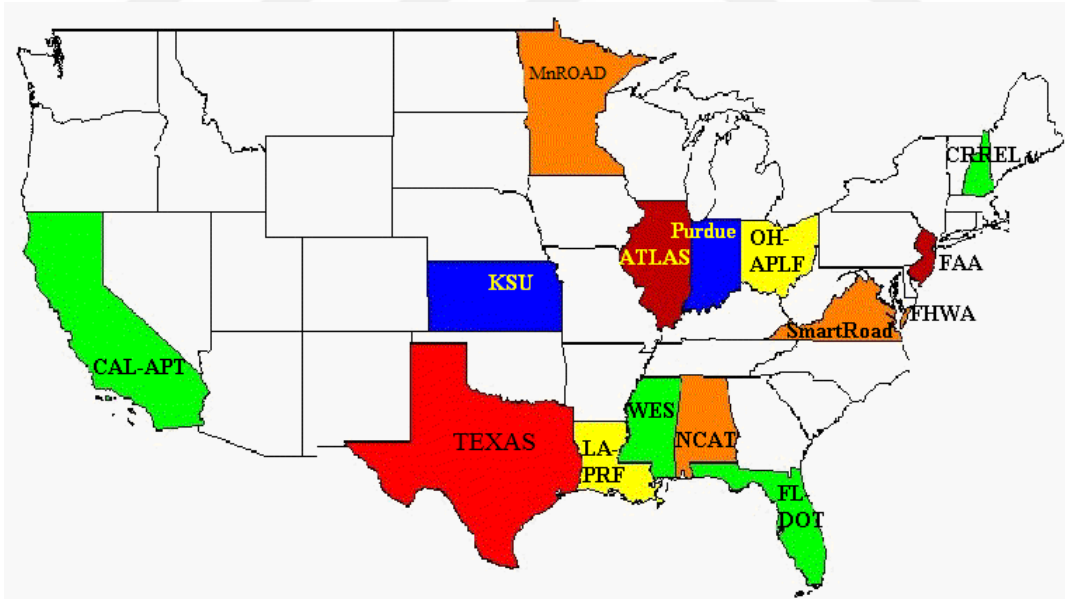
Servis koşullarını birebir yakın biçimde taklit eden daha hızlı ve daha pratik değerlendirme yöntemlerine duyulan ihtiyaç, HYT tesislerinin dikkate alınması gereğini doğurmuştur. HYT, genellikle, servis halinde uzun dönemli yükleme koşullarını simüle eden bir yol sistemine, gerçekçi bir tekerlek yüklemesinin kontrollü olarak uygulanması şeklinde tanımlanmaktadır. Bu, bir yol üstyapısının performansının gerçek saha koşullarında incelemesine kıyasla çok daha kısa bir zaman dilimi içinde oluşabilecek üstyapı hasarlarının ve üstyapının bu hasarlara verdiği tepkinin belirlenmesine olanak tanır. HYT, yol teknolojisini geliştirirken ve kaplama sistemleri performansının anlaşılmasını/tahmin edilmesini sağlarken; erken, güvenilir ve faydalı sonuçlar üretebilmektedir (FDOT Office, 2011).

Hızlandırılmış yol testleri, geçiş yüklerinin sıklığını, aks yüklerinin arttırılmasını, çevresel etkilerin (sıcaklık, nem içeriği) kontrol edilmesini sağlaması açısından oldukça farklı kombinasyonları çok kısa bir zamanda ve gerçek arazi çalışmalarına kıyasla oldukça ekonomik olarak çözen bir test sistemidir. Farklı yükleme ve çevre koşulları altında kaplama davranışlarını incelemek, sahada uygulanmadan önce mevcut uygulamalardaki eksiklikleri tespit etmek ve yeni malzemeleri, tasarımları, teknik özellikleri veya yapım standartlarını değerlendirmek için kullanılmaktadır (Jones, 2011).

Avrupa'daki ve Amerika'daki mevcut HYT tesisleri sırasıyla Şekil 1.23 ve Şekil 1.24'te gösterilmektedir. Türkiye de dâhil olmak üzere Dünya'da toplam 37 adet HYT tesisi mevcuttur.



Şekil 1.23. Avrupa’da HYT tesislerinin bulunduğu ülkeler (URL-9, 2018).



Şekil 1.24. Amerika’da HYT tesislerinin bulunduğu eyaletler (URL-10, 2018).

HYT pistleri doğrusal ve dairesel olmak üzere iki çeşit olarak inşa edilmişlerdir. Doğrusal pistli HYT tesislerinde trafik hız sınırlandırması vardır ve birkaç istisna dışında, kaplama tepkisi ve performansını etkileyebilecek iki yönlü (gidiş-geliş) yükleme kullanılır.

Hali hazırda kullanımda olan bir kaplama üzerine getirilerek monte edilebilirler. Test kesitindeki herhangi bir sorun, diğer kesitleri etkilemez.

Dairesel pistli HYT tesisleri, uygulama kolaylığı, yüksek hızda çalışma ve eş zamanlı olarak farklı kaplama kesitlerini test edebilme avantajlarına sahiptir. Bununla birlikte, kaplamanın bir kesitinde sorun olması durumunda, diğer tüm test kesitlerinin performansı etkilenir ve pist yeterli çapta olmadıkça, yanal kesme kuvvetleri (ve yüksek lastik aşınması) bir sorun oluşturabilir. Ayrıca, çoğu zaman halka şeklindeki kaplamanın inşasında bazı zorluklar söz konusudur.

HYT tesislerinin çoğu, yüklenen tekerlek düzeneği dairesel pistin etrafında dönerken dairenin merkezinde dönen kılavuz olarak görev yapan, genişletilebilir ve katlanabilir bir kol ile dairesel bir pisti test eden bir yarım aksa benzeyen yüklü bir tekerlek tertibatından yararlanır. Küçük (40 m'den daha az çaplı) tesislerin çoğu özel binalarda yer alırken, büyük tesisler dışarıda çalıştırılmaktadır. Hız aralığı 120 km/s'e kadar ve saatte 5,000 yüklemeyi aşan bir geçiş sayısı elde edilebilir (Metcalf vd., 1996). HYT kullanımının sağlayacağı faydalar aşağıdaki gibi sıralanabilmektedir:

- Seçilen iyileştirme yöntemine kaplama tepkisinin çok daha kısa sürede elde edilmesi
- İyileştirme yöntemlerinin benzer koşullar altında birbiriyle karşılaştırılabilme potansiyeli (Steyn vd., 1997; Steyn 1996; Strauss vd., 1998; Van der Merwe vd., 1992)
- İyileştirme yöntemlerine çevre koşullarının (sıcak-soğuk ve yaş-kuru) etkisinin simüle edilerek incelenme potansiyeli (Metcalf vd., 1996; Harvey vd., 1996; Van der Merwe vd., 1992)
- İyileştirme tekniklerini uygulamadan önce bir test bölümüne özel kaplama hasar mekanizmaları uygulanarak, daha sonra çeşitli iyileştirme seçeneklerinin bu hasar koşulları üzerindeki etkisi değerlendirilebilir (Metcalf vd., 1996; Harvey vd., 1996; Steyn vd., 1997; Steyn 1996)
- Farklı yükleme parametrelerinin (örneğin; yük seviyesi veya lastik şişme basıncı-lastik temas gerilmeleri) çeşitli kaplama parametrelerinden gelen tepki üzerindeki etkisi elde edilebilir (Kannemeyer vd., 2006)

HYT kullanımının bazı sakıncaları da mevcuttur. Bunlar aşağıdaki gibi sıralanabilmektedir:

- Sürüş kalitesinin etkisi, değerlendirilen kısa kaplama bölümleri ve bazı cihazlarda kullanılan yük uygulama yöntemi (kontrollü sabit yük seviyeleri) nedeniyle doğru olarak ölçülemeyebilir
- Çoğu HYT cihazının yükleme hızı, sahadaki gerçek trafikten daha düşüktür ve daha yüksek hız efektleri doğru şekilde simüle edilemeyebilir
- Test bölümleri genellikle kısadır ve bu kadar kısa iyileştirme seçeneklerinin oluşturulmasının etkileri, istenmeyen inşaat kusurlarına yol açabilir
- Dönme, hızlanma ve yavaşlamanın etkisi test edilemez (Steyn, 2009)

Bununla birlikte, HYT tesislerinin kaplama iyileştirme/koruma yöntemlerinin performansının belirli yönlerini değerlendirmedeki faydaları, sakıncalarından daha ağır basmaktadır. HYT ile birlikte potansiyel iyileştirme/koruma yönteminin gerekli saha ve laboratuvar değerlendirmelerini yapmak da önemlidir.

Test sahasındaki pist uzunlukları, genellikle 5-12 m arasında değişmektedir. Test yükünün büyüklüğü 4.5-120 kN arasında olup, havaalanları için 300 kN'a kadar çıkarılabilmektedir. Hızlar 8-29 km/s arasında değişmektedir (McNerney vd., 1994).

Van der Merwe vd., (1992) ve Croney (1991) göre, hızlandırılmış yol testlerinden, bitümlü kaplamalar için anlamlı sonuçlar elde etmek için yaşlanmanın etkisini hesaba katılmak zorunda olduğunu belirtmiştir. Bu bulgular ışığında, HYT tesisinde kaplama hasarlarının daha hızlı gerçekleşmesini sağlamak için sıcaklık gibi fiziksel ortam şartları kontrol edilebilmelidir.

HYT ve saha çalışmalarında ince asfalt takviye tabakalarında oluşan çift ve tekil yansıma çatlaklarının gözlemlendiği bir çalışmada, HYT'de, derz yakınındaki asfalt/beton kaplama ara yüzünde 200-300 mm'lik ayrışma (delaminasyon) meydana gelmiştir. Yansıma çatlağı, derzin 40-60 mm yakınından başlamış ve takviye tabakasının yüzeyine doğru dikey yönde yayılmıştır. Saha çalışmasında, derzlerin yaklaşık %90'ında (525 tane derzin 473'ünde), yansıma çatlağına rastlamışlardır; bunların çoğunluğu (%97'si) çift çatlak şeklinde oluşmuş yansıma çatlakları olmuştur. Bu nedenle araştırmacılar, çift yansıma çatlağının ince asfalt takviye tabakasında önemli bir yansıma çatlağı türü olduğu sonucuna varmışlardır (Zhou ve Sun, 2002; Zhou ve Scullion, 2005).

Hızlandırılmış yol testlerinin yürütülmesindeki başlıca kısıtlama yüksek sıcaklıklardır. Bitümlü malzemelerde tekerlek izi ve sünme oluşumundan kaçınmak için, mevcut kaplamanın toplam ömrü boyunca tüm ısıl koşulunu temsil etmeli ve ayrıca yüksek sıcaklık yansıma çatlaklarını önemli ölçüde azalttığı için, testler yılın soğuk dönemlerinde

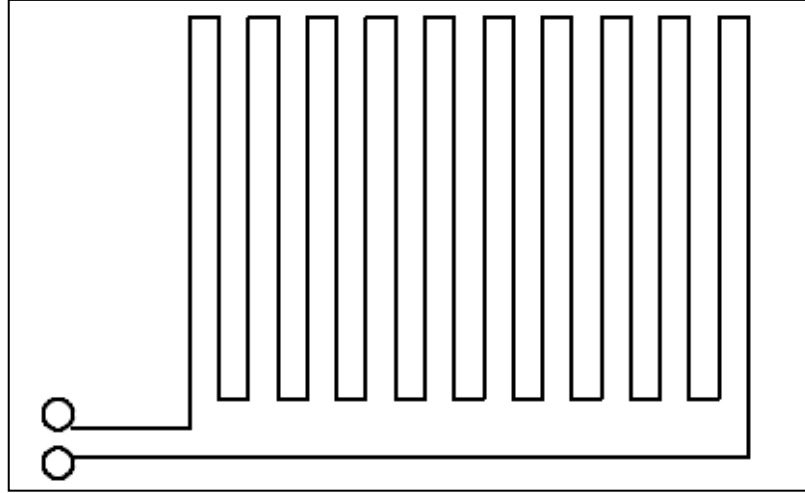
yapılmalıdır. Yansıma çatlaklarının simülasyonunda kullanılan HYT ile ilk kez, sinematik olarak, tam ölçekli bir kaplama yapısında, yansıma çatlağı oluşumunun kaydedilmesi ve görselleştirilmesi mümkün olmuştur. Ayrıca, gerinim verilerinin edinimi ile ilgili olarak, test, tam ölçekli bir kaplama üzerinde meydana gelen gerilme alanının dakik veri değerleri alınarak mümkün olduğu belirtilmiştir (Perez vd., 2006).

1.11. HYT Tesisinde Kullanılabilecek Ölçüm Teknikleri

1.11.1. Birim Şekil Değiştirme (BŞD) Ölçerler

Elektriksel dirençli birim şekil değiştirme (EDBŞD) ölçer ve fiber optik birim şekil değiştirme (FOBŞD) ölçer olmak üzere sıklıkla kullanılan iki tip ölçüm sensörü vardır. EDBŞD ölçerler, nispeten ucuz olmaları, $\pm\%0.1$ 'den daha hassas bir doğruluk elde edebilmeleri, kısa ölçüm uzunluklarında kullanılabilir olmaları, sıcaklık değişimlerinden çok az etkilenmeleri, fiziksel boyutlarının küçük olması, hafif olması ve çok hassas olmaları bakımından çoğunlukla tercih edilmektedir. Bu tür birim şekil değiştirme ölçerler, hem statik hem de dinamik birim şekil değiştirmeleri ölçmek için kullanılabilir (Zhang vd., 2008).

İnce bir tel gerildiğinde, elektrik direncinde bir değişiklik meydana gelir. Elektrik direncindeki bu değişiklik, teldeki uygulanan uzama ile ilişkilendirilebilir. Bu tekniği kullanarak doğruluğu arttırmak için daha uzun bir tele ihtiyaç vardır. Bu nedenle, çoğu gerinim ölçer Şekil 1.25'te gösterilene yakın bir şekle sahiptir. Çoğu ölçüm aleti; 120, 175, 350 ve 1000 Ω gibi çeşitli dirençlere sahiptir. Tarihsel olarak evrim geçiren bu ölçüm aletleri 120 ve 350 Ω gibi standart değerlere ulaşmıştır (Al-Qadi vd., 2009).



Şekil 1.25. Tipik bir BŞD sensör konfigürasyonu (Al-Qadi vd., 2009).

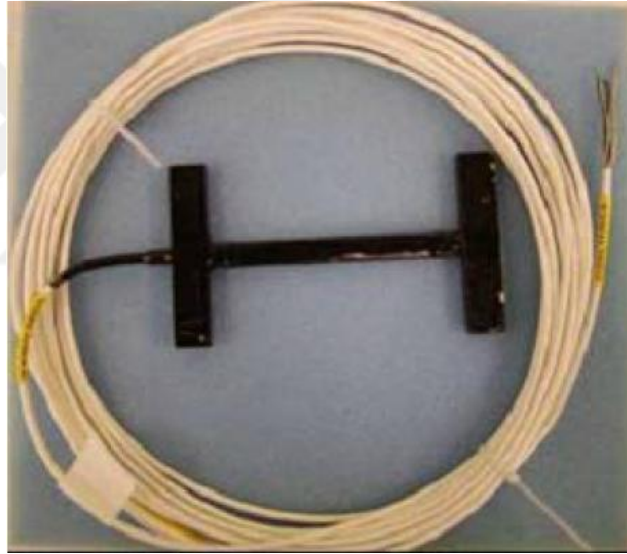
Gömülü asfalt BŞD sensörlerinin amacı, hareketli trafik yükleri altında asfalt tabakasındaki dinamik gerilme tepkilerini ölçmektir. Hem uzunlamasına hem de çapraz BŞD'yi ölçmek için "H" şeklindeki ölçüm aletleri kullanılır. Tipik bir "H" BŞD ölçer (Şekil 1.26), bir H-şekli oluşturmak için şeridin her bir ucunda enine paslanmaz çelik ankrajlı bir cam elyaf takviyeli epoksi şeridinin içine yerleştirilmiş BŞD ölçerlerden oluşur (Hilderbrand, 2002).



Şekil 1.26. Tokyo Sokki KM-100HAS H-BŞD ölçer (FDOT Office, 2011).

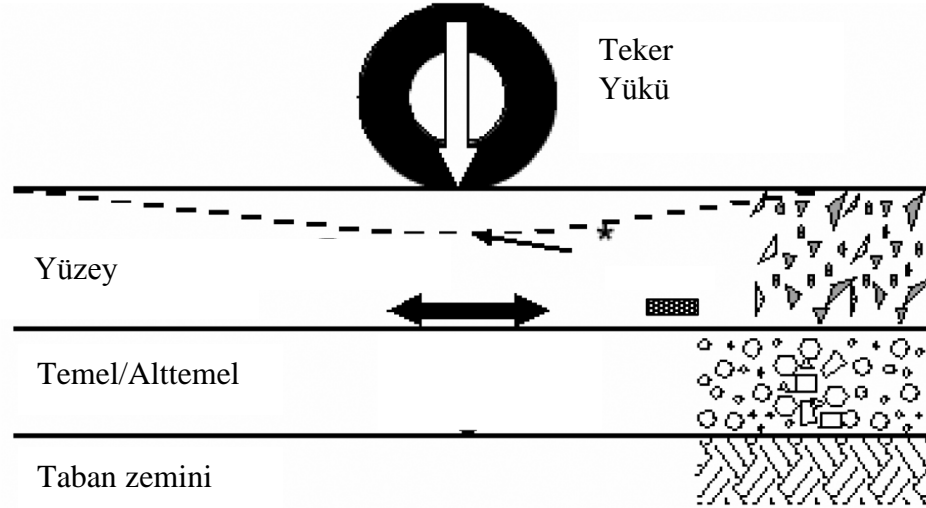
H göstergesi, çapalar arasındaki ortalama gerilimi ölçtüğünden, sensörün uzunluğu maksimum agrega boyutunun 3-5 katı olmalıdır (Tabatabaee vd., 1992). BŞD ölçerler, asfalt kaplamaların serilmesi sırasında maruz kalacağı yüksek sıcaklık ve sıkıştırma yüklerini karşı dayanıklı olacak şekilde üretilmelidirler (FDOT Office, 2011).

Dynatest Past-IIA H tipi BŞD ölçerler (Şekil 1.27), literatürde asfalt kaplamaların içerisine yerleştirilerek kullanılan çalışmalarda iyi bir performans göstermiştir (Baker vd., 1994; Sargand vd., 1994, Al-Qadi vd., 2007). Sensörün gerinim faktörü 2 olup, 120 Ω dirence sahiptir ve 2000 mikrostraine kadar ölçüm yapabilir. Sensör, 75 mm (3 in.) uzunluğunda ve 15 mm (0.6 in.) genişliğinde iki flanşla 102 mm (4 in.) etkili bir uzunluğa sahiptir. Bu gerinim ölçer -30 ila 150°C arasındaki sıcaklıklarda hizmet vermektedir (Al-Qadi vd., 2009).



Şekil 1.27. Dynatest Past-IIA H tipi BŞD ölçer (Al-Qadi vd., 2009).

BŞD ölçerler, mekanik basınca bağlı olarak oluşan kaplama malzemesinin genişlemesini ve büzülmesini ölçer. Tüm ölçüm dönüştürücüleri gibi, bu sensörler de birim şekil değişimleri belirlemek için dolaylı ölçümlere dayanır. Kaplamada oluşan birim şekil değişimi doğrudan elektrik direncinde doğrusal bir değişim ile yanıt veren bir göstergeye aktarılır (Zhang vd., 2008). Kaplamalara yerleştirilen BŞD ölçerlerin trafik yükleri altındaki çalışma prensibi Şekil 1.28’de gösterilmektedir.



Şekil 1.28. BŞD ölçerlerin kaplamalardaki çalışma prensibi

BŞD ölçerlerden alınan okumalarının her yükleme döngüsünün başlangıcında otomatik olarak sıfırlanmış olmasına rağmen, tekerlek geçişinin sonunda gerçekte sıfıra gitmemektedir. Bu durum, yükleme boşaldığında, arayüzde kalıntı gerilmelerin biriktiğini göstermektedir. Bu artık gerilmeler, sonuçta kaplamada kalıcı kayma deformasyonuna neden olur. Yükleme döngüsünün sonundaki artık gerilmelerin, arayüzde meydana gelen gerçek gerilmeler ile aynı olmadığı unutulmalıdır. Çünkü kaplamada oluşan bu gerilmeler yükleme çevrimleri arasında tam olarak iyileşmek için yeterli zamana sahip değildir (Al-Qadi vd., 2009).

Nottingham HYT pistindeki verileri kullanılarak gerilme/gerinim modelleri ile ilgili yapılan bir çalışmada, elastik (resilient) BŞD'lerin yeterince modellenebildiği, ancak gerilme ölçümlerinin daha az tatmin edecek şekilde olduğu sonucuna varmışlardır. Çalışmaya göre kalıcı BŞD değerleri ve deformasyonlar HYT kullanılarak daha uygun olarak modellenebilmektedir (Brown ve Pappin, 1982).

Düşey BŞD ölçümleri asfalt kaplamalarda tekerlek izi oluşumlarının tahmini ve modellenebilmesi için oldukça önemlidir (Islam ve Tarefder, 2013).

1.11.2. Basınç Ölçerler

Basınç ölçerler (Şekil 1.29), hareketli yükler altında oluşan dinamik gerilmeyi ölçmek için kullanıldığında kaplamaların içine yükün dik olarak basacağı şekilde kurulur. Bu sensörler tipik olarak kapalı bir hücre oluşturmak için iki çelik plakanın aralarında

boşluk bırakılarak birbirine kaynaklanmasıyla yapılırlar. Plakalar arasındaki boşluk tamamen yağ ile doldurulur. Plakanın dışında kalan başka bir çelik boru içerisinde yük altında sıkışan yağ basıncını elektrik sinyaline dönüştüren bir dönüştürücü bulunmaktadır (URL-11, 2010). Basınç ölçerlerin iki önemli özelliği ön plana çıkmakta olup, bunlar; sensörün sertliği ve kalınlığı ile çapı arasındaki orandır. Sertliği, ölçüm alınması istenilen malzemeye göre daha sert olması gerekirken, kalınlık/çap oranı 0.2'den az olmalıdır (Hilderbrand, 2002).



Şekil 1.29. Yol kaplamalarında kullanılan basınçölçer modelleri (URL-11, 2010).

1.11.3. Deplasman Ölçerler

Lineer değişen deplasman transdüserleri (linear variable displacement transducer, LVDT), düz çizgi halindeki bir hareketi elektrik sinyaline çeviren elektromekanik dönüştürücülerdir. Yaygın olarak kullanılan bu cihazlar (Şekil 1.30), kaplamalardaki yatay ve düşey hareketlerin belirlenmesine yardımcı olmaktadır (FDOT Office, 2011).



Şekil 1.30. Yol kaplamalarında yatay ve düşey hareketleri ölçmede kullanılan LVDT'ler (FDOT Office, 2011).

1.11.4. Sıcaklık Ölçerler (Isılçiftler)

Isılçiftler, uzun servis ömürleri, arazide kullanım kolaylığı ve fiyat avantajları bakımından sıcaklık ölçümlerinde geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bir ısılçift, iki farklı metalin birleşiminden oluşmaktadır. Farklı iki metalin birbirlerine bağlandığı noktada oluşan voltaj, uygun dönüştürücülerle veya veri toplama cihazlarıyla sıcaklığa dönüştürülerek okunur.

Florida Ulaştırma Dairesi (FDOT), asfalt kaplamaların sıcaklık takibi için K tipinde (Ni-Cr/Ni-Al) ısılçiftler kullanmaktadır. Daha önceki çalışmalarında J tipinde (Fe/Cu-Ni) ısılçiftlerin kullanıldığı ancak, tekrarlı kullanım sonrasında paslandıkları belirtilmiştir (FDOT Office, 2011).

Asfalt kaplamaların sıcaklık değişimlerinin ölçüldüğü başka bir çalışmada, T tipindeki ısılçiftler kullanılmıştır. Bu ısılçift, iki bakır tel ucunun lehimlenmesiyle elde edilmiştir. Daha sonra kabloların etrafı epoksi ile kaplanarak korumaya alınmıştır. Bu yöntem, asfalt sıcaklık etkisiyle ısılçiftlerin bozulmaması için tercih edilmiştir (Al-Qadi vd., 2009).

1.12. Yük Eşdeğerlik Faktörü (YEF)

Kaplamaların kalınlık tasarımında, Yıllık ortalama günlük trafik miktarı önemli bir parametredir. Karayollarını kullanan araçlar, farklı teker konfigürasyonlarına ve farklı ağırlıklara sahiptir. Yıllık ortalama günlük trafik sayıları hesaplanırken bu farklı araçlar belirli katsayılarla tek bir araç türüne dönüştürülür. Bu hesaplamada kullanılan yöntem, ESAL yani eşdeğer tek dingil yükü olarak belirlenmiştir.

ESAL, tek bir aks üzerinde sağ ve solda ikişer tekerden toplamda dört tekerin 82 kN olarak yük uyguladığını esas almaktadır. Bu yükün karşılığı 1 ESAL olarak hesaplanır. Yasal aks yük sınırı bir çok ülkede 82 kN olarak alınmıştır (Van Til vd., 1972). Bu yöntemin kullanılması durumunda karayollarında yapılan hesaplamalar oldukça kolaylaşmaktadır (Eversen, 2008).

Karma olan aks yüklerini temsil etmek için yük eşdeğerlik faktörlerine (YEF) ihtiyaç vardır. YEF, belirli bir ağırlık kategorisi ve aks konfigürasyonu ile uygulanan aks yükü çarpıldığında, kaplamaların performansını etkileyecek 82 kN'luk ESAL'i verir (Kawa vd., 1998).

AASHTO (1993)'ya göre, ESAL hesaplama formülleri aşağıdaki gibidir;

$$LEF = \left(\frac{L_{18} + L_{2s}}{L_x + L_{2x}} \right)^{4.79} \times \left(\frac{10^{G/\beta_x}}{10^{G/\beta_{18}}} \right) \times (L_{2x})^{4.33} \quad (1.1)$$

$$G = \log \left(\frac{4.2 - p_t}{4.2 - 1.5} \right) \quad (1.2)$$

$$\beta_x = 0,3 + \left(\frac{0.081 \times (L_x + L_{2x})^{3.23}}{(S_n + 1)^{5.9} + L_{2x}^{3.23}} \right) \quad (1.3)$$

Burada; L_x ESAL değerine çevrilen yük, L_{18} 8.2 ton, L_{2x} dingil tipi (tek dingil: $L_{2x}=1$, çift dingil: $L_{2x}=2$, üçlü dingil: $L_{2x}=3$), S_n üstyapı sayısı, p_t ise en son servis indeksidir.

Bazı araştırmacılar tarafından AASHTO formülleri basitleştirilmiş ve aşağıdaki gibi kullanılmıştır (Wu vd., 2012).

$$ESAL = [HYT \text{ geçiş sayısı}] \times [\text{Yarım aks yükü}/40]^{3.8} \quad (1.4)$$

Bu çalışma kapsamında, yarım aks yükü 64 kN olarak belirlenmiş ve Formül (1.4)'e göre 1 ESAL'in $5.96 \times \text{KTÜ-HYT}$ geçiş sayısına eşit olduğu belirlenmiştir.

HYT tesisleri, arazi koşullarından farklı olarak aynı iz üzerinden tekrarlı ve aralıksız geçiş yapması nedeniyle kaplamaların yorulmasına 1-3 kat fazla etki etmektedir (Metcalf vd., 1996; Romanoschi vd., 1998). Bu çalışma kapsamında, HYT etkisinin yaklaşık 2 kat olması öngörülmüştür. Katsayısı belirlenirken, kaplamaların yüklenme sıklığı ve yük miktarı göz önünde bulundurulmuştur. Bütün bu bilgiler ışığında; 1 ESAL; $5.96 \times 2 \times \text{KTÜ-HYT}$ geçiş sayısı yani $11.92 \times \text{KTÜ-HYT}$ geçiş sayısı olarak belirlenmiştir. Ayrıca beton kaplamalara uygulanan 25,000 geçiş ve asfalt kaplamalar serildikten sonra uygulanan 100,000 geçişe karşılık gelen ESAL değerleri Tablo 1.4'te gösterilmektedir.

Tablo 1.4. KTÜ-HYT ve ESAL ilişkisi

KTÜ-HYT Geçiş Sayısı	ESAL Karşılığı
1	11.92
25,000	298,000
100,000	1,192,000

1.13. HYT Tesislerinde Kullanılan Tekerlek Basınçlarının ve Hızlarının Alınan Sonuçlara Etkisi

Hızlandırılmış yol testlerinde farklı şişme basınçlarında ve farklı boyutlarda tekerlekler, kaplamanın değişik hızlarda ve büyüklüklerde trafik etkisine vereceği tepkinin belirlenmesi amacıyla kullanılmaktadır. Farklı büyüklüklerde ve uygulanan teker yükünün yuvarlanma hızı, tekerlek şişme basıncı ve teker ölçüleri altında kaplamanın tepkisi ve performansının araştırılması, kaplama yapısının kapsamlı gerilme-birim şekil değiştirme analizi için çok büyük öneme sahiptir. HYT tesislerinde genel olarak tek aks çift lastik (275/80R22.5) veya süper tek lastik (425/65R22.5) veya yeni geniş tabanlı lastikler (445/50R22.5 ve 455/55R22.5) araştırmacıların ihtiyaçlarına göre kullanılabilir. Ayrıca, kaplama hasarlarının oluşum sürecini hızlandırmak için de süper tek lastik ya da daha düşük hızda çok daha yüksek tekerlek yüküne sahip geniş tabanlı lastikler kullanılabilir (Huang, 2017).

Hardy ve Cebon (1994), yükleme frekansının (sıklığının) kaplama tepkisi üzerindeki etkisinin, yükleme hızının etkisine kıyasla nispeten ihmal edilebileceği sonucuna varmıştır.

Wang (2005), farklı lastik yükü ve şişme basıncı koşulları altında lastik-kaplama temas yüzeyindeki gerilme verilerini belirlemeye yönelik çalışmalar yürütmüştür. Lastik basıncındaki artışın, kalın kaplamalara kıyasla ince kaplamalarda daha fazla yorulma çatlağına ve tekerlek izi hasarına neden olduğunu belirtmiştir. Asfalt kaplama tabakasının altında, enine yöndeki gerilmelerin, boyuna gerilmelere nazaran lastik basıncı değişimine karşı daha hassas olduğunu, taşıt hızının artmasının, kaplama yapısındaki gerilme ve BŞD değerlerini azalttığı ve dolayısıyla çatlak ve tekerlek izi hasarını da azalttığı sonucuna varmıştır.

Sarkar (2015), farklı hızlarda çeşitli akslar altındaki esnek kaplamaların dinamik tepkisini incelemek için üç boyutlu bir sonlu eleman modeli kullanmıştır. Kaplamanın yüksek hızlarda, daha düşük hızlardakine kıyasla daha az tepki verebileceğini belirtmiştir. Ayrıca hız değişimine bağlı olarak meydana gelen gerilme değişiminin eğilimi ve oranının, kaplama kalınlığından büyük ölçüde etkilendiğini bildirmiştir.

Hızın artırılmasının, kaplama yapısındaki yatay çekme BŞD değerlerini ve basınç gerilmelerini azalttığı açıktır (Al-Qadi ve Wang, 2009; Greene vd., 2010).

Lourens (1992), dinamik yükler altında kaplamada meydana gelen gerilme ve deplasmanların statik yükler altında meydana gelenden önemli ölçüde farklı olduğunu belirtmiştir. Ayrıca yükleme sonrası kaplamadaki gerilme büyüklüğünün de yükleme hızına bağlı olduğunu bildirmiştir. Bu sebeple, HYT altındaki malzeme tepkileri, sahadaki bir kaplamanınkinden önemli ölçüde farklıdır.

1.14. Literatürde Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Yapılan Çalışmalar ve Sonuçları

Trafik yükleri altındaki kaplama davranışı, yol mühendislerinin temel sorunlarından birini oluşturmaktadır. Kaplamaların trafik yükleri altındaki tepkisinin belirlenebilmesi için plak teorisi ve tabakalı teori yöntemleri yaygın olarak kullanılmaktadır (Westergaard, 1926; Yoder, 1972). Bu yöntemlerin analitik hesapları oldukça karmaşık ve zordur. Bu güçlükler, araştırmacıları sonlu elemanlar yöntemini kullanarak hazırlanmış paket programlara yönlendirmektedir.

Son 20 yıl boyunca, beton üstü asfalt kaplamalarda oluşan yansıma çatlağı oluşum mekanizmasını anlamak ve azaltma yöntemlerini belirleyebilmek için kapsamlı çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar; arazide, hızlandırılmış yol test laboratuvarlarında ve sonlu eleman yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Özellikle sonlu eleman paket

programları arasından ABAQUS, ANSYS, ILLI-Slab ve ILLI-Pave gibi programlar yaygın olarak kullanılmaktadır.

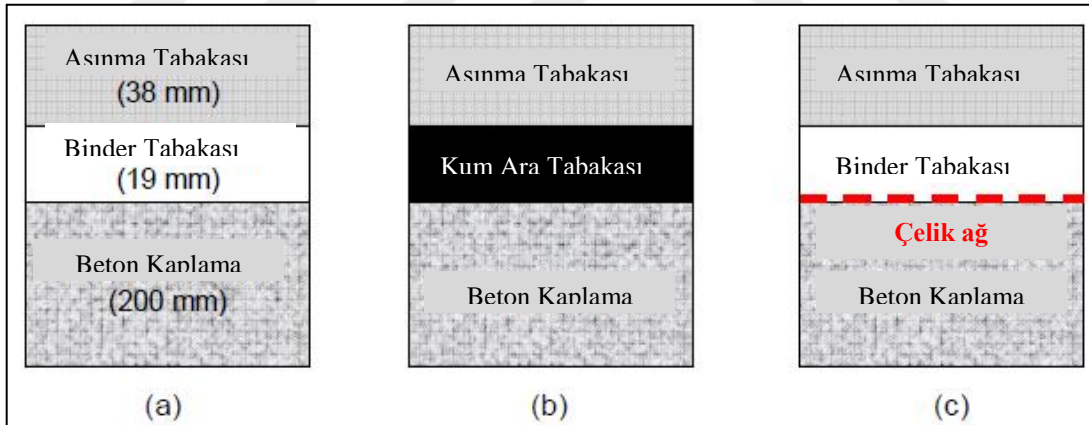
Sonlu elemanlar yöntemiyle çoğu mühendislik problemi sayısal olarak çözümlenebilmektedir. Yöntemin temel mantığı, çözülecek elemanın kendinden çok daha küçük ve mümkün olduğu kadar fazla sayıda elemana bölünerek çözülmesidir. Bölünen bu elemanlar, düğüm noktalarıyla birbirine bağlandıktan sonra, malzeme özellikleri ve sınır koşulları belirlenir. Yük, yer değiştirme, hız gibi koşullar atandıktan sonra kullanılan sonlu eleman programıyla analiz yapılır. Analiz sonucunda, önceden belirlenen düğüm noktalarındaki gerilme, birim şekil değiştirme, deplasman vb. gibi sonuçlar alınabilir (Tirupathi ve Ashok, 1991).

Asfalt kaplamalardaki çatlakların azaltılması için çelik tellerin kullanıldığı bir çalışma, sonlu elemanlar yöntemiyle analiz edilmiş, kaplamadaki çatlakların oluşum mekanizması, başlangıç ve ilerleme aşamalarının hangi faktörlere bağlı olduğu araştırılmıştır. Asfalt viskoelastik-bilineer kohezif malzeme olarak, çelik teller lineer elastik olarak tanımlanmış ve bu iki malzeme arasındaki arayüz modeli kurulmuştur. Viskoelastik malzeme modelinin elastik malzeme modeline göre daha kesin sonuçları verdiği anlaşılmıştır. Yapılan analizler sonucunda, çelik tellerin asfalt kaplamalarda oluşan yansıma çatlaklarına karşı direnç gösterdiği bulunmuştur. Ayrıca güçlendirilmiş elemanın güçlendirilmemiş elemana göre 5 kat daha uzun sürede ilk çatlakları meydana getirdiği tespit edilmiştir. Öneri olarak, çatlakların oluştuğu alanlarda meydana gelen kayma ve çekme gerilmeleri üzerine daha fazla araştırma yapılması gerektiği belirtilmiştir (Beak ve Al-Qadi, 2006).

ANSYS sonlu eleman programı kullanılarak yapılan başka bir çalışmada, asfalt kauçuk membran ara tabaka (ARMI) ve geotekstil malzemelerin ara yüzey elemanı olarak kullanıldığı bir yansıma çatlakları önleme yöntemi araştırılmıştır. ARMI ve geotekstil tabakalar hem 12.7 mm hem de 6.35 mm kalınlıkta denenmiş ve elastisite modülleri sırasıyla 6.925 MPa ve 7.60 MPa olarak girilmiştir. Malzemeler lineer elastik olarak tanımlanmıştır. Asfalt kaplama 10 ve 20°C sıcaklıklarda analiz edilmiş ve elastisite modülleri (E) sırasıyla 10,850 MPa ve 3,448 MPa olarak girilmiştir. Statik olarak yükleme yapılmış ve 0.8 MPa basınç uygulanmıştır. Analizler sonucunda geotekstil malzemelerin gerilmeleri sönümlendiği ancak güçlendirme düzleminde yatay yönde büyük deformasyonlar oluşturmasından ötürü asfalt kaplamalarda tekrarlı trafik yükleri altında potansiyel çatlak başlangıçları neden olabileceği belirtilmiştir. ARMI malzemesinin asfalt

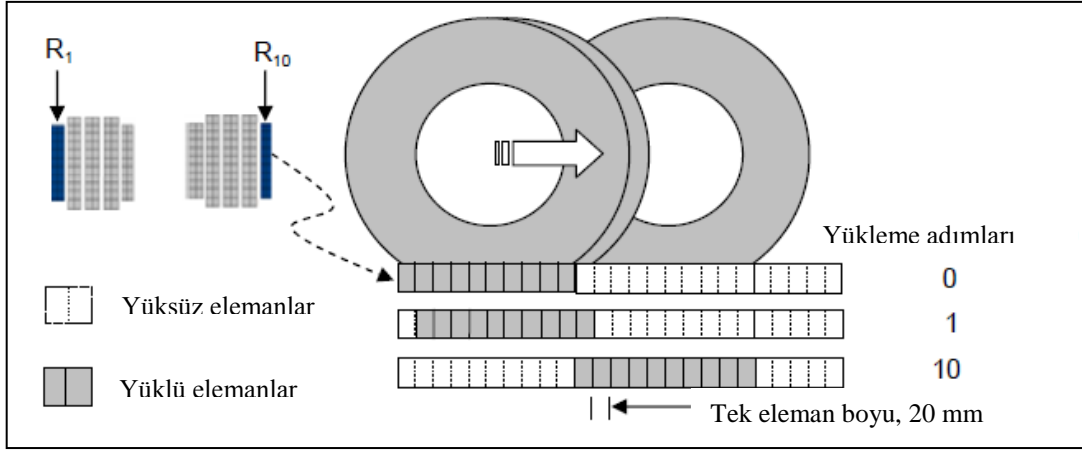
kaplamaların altında güçlendirme malzemesi olarak kullanılması durumunda tekerlek izi oluşumu riski olabileceği belirtilmiştir. Ayrıca asfalt kaplama kalınlığının artırılmasının çok etkili bir yansıma çatlağı azaltma yöntemi olduğu, asfalt kaplama altındaki gerilme yığılmalarını ve birim şekil değiştirme gelişimini azalttığı tespit edilmiştir. Öyle ki, asfalt kaplama kalınlığının 50 mm'den 100 mm'ye çıkarılması halinde birim şekil değiştirmelerin %40 oranında, 75 mm'den 100 mm'ye çıkarılması halinde ise birim şekil değiştirmelerin %25 oranında azaldığı belirtilmiştir (Nam vd., 2014).

Üç boyutlu olarak yapılan bir başka sonlu eleman modelinde, beton kaplamalar arasında 6.7 mm açıklığında enine tam derz bırakılmış, 57 mm kalınlığında asfalt kaplama ve 200 mm kalınlığında beton kaplama, 150 mm temel ve 10,000 mm kalınlığındaki zemin üzerine oturulmuştur. Kum tabakaların ve çelik tellerin güçlendirme elemanı olarak kullanıldığı bu çalışmada, referans modeli olan asfalt kaplama, 38 mm'lik aşınma tabakasına ve 19 mm'lik binder tabakasına ayrılmıştır. Kum güçlendirme modelinde binder tabakanın yerini kum tabaka almış, çelik tellerle güçlendirme modelinde ise referans modeldeki binder tabakanın altına çelik teller serilmiştir (Şekil 1.31).



Şekil 1.31. a) Referans model, b) Kum tabakalı model, c) Çelik telle güçlendirilmiş model (Beak, 2010).

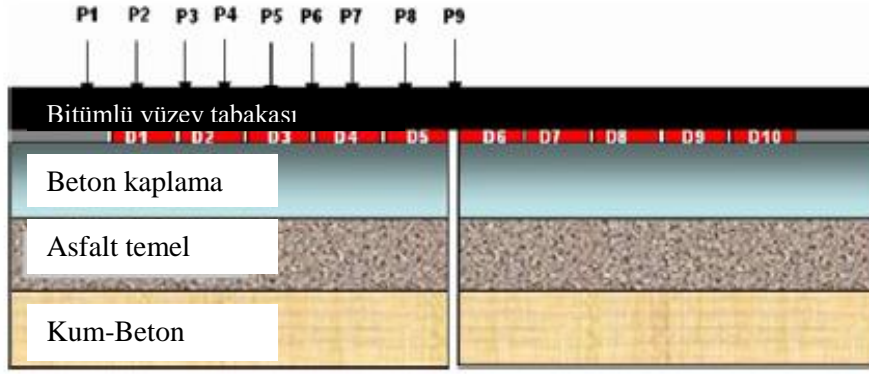
Teker basıncı 0.7 MPa olarak, teker basma alanları 160×220 mm olarak belirlenmiş ve her bir teker dış alanı ayrı ayrı modellenmiştir. Yük, asfalt kaplama üzerinde hareketli olarak tanımlanabilmek için adım adım ilerletilmiş (Şekil 1.32), tekerlek geçiş hızı 8 km/s olarak belirlenmiştir.



Şekil 1.32. ANSYS programı kullanılarak yükün adım adım uygulanması (Beak, 2010).

Yapılan analizlerin sonucunda en kritik gerilmelerin düşey basınç gerilmeleri, boyuna ve yatayda çekme gerilmeleri ve boyuna ve düşey gerilmelerin birleşiminden oluşan kayma gerilmeleri olduğu tespit edilmiştir. Oluşan bu kayma ve çekme gerilmelerinin yansıma çatlaklarına sebep olacağı belirtilmiştir. Çalışma sonucunda, kum ara tabaka kullanılmasının asfalt kaplamaların servis ömrünü uzatması bakımından işe yaradığı, çelik tellerin kullanılmasının ise çatlak oluşum zamanını referans modele göre 6 kat uzattığı belirtilmiştir (Beak, 2010).

CESAR-LCPC programı kullanılarak yapılan bir başka çalışmada, beton üzeri asfalt kaplama modelleri yapılmış, bu uygulama kapsamında farklı sıcaklıklarda denemeler gerçekleştirilmiştir. Geometrik model hazırlanırken, beton kaplama 80 mm, asfalt kaplama 60 mm kalınlığında, beton kaplamanın genişliği 2 m, asfalt kaplama ise 0.85 m olarak belirlenmiştir. Yük basma alanı, her bir tekerlek için dikdörtgen şeklinde 200×300 mm ölçülerinde olup, uygulanan basınç 0.541 MPa'dır. Yük plaklar üzerine 9 ayrı adımda statik olarak yüklenmiş (Şekil 1.33) olup yükleme hızı hesaba katılmamıştır.



Şekil 1.33. CESAR-LCPC programı kullanılarak yükün adım adım uygulanması (Perez vd., 2006).

Analizler 0 ve 20°C sıcaklıklara göre gerçekleştirilmiş, derz bölgesine 50 mm mesafede, asfalt kaplama altında meydana gelen maksimum birim şekil değiştirmeler sırasıyla 40×10^{-6} ve 140×10^{-6} mertebelerinde bulunmuştur (Perez vd., 2006).

Kansas Devlet Üniversitesi'nde bulunan CISL (Civil Infrastructure Systems Laboratory) hızlandırılmış yol tesisinde yapılan bir çalışma ABAQUS sonlu eleman programı kullanılarak modellenmiştir. Bu çalışma kapsamında, temel tabakası üzerine yerleştirilen asfalt kaplama altında BŞD ve asfalt yüzeyinde tekerlek izi deplasman değerleri ölçülmüştür. Zemin ve asfalt kaplama içilen girilen malzeme özellikleri Tablo 1.5 ve Tablo 1.6'da gösterilmiştir. Yükleme alanının dairesel, eliptik ve dikdörtgenel olarak uygulanabildiği literatürden desteklenerek, dikdörtgenel alan seçilmiştir. Belirlenen dikdörtgenel alanın 11.3 km/s hızla kaplamayı baştan başa geçeceği göz önünde bulundurularak her bir alanın 0.05 sn kaplama üzerinde kalmasına karar verilmiş ve bir geçiş böylece tamamlanmıştır. Toplamda 100,000 geçişi temsil etmek için analiz süresi 5,000 sn olarak belirlenmiştir. Analiz sonucunda, maksimum boyuna BŞD değerlerinin sırasıyla 120×10^{-6} ila 210×10^{-6} arasında olduğu belirtilmiştir (Williamson, 2015).

Araştırmacılar beton üstü asfalt kaplamaları modellerken asfalt için farklı sıcaklıklarda farklı elastisite modülleri tanımlamışlardır. Asfaltın viskoelastik bir davranış sergilemesi ve elastik malzeme modeline göre daha doğru sonuçlar veriyor (Beak ve Al-Qadi, 2006) olması, yapılan literatür taramalarında farklı durumların araştırılması ihtiyacını doğurmuştur. Yapılan araştırmalarda asfalt için kullanılan elastisite modülleri Tablo 1.5'te gösterilmektedir.

Tablo 1.5. Asfalt kaplamaların sonlu eleman modelinde kullanılan malzeme özellikleri

Araştırmacı	Sıcaklık (°C)	E_{mod} (MPa)	Poisson Oranı (v)	Birim hacim ağırlık (kg/m ³)
Perez vd. (2006)	0	12,000	0.35	-
	10	8,000	0.35	-
	20	2,000	0.35	-
Nam vd. (2014)	10	10,850	0.3	2,324
	20	3,448	0.3	2,324
Beak (2010)	-10	17,200	0.2	2,300
Beak ve Al-Qadi (2006)	-10	14,200	0.35	-
Gupta ve Kumar (2014)	-	229-1,149	0.35	2,400
Abed ve Al-Azzawi (2012)	-	2,689	0.35	-
Tanttu (2009)	-	5,400	0.3	2,400
Williamson (2015)	-	2,634	0.35	-
Elseifi ve Al-Qadi (2003)	-	3,450-4,480-5,510	0.25	-
<i>Bu çalışmada kullanılan değerler</i>	10	2,620	0.35	2,100
	20	1,400	0.35	2,100

Tablo 1.6. Taban zemininin sonlu eleman modelinde kullanılan malzeme özellikleri

Araştırmacı	E_{mod} (MPa)	Poisson Oranı (v)	Birim hacim ağırlık (kg/m ³)
Beak (2010)	140	0.40	1,900
Nam vd. (2014)	70	0.40	1,835
Gupta ve Kumar (2014)	5.74	0.40	1,800
Abed ve Al-Azzawi (2012)	35	0.50	-
Sii (2014)	50	0.40	1,800
Tanttu (2009)	75	0.35	1,800
Williamson (2015)	58	0.45	-
Elseifi ve Al-Qadi (2003)	40-135	0.40	-
<i>Bu çalışmada kullanılan değerler</i>	12	0.45	1,800

1.15. Literatürde HYT’de Yapılan Çalışmalar ve Sonuçları

Amerika’nın İllinois eyaletinde bulunan ATLAS hızlandırılmış yol tesisinde yapılan bir çalışmada, beton üstü asfalt kaplama üzerine çalışmalar yürütülmüş asfalt ile beton arasında güçlendirme elemanı olarak tack coat adı verilen yapıştırma ara tabakası kullanılmıştır. Tesisin aracı 22.5 m mesafede çalışmakta olup, testler 9 km/s hızla gerçekleştirilmiştir. Tesiste hazırlanan beton üstü asfalt kaplama 20,000 tur 53.4 kN yükü, 55,000 tur 62.3 kN yükü çalıştırılmıştır. Yapıştırma tabakası olarak 50/70 sınıfındaki bitüm, düşük, optimum ve yüksek oranlarda (sırasıyla 0.09, 0.18 ve 0.41 L/m²) uygulanmıştır. Çalışma sonucunda elde edilen BŞD verileri Tablo 1.7’de gösterilmektedir. Ayrıca toplamda 75,000 tur sonrasında asfalt kaplamada oluşan maksimum tekerlek izi derinlikleri Tablo 1.8’de gösterilmiştir (Al-Qadi vd., 2009).

Tablo 1.7. ATLAS tesisinde alınan BŞD değerleri (Al-Qadi vd., 2009).

Bitüm miktarı BŞD yönleri	Düşük oran	Optimum oran	Yüksek oran
Yatay BŞD (x10 ⁻⁶)	80	55	275
Boyuna BŞD (x10 ⁻⁶)	125	85	200

Tablo 1.8. ATLAS tesisinde alınan tekerlek izi oluşum değerleri (Al-Qadi vd., 2009).

Bitüm miktarı Tekerlek izi	Düşük oran	Optimum oran	Yüksek oran
Düşey (mm)	1.09	0.66	1.14

Kansas Devlet Üniversitesi’nde bulunan CISL hızlandırılmış yol tesisinde yapılan bir çalışmada, temel tabakası üzerine 100 mm kalınlığında asfalt kaplama tabakası serilmiş, yüzeyden 50 mm aşağısında trafik yönüne paralel olarak 120 Ω dirence, 2 ölçüm faktörüne sahip BŞD ölçerler yerleştirilmiştir. Asfalt kaplama ile temel tabakası arasında, yapıştırma tabakası olarak likit yapıştırma emülsiyonu, düşük, optimum ve yüksek oranlarda (sırasıyla 0.31, 0.72 ve 0.99 L/m²) uygulanmıştır. Yük olarak tek aks üzerindeki toplam dört teker için 88 kN uygulanmıştır. Sistem 11.3 km/s hızla hareket etmiştir. Elde edilen sonuçlara göre 400,000 yükleme sonrasında, 25×10⁻⁶ ile 400×10⁻⁶ aralığında BŞD

ölçümleri, 4 mm ile 8 mm arasında tekerlek izi oluşumu tespit edilmiştir (Williamson, 2015).

Fransa'da bulunan FABAC hızlandırılmış yol tesisinde yapılan bir çalışmada, 80 mm kalınlığında beton kaplama üzerine 60 mm kalınlığında asfalt kaplama yerleştirilmiştir. Test sahasındaki 4 plak üzerinde 60 mm kalınlığında standart asfalt kaplama tabakası kullanılırken, 2 plakta 20 mm bitümlü kum ara tabaka ve 40 mm asfalt kaplama, son iki plakta ise 10 mm kalınlığında metalik ızgaralarla desteklenmiş bitümlü tabaka ve üzerine 50 mm kalınlığında standart asfalt kaplama serilmiştir. Klasik laboratuvar testleriyle 0 ve 20°C sıcaklıklara göre asfalt kaplama malzemesinin elastisite modülü ve poisson oranı belirlenmiştir. Bu testin yapılma nedeni; deneylerin yılın her mevsiminde devam edecek olmasından ötürü, kaplamanın farklı sıcaklık aralıklarına maruz kalacak olmasıdır. Öyle ki, yansımaya çatlakları sıcak havalarda daha geç belirirken soğuk havalarda daha erken görülmeye meyillidir. Yük olarak tek aks üzerindeki toplam dört teker için 130 kN uygulanmıştır. 1,000,000 yükleme sonrasında deneyler sonlandırılmıştır. Deneyler boyunca alınan sonuçlara göre, 450,000 geçişe ulaşıldığında standart asfalt kaplama ve metalik ızgaralarla desteklenen asfalt kaplamalarda yansımaya çatlakları görülmüş, kum ara tabaka ile desteklenen derzlerde yansımaya çatlama rastlanılmamıştır. Elde edilen verilere göre, kaplama sıcaklığının 11°C olduğu günde kum ara tabaka ile desteklenen kaplamaların altında oluşan BŞD değerlerinin $80-85 \times 10^{-6}$, 17.5°C olduğu günde ise $75-80 \times 10^{-6}$ civarında olduğu tespit edilmiştir (Perez vd., 2006).

Kaliforniya Üniversitesi Gelişmiş Ulaşım Altyapı Araştırma Merkezi'nde (ATIRC) yapılan bir çalışmada; 125 mm kalınlığındaki beton kaplamaların üzeri 63 mm ve 114 mm kalınlığında kauçuk katkılı asfalt kaplama serilmiştir. Beton kaplama derzleri 1/4 oranında yarım derz olarak kesilmiştir. Çalışma kapsamında, derzlerde oluşacak yansımaya çatlakları ve tekerlek izi oluşumları takip edilmiştir. Teker basınçları 690 kPa olarak ayarlanmıştır. 63 mm kalınlığındaki asfalt kaplamada 180,000 ESAL sonrasında yansımaya çatlakları başlarken, 114 mm kalınlığındaki asfalt kaplamada 1,000,000 ESAL sonrasında ilk yansımaya çatlakları gözlemlenmiştir. 33,000 ESAL sonrasında 63 mm asfalt kaplamada 6.9 mm tekerlek izi oluşurken, 114 mm asfalt kaplamada 18.5 mm tekerlek izi oluşmuştur (Wu vd., 2012).

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Birim Şekil Değiştirme (BŞD) Ölçer İmalatı

2.1.1. BŞD Ölçer Tasarımının Yapılma Süreci

Beton ve asfalt kaplama türleri karayollarında sıklıkla tercih edilen yapı malzemeleridir. Karayollarında plak halinde uygulanan ve yol üstyapısını oluşturan bu malzemelerin birim şekil değiştirme miktarları hakkında bilgi edinilmesi amacıyla yurtdışında bazı ölçüm aletleri ve metotları geliştirilmiştir. Yapılan bu ölçümlerle, beton ve asfaltın yük altında birim şekil değiştirme ölçümleri yapılmıştır. Ölçümlerin bir kısmı laboratuvar ortamında bir kısmı arazide alınmıştır.

Bu çalışma kapsamında HYT tesisinde hazırlanan beton üstü asfalt kaplamaların derz bölgesine denk gelen kısımlarında beton ile asfalt arasına BŞD ölçüm aletleri yerleştirilerek veri toplanmaya çalışılmıştır. Literatürdeki kullanımları araştırılmış ve değişik çalışmalardan alınan veriler incelenmiştir. İhtiyaç olunan BŞD ölçerler sipariş edilmek istenildiğinde fiyatlarının 250 \$ (Amerikan Doları) civarında olduğu anlaşılmıştır. İki farklı deney kesiti hazırlanacak olması ve her bir kesimde en az 10 adet BŞD ölçüm aleti kullanılacağından BŞD ölçerlerin KTÜ Ulaştırma-HYT laboratuvarında üretilmesine karar verilmiştir.

Literatürdeki örnekleri incelendiğinde iki farklı türde üretim modeli ile karşılaşılmıştır. Bunlar ya çubuk eleman üzerine ya da levha üzerine montaj yapılarak üretilmiş BŞD ölçüm aparatlarıdır. Burada esas olan şekil yönünden BŞD ölçerlerin üretilmesi değildir. Asıl amaç, üretilen BŞD ölçerlerin dayanıklı olması ve en azından testler tamamlanuncaya kadar sağlam kalabilmesidir. Asfalt kaplamanın birim şekil değiştirme miktarının ölçülebilmesi için beton kaplama ile asfalt kaplama arasında olması gereken BŞD ölçerler, asfalt serimi sırasında yerinden oynayıp darbelere maruz kalabileceği gibi asfaltın sıcaklığı ile bozulabilmektedir. Buna benzer aksaklıklara karşı önlem alabilmek ve ölçüm kalibrasyonlarının tutarlı olabilmesi için birçok deneme yapılmıştır. HYT tesisinde serilecek asfalt kaplamanın altında yaklaşık 40'a yakın BŞD ölçer yerleştirileceğinden bütün BŞD ölçerlerin çalıştığından ve veri alabildiğinden emin

olunması gerekmektedir. BŞD ölçerlerin üretilmesi sırasında kullanılan temel ekipmanlar Şekil 2.1’de gösterilmektedir.



Şekil 2.1. BŞD ölçer üretiminde kullanılan ekipmanlar

BŞD ölçüm aparatları temelde strain gauge (SG) pulu, ana gövde ve SG kablosundan oluşmaktadır. İlk tasarım (SG-1) oluşturulurken levha şeklinde 2 mm kalınlığında, 20 mm genişliğinde ve 200 mm uzunluğunda çelik levhalar (Şekil 2.2) kullanılmıştır.



Şekil 2.2. Çelik levha türündeki SG-1 tasarımı

Bu levhaların iki ucuna dik bir biçimde tutucu çelik levhalar monte edilmiştir. 20 mm uzunluğundaki SG pulu çelik levha üzerine yapıştırılmış ve etrafı korumaya alınmıştır. SG kablosu da çelik aparatın gövdesine bağlanarak uzatılmıştır. Üretilen bu ilk tasarım SG örnek bir asfalt kaplama numunesinde teste tabi tutulmuştur. Öncelikle 300 mm çapında 200 mm yüksekliğinde çelik bir kalıp hazırlanmış (Şekil 2.3) ve SG kablosunun dışarı çıkartılabilmesi için tabanı delinmiştir. Daha sonra AC 50/70 bitüm ve No:4 ile No:200 elek arasında kalan agregaların ısıtılıp karıştırılmasıyla (Şekil 2.4) asfalt betonu elde edilmiştir. KTÜ Ulaştırma Laboratuvarı'nda bulunan pull-out deney düzeneğinin (Sert, 2010) düşey pistonları kullanılarak asfalt betonu sıkıştırılmıştır. Asfalt betonu silindir kalıba yerleştirilmeden önce hazırlanan SG aparatı silindir tabanına konulmuş üzeri asfalt ile kaplanılmıştır. Üretilcek asfalt kaplama betonu yüzeyinden yükleneceği için SG aparatının alt yüzeyde olup yük altında asfaltın birim şekil değiştirmesinin ölçülmesi amaçlanmıştır.



Şekil 2.3. Çelik silindir asfalt kalıbı ve BŞD ölçer aparatı



Şekil 2.4. Asfalt karışımın hazırlanıp kalıba konulması

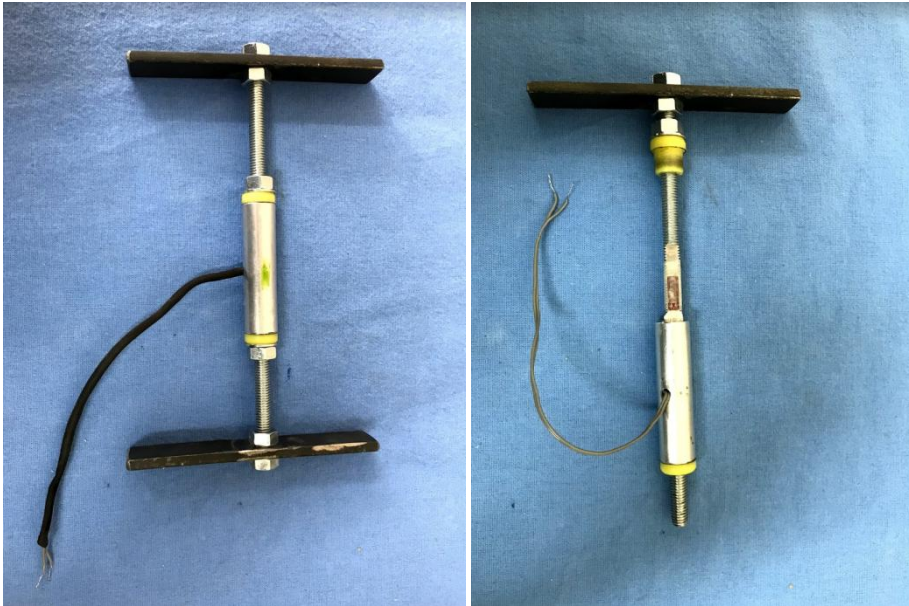
Sıkıştırma işleminin ardından numuneler kalıptan çıkarılmış ve SG aparatlarının durumu kontrol edildiğinde sıkıştırmanın etkisiyle eğildiği gözlemlenmiştir. Bu işlem bir kaç farklı numunelerde denenmiş ve farklı aksaklıklarla karşılaşılmıştır. Bunlar, SG aparatının eğilmesi, SG pulunun sıcaklığın etkisiyle yapıştığı yüzeyden sökülmesi, SG kablosunun kopması ve erimesi olarak sıralanabilir. En önemlisi 2 mm kalınlığındaki çelik levhanın kolay eğilmesinden dolayı SG pulunun işlevini kaybetmesidir.

İkinci tasarım yapılırken çelik levha yerine sonsuz vida olarak bilinen 8 mm çapındaki çelik dişli çubuk elemanlar kullanılmış, yatay olan destek çubukları aparata çalışma alanı kazandırması için dikey olarak yerleştirilmiştir. Çubukların sadece SG pulunun yapışacağı kısımlar düzleştirilmiş, diğer kısımları olduğu gibi bırakılmıştır. Çubuğun dişli yapısı, SG-2 (Şekil 2.5) aparatının asfalt içerisine gömüldüğünde aderansını artıracığı düşünülmüştür. Bu tasarımda başarısız olmuştur. Çünkü SG pulunun üzeri yeterince korunamadığından daha sıkıştırma sırasında deformasyona uğramıştır.



Şekil 2.5. SG-2 tasarımı

Üçüncü tasarım yapılırken SG pulunun yapıştığı yüzey çelik boruyla korumaya alınmış ve borunun her iki tarafı somunlarla sabitlenmiştir. Deney öncesinde SG-3 (Şekil 2.6) aparatı zarar görmeden asfalt numunesi hazırlanabilmiştir. Daha sonra SG pulunun voltaj ölçümleri yapılmış, bu defa SG kablosunun koruyucu boru yüzünden koptuğu görülmüştür.



Şekil 2.6. SG-3 tasarımı

Dördüncü tasarım yapılırken ilave bir önlem olarak asfalt kalıbı değiştirilmiştir. Çünkü yaklaşık 200 mm yükseklikteki silindir kalıpların içerisinde asfalt sıkıştırılırken, silindir çeperlerinde oluşan basınç yığılmaları asfalt için yeterli sıkışma miktarına uğrayıncaya kadar SG aparatlarına zarar verebilmektedir. Yeni kalıp sistemi (Şekil 2.7) kutu demir profillerin çerçeve sistemine dönüştürülmesiyle elde edilmiştir. Dördüncü tasarım hem yeni asfalt kalıp sistemi hem de SG kablosunun kopmaması için çelik boru ile birleştiği kısım güçlendirilmiş ve deney yapılacak şekilde hazırlanmıştır. Deney yapmak için hazırlanan asfalt numunesi ve tabanına gömülü halde bulunan SG-4 aparatı beton bir zemin üzerine konularak üzerinden geçen otomobil (Şekil 2.8) ile veri alıp almadığı kontrol edilmiştir. Deney verileri incelendiğinde birim şekil değiştirme ölçümlerinin yükleme anında yükselişe geçtiği ancak yükün asfalt numune üzerinden uzaklaşması durumunda verilerin düşmediği tespit edilmiştir. Numune sökülüp SG aparatı incelendiğinde SG pulunu koruyan çelik borunun ana çubuğu sıkıştırdığı ve rahat çalışmasını engellediği anlaşılmıştır.



Şekil 2.7. Yeni asfalt kalıbının tasarımı



Şekil 2.8. Hazırlanan asfalt numunesine otomobil yükünün uygulanması

Beşinci tasarımda çelik boru yerine plastik boru kullanılmış ancak sıcaklıktan etkilenmemesi için üzeri sıcaklığa dayanıklı motor bandı ile sarılmıştır. Ayrıca SG kabloları da makaron adı verilen sıcaklığa dayanıklı bir boruyla kaplanmıştır. Ortaya çıkan bu son ürün (SG-5) asfalt içine yerleştirilmiş (Şekil 2.9), otomobilin altında deney yapılmış ve ilk başarılı veriler alınmıştır.



Şekil 2.9. SG-5 tasarımı

Laboratuar ortamında başarılı sonuçlar alındıktan sonra üretilen SG-5 aparatının arazide verimli bir şekilde kullanılıp kullanılmadığı araştırılmıştır. Bu kapsamda öncelikle Trabzon Büyükşehir Belediyesi'nin asfalt serim programı araştırılmış ve beton üstü asfalt kaplama yapacağı gün tespit edilmiştir. Arazide asfalt serimi yapılırken, laboratuarda üretilen BŞD ölçerler Akçaabat Mersin bölgesinde beton yol üzerine yerleştirilmiştir. Asfalt serimi finişer türündeki asfalt kaplama makinesi ile yapılırken, yerleştirilen (Şekil 2.10) BŞD ölçerler finişerin arka tamburunda bulunan bıçakların darbesiyle kırılmıştır. Bu ilk arazi denemesinin başarısız olmasının ardından BŞD ölçerlerin yerleştirileceği kaplamanın el yordamıyla asfaltının atılması gerektiğine karar verilmiştir.



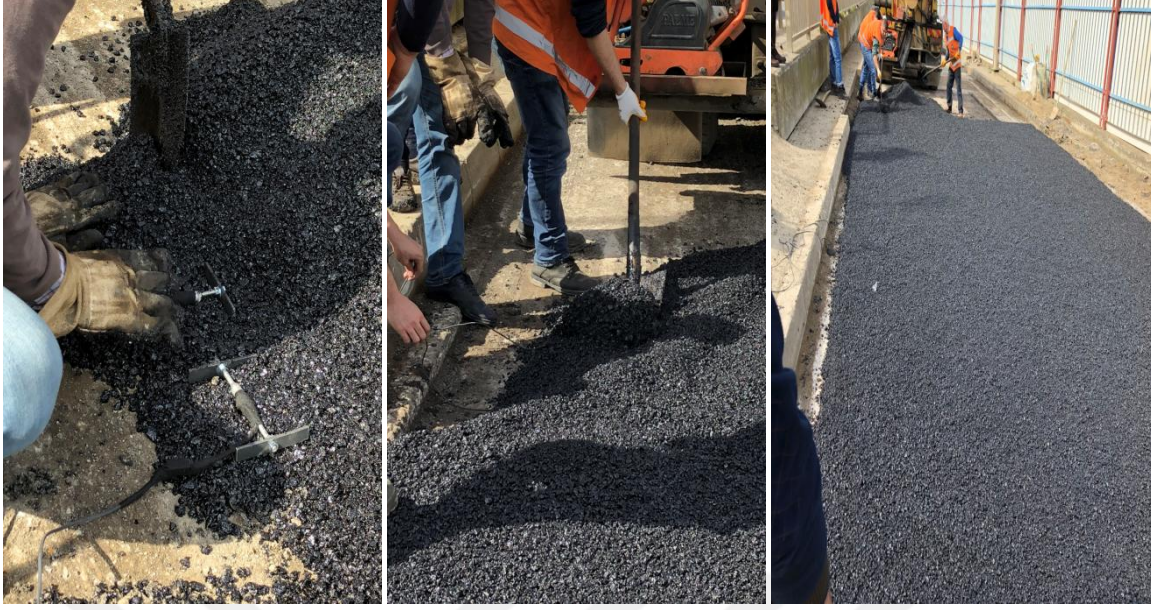
Şekil 2.10. BŞD ölçerlerin ilk arazi denemeleri

İkinci arazi denemesinde Rize-Trabzon istikameti Devlet Sahil Yolu-Trabzon Havalimanı yol ayrımında yapılacak asfalt yenileme çalışmalarının olduğu alana (Şekil 2.11) gidilmiştir.



Şekil 2.11. Arazi çalışmalarının yapıldığı D010/E70 Devlet Sahil Yolu Trabzon Havalimanı çıkışı

Burada asfalt serimi öncesi yerleştirilen BŞD ölçerler bir miktar asfalt ile üzeri kapanıncaya kadar örtülmüş ve kabloları yol kenarına kadar uzatılmıştır. Daha sonra üzeri asfalt ile kaplanılan (Şekil 2.12) BŞD ölçerlerin kontrolü yapılarak, asfalt kaplama silindiriyle sıkıştırılmıştır (Şekil 2.13).



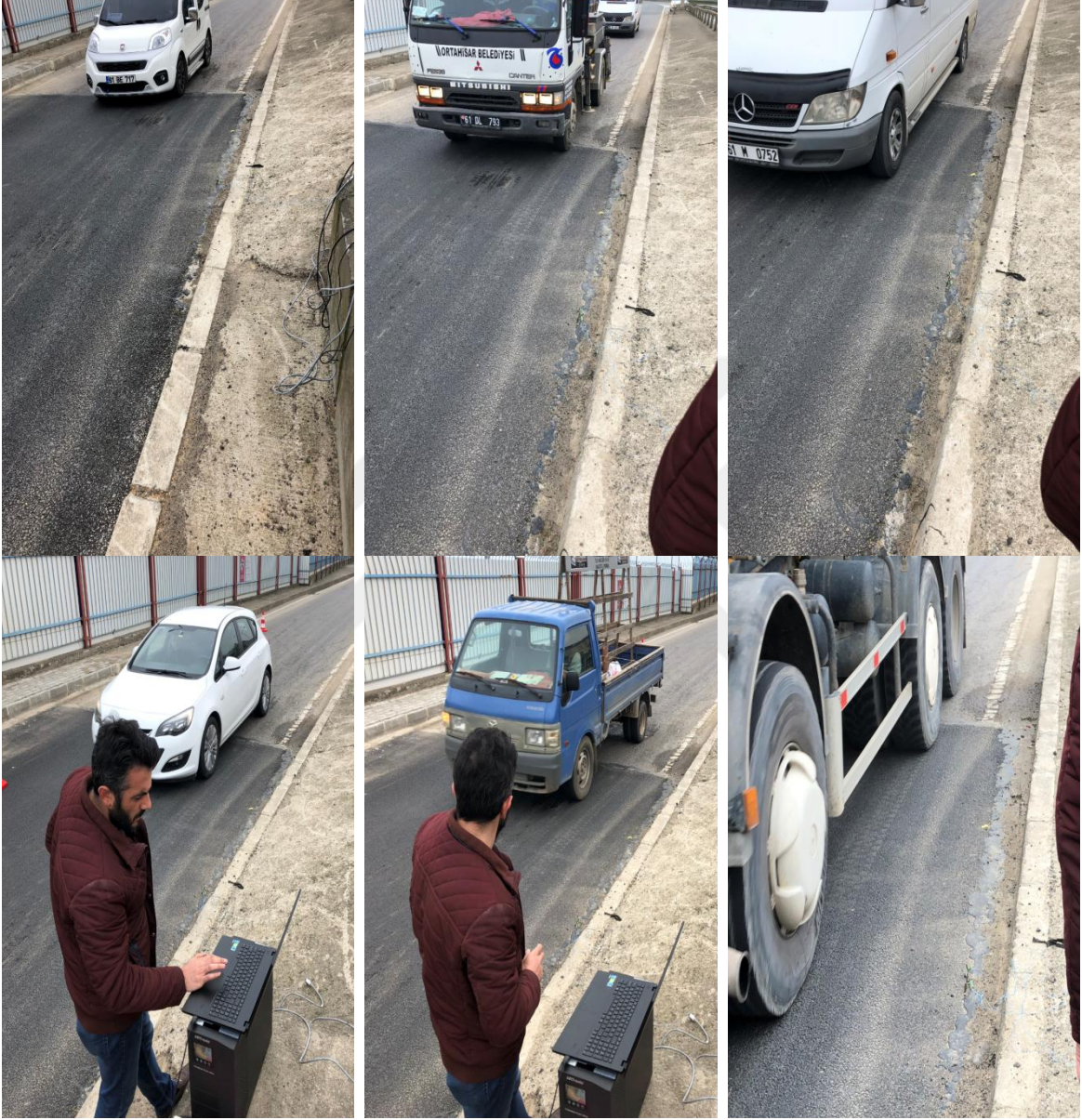
Şekil 2.12. Arazide BŞD ölçerlerin yerleştirilmesi



Şekil 2.13. Arazide silindirle sıkıştırma işleminin yapılması

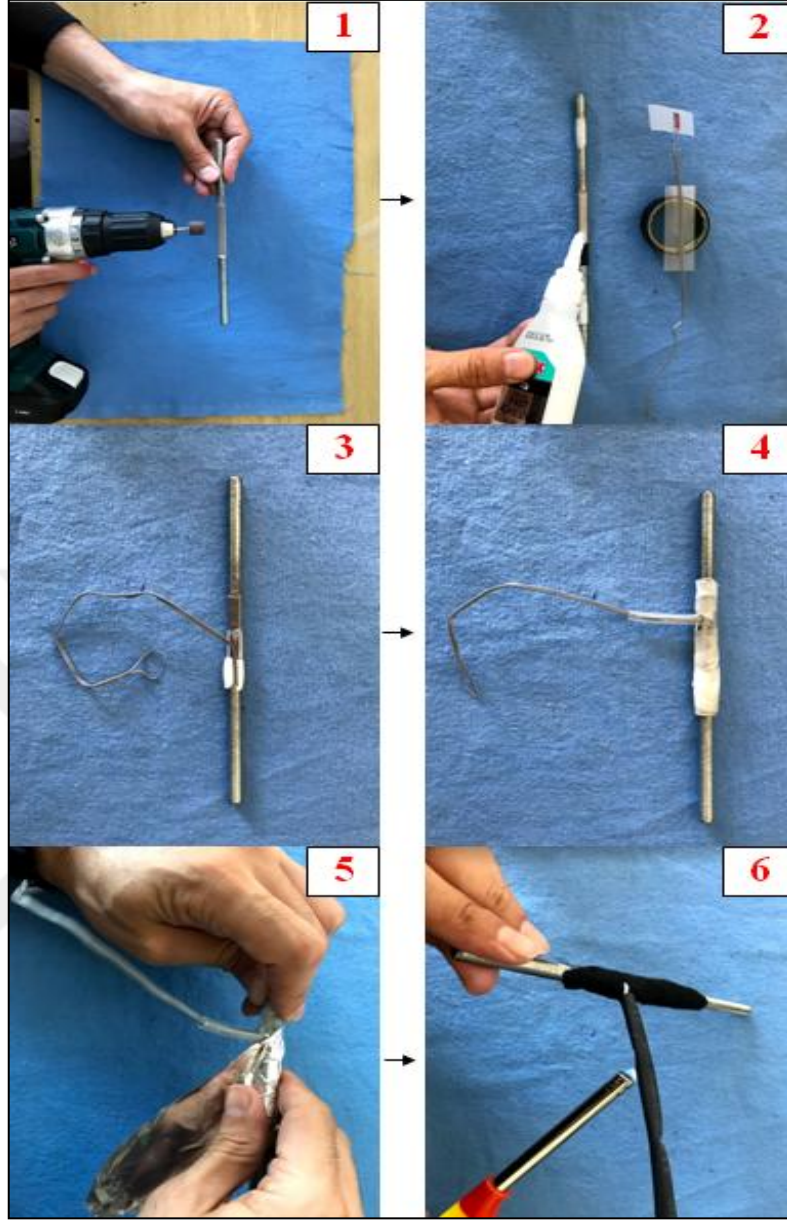
Deney düzeneği hazırlanarak silindirle sıkıştırma esnasında BŞD ölçerlerin veri almaya devam edip etmediği kontrol altında tutulmuştur. Herhangi bir sorun olmayan ilk başarılı deney sonrasında yol araç trafiğine açılmıştır. Daha sonra BŞD ölçerlerin

kalibrasyonları sıfırlanarak yol üzerinden geçen karışık türdeki araçların geçişi esnasında veri almaya (Şekil 2.14) başlanmıştır.



Şekil 2.14. Farklı türdeki araçların geçişi sırasında araziye yerleştirilen BŞD ölçerlerden veri alınması

Alınan verilerin literatürle uyumlu olduğu, geliştirilen SG-5 tasarımının sıkıştırma esnasında ve sonrasında sağlıklı olarak kullanılabilmesinin anlaşılması üzerine HYT tesisinde yapılacak deneyler için SG-5 tasarımının seri üretimine (Şekil 2.15) başlanılmıştır.



Şekil 2.15. SG-5 tasarım aşamaları

2.2. Hızlandırılmış Yol Testi (HYT) Çalışmaları

2.2.1. Hızlandırılmış Yol Testi Tesisinin Hazırlanması

Bu çalışma kapsamında yapılacak deneyler, 2009 yılında KTÜ İnşaat Mühendisliği bünyesinde kurulmaya başlayan hızlandırılmış yol testi (HYT) tesisinde gerçekleştirilmiştir. HYT tesisi yaklaşık 10×30 m ölçülerinde kapalı alana sahiptir. En fazla 6×24 m ölçülerine sahip karayolu kaplamaları bu tesiste test edilebilmektedir. Tesisin

başlıca ekipmanı, kaplamaların arazideki gibi yüklenmelerini sağlayan 4×12 m dış ölçülere sahip test aracıdır. Bu araçta, 4 ana düşey taşıyıcı ve 2 yatay taşıyıcı mevcuttur. Düşey taşıyıcılar tabanda büyük traktör tekerleklerine sabitlenmiş olup, test aracı bu sayede ileri-geri ve sağa-sola hareket edebilmektedir. Test aracının kaplamalara yük etki ettiren kısmı, iki yatay taşıyıcı arasında ileri-geri, sağa-sola ve yukarı-aşağı hareket ettirilebilen çift kamyon tekerleğinin olduğu bölümdür. Test aracı, 2016 yılında geliştirilen otomasyon sistemi ile kontrol edilmektedir. Otomasyon sistemi 6 farklı senaryodan oluşmaktadır. Bu senaryolar;

- Test aracının belirlenen yük ve hızda, tek doğrultuda, istenilen sayıda sistemin sonuna kadar gidip sistemin başına geri gelmesi,
- Belirlenen yük ve hızda, tek doğrultuda, istenilen sayıda sistemin ortasında bulunan iki adet seyyar sensör arasında gidip geri gelmesi,
- Belirlenen ilk yük ve hızla hareketine başlayıp sistemin sonuna kadar süren seyri esnasında istenilen yere sabitlenebilen sensöre geldikten sonra bitiş noktasına kadar yükünü artırarak durması (kavşaklarda fren modeli, tek yönde),
- Belirlenen ilk yük ve hızla hareketine başlayıp sistemin sonuna kadar süren seyri esnasında istenilen yere sabitlenebilen sensöre geldikten sonra bitiş noktasına kadar yükünü artırarak durmasından sonra tekrar ilk yüke dönerek bu seferde geri gelirken aynı prensiple çalışması (kavşaklarda fren modeli, iki yönde),
- Belirlenen ilk yük ve hızla hareketine başlayıp sistemin sonuna kadar gitmesi daha sonra (0-450 mm) aralığında arzu edilen bir mesafede yatayda (sağa ya da sola) doğrultu değiştirerek geri dönmesi ve bu hareketi istenilen tur sayısında tekrar edebilmesi,
- Belirlenen ilk yük ve hızla hareketine başlayıp sistemin sonuna kadar gitmesi ve geri dönmesi daha sonra (0-450 mm) aralığında arzu edilen bir mesafede yatayda (sağa ya da sola) doğrultu değişmesi ve bu hareketi istenilen tur sayısında tekrar edebilmesinden oluşmaktadır.

Bu çalışma kapsamında test aracının belirlenen yük ve hızda, tek doğrultuda, istenilen sayıda sistemin sonuna kadar gidip sistemin başına geri gelmesinden oluşan senaryo kullanılmıştır. Bu sayede deneyler kapsamında kaplamalar üzerinden tek bir doğrultuda günde ortalama 1,500-2,000 tur yani 3,000-4,000 geçiş sağlanmıştır.

2.2.2. HYT Tesisinde Beton Yolun Hazırlanması

HYT tesisi içinde oluşturulan beton kaplama 200 mm kalınlığında 5.50 m genişliğinde 4 m uzunluğunda 4 ayrı plaktan oluşmaktadır. Kaplama 2009 yılında yapılmış olup her bir plak 2017 yılına kadar farklı çalışmalar kapsamında yüklemelere tabi tutulmuştur. Kaplamada kullanılan beton sınıfının tayini için tesisin ikinci bölümünde bulunan 250 mm kalınlığında 12 m uzunluğundaki diğer beton kaplamadan karotlar alınmış (Şekil 2.16) ve basınç dayanımları belirlenmiştir. Daha sonra bu kaplama kırılıp taş ocağına taşınarak konkasörler aracılığıyla geri dönüşüm agregasına dönüştürülerek tesise geri getirilmiştir.



Şekil 2.16. Beton yoldan karot numunelerin alınması

Deneylerin yapılacağı 200 mm kalınlığındaki beton kaplama, iki farklı asfalt kaplama kalınlığı üzerine araştırma yapılacağı için boyuna yönde derzlerle ayrılarak üç ayrı şerit elde edilmiştir. Bu sayede, beton plaklar 1.90 m genişliğinde 4 m uzunluğunda olmuştur (Şekil 2.17). Bu ölçüler, literatürde HYT tesisini kullanan birçok araştırmacının beton kaplamalar için belirlediği ölçülere oldukça yakındır (Carmichael ve Marienfeld, 1999; Perez vd., 2006; Ozer vd., 2011; Yin, 2015). Bu şeritlerden doğu ve batı tarafta

olanlar asıl deneylerin yapılacağı şeritlerdir. Beton kaplama üzerine serilecek asfalt kaplama kalınlığı, şeritlerin birinde 50 mm olarak diğerinde 100 mm olarak ayarlanacaktır. İki şerit arasında yaklaşık 1.5 m orta şerit bırakılmasının nedeni, hem asfalt kalınlığını rahat ayarlayabilmek hem de doğu ve batı tarafında yapılan yüklemelerin birbirlerini etkilemesinin önüne geçmektir.



Şekil 2.17. Beton kaplamaların boyuna yönde şeritlere ayrılması

Beton kaplamanın ön hazırlıkları tamamlandıktan sonra deneyler sırasında beton kaplama ile asfalt kaplama arasına yerleştirilecek BŞD ölçerlerin yol üzerindeki koordinatlarının belirlenmesine geçilmiştir (Şekil 2.18).



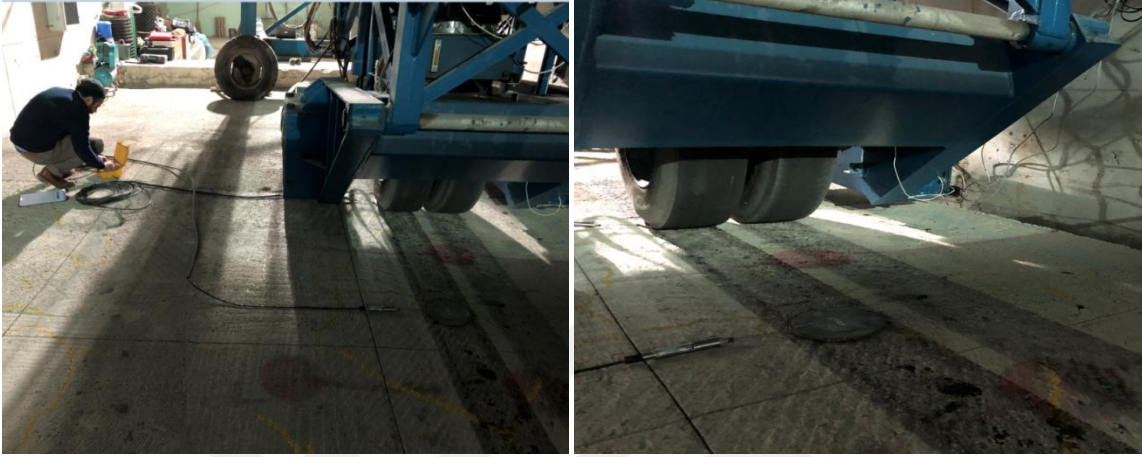
Şekil 2.18. BŞD ölçerlerin total station ile yerlerinin belirlenmesi

KTÜ Harita Mühendisliği bölümünden alınan destekle BŞD ölçerlerin yeri, total station ölçüm aleti kullanılarak tespit edilmiş ve beton üzerine asfalt serildikten sonra yerlerinin tam olarak bulunması için önlem alınmıştır. Asfalt kaplamanın seriminden sonra hem bu aplane edilen noktaları yeniden bulmak hem de donatı tespit cihazı ile BŞD ölçerlerin yerleri belirlenmiştir.

2.2.3. HYT Aracının Hazırlanması

HYT aracı, hazırlanan kaplamalara yük uygulayarak geçen 295-80R-22.5 ölçülerinde 2 adet kamyon lastiğine sahiptir. Tesiste yapılan yüklemelerin belirlenebilmesi ve istenilen yüke ayarlanması için tekerleklerin basınç ölçümleri yapılmıştır (Şekil 2.19). Tekerleklerin her biri 120 psi (0.84 MPa) iç hava basıncına sahip olacak şekilde ayarlanmıştır. 500 psi (3.44 MPa) ölçüm kapasitesine sahip basınç ölçerler kullanılarak, tekerleklerin sağ ve sol tarafındaki hidrolik pistonlar aracılığıyla tekerleklerin geçişler sırasında uygulayacağı yük belirlenmiştir. Yapılan bu ayarlamalarla deneyler boyunca her bir teker, 32 kN yükü geçirecek ve tekerlek tabanında 0.8 MPa basınç oluşturacaktır. Yapılan araştırmalarda bu yükleme derecesinin birçok araştırmacı tarafından kullanıldığı görülmüştür (Huang, 2017; Al-Qadi ve Wang, 2009; Greene vd., 2010; Beak, 2010). Basınç ölçümleri alınırken ölçüm aletinin beton kaplama üzerinde pürüzsüz bir alana yerleştirilmesi önemlidir. Tekerlek

basınçölçerlerin üzerine çıktığında, alınan ölçümlerin doğru olması için basınç ölçerlerin altında dengesini bozabilecek büyüklükte agregaların olmaması gerekmektedir. Aksi takdirde basınç ölçerlerin merkezinde bulunan alıcılar erken tepki göstererek yanlış ölçüm alabilmektedir.



Şekil 2.19. Beton kaplama üzerine uygulanan basıncın ayarlanması

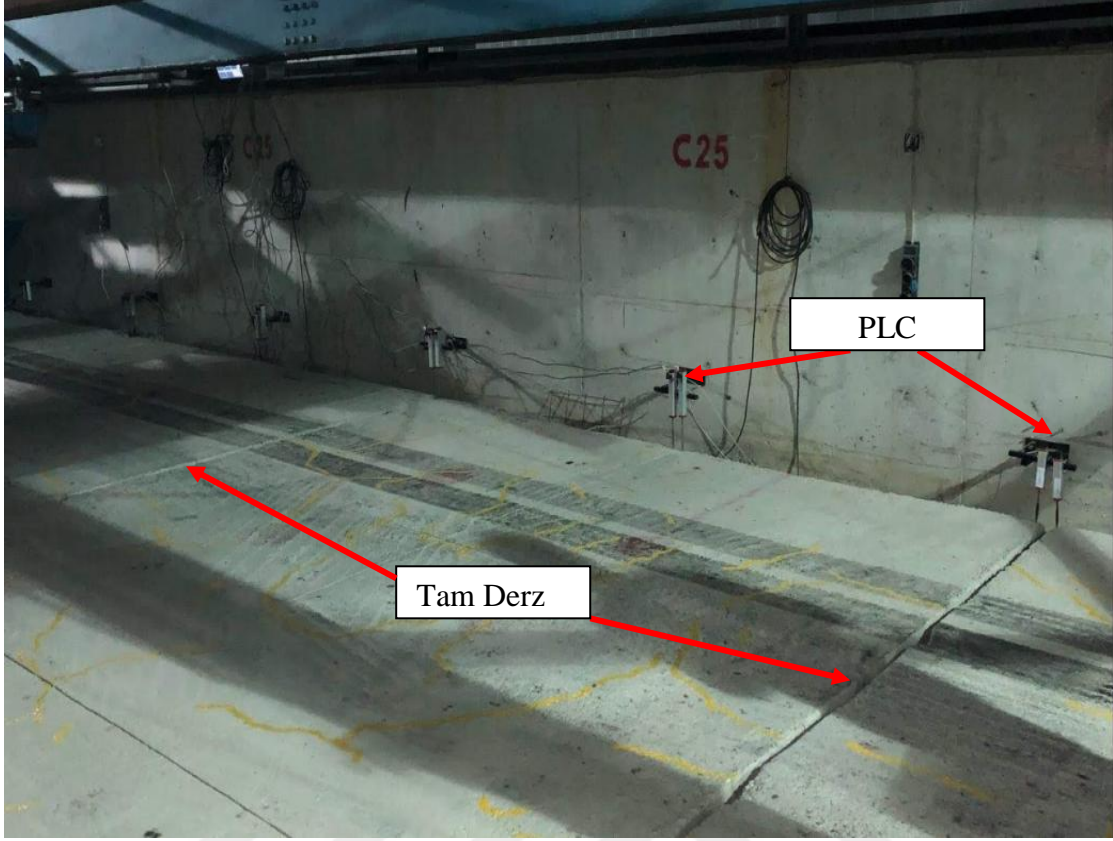
2.2.4. Beton Yolda Deplasman Ölçümlerinin Alınması

HYT tesisinde hazırlanmış beton kaplamanın yük altındaki düşey deplasmanlarının ölçülmesi, çalışmanın en önemli kısımlarından birini oluşturmaktadır. Öyle ki, beton üstü asfalt kaplamaların derz bölgelerinde oluşan yansıma çatlaklarının oluşmasında plak hareketlerinin takip edilmesi önemlidir (FDOT, 2011). Asfalt kaplama serimi öncesinde alınan bu ölçümler, asfalt kaplama ve derz güçlendirme işlemlerinden sonra da tekrar edileceğinden, verilerin birbiriyle kıyaslanma imkânı olacaktır. Bu sayede beton kaplama derzlerinin farklı güçlendirme türleriyle desteklenmesinin ve farklı asfalt kalınlıklarının uygulanmasının beton plak hareketine katkısının ne oranda olduğu belirlenecektir. Düşey deplasmanların belirlenebilmesi için PLC (Potansiyometrik Lineer Cetvel) (Şekil 2.20) ölçüm aletlerinden yararlanılmıştır.



Şekil 2.20. Deplasman ölçümlerinde kullanılan PLC ölçüm aleti

HYT tesisinin sağ ve sol tarafından bulunan duvarlara sabitlenen PLC'ler, tesiste deneyi yapılacak bütün kaplama türlerinin düşey deplasmanlarını ölçecek şekilde tasarlanmıştır. Beton kaplamanın derz bölgelerine denk gelecek şekilde ayarlanan PLC'ler duvarlara sabitlenen ayaklara monte edilmiş ve rahatlıkla istenilen ayarlama yapılabilmektedir. PLC'ler her bir derz bölgesine iki adet yerleştirildikten (Şekil 2.21) sonra kalibrasyonları yapılarak, her iki şerit için başlangıç, orta ve bitiş ölçümleri yapılmıştır. Bu kapsamda, beton kaplamanın doğu ve batı tarafında ayrı ayrı 25,000 geçiş uygulanmıştır. Geçişler tamamlandıktan sonra beton kaplama üzerinde yoğun tekerlek lekeleri olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 2.21).



Şekil 2.21. Derzlere yerleştirilen PLC'ler

2.2.5. Derz Güçlendirmelerinin Uygulanması

HYT tesisinde bulunan beton kaplamaların sağ ve sol şeridindeki düşey deplasman ölçümleri tamamlandıktan sonra, plaklar arasında bulunan 20 mm genişliğindeki tam derzlerin güçlendirmesine geçilmiştir. Tesiste dört ayrı beton plak ve üç tam derz bulunmaktadır. İlk derz, kauçuk EPDM (Etilen Propilen Dien Monomer) ve Is-seal adı verilen bitüm kökenli derz dolgu malzemesinin bir arada kullanılmasıyla güçlendirilmiştir. İkinci derz, kauçuk karoların derz arasına yerleştirilmesi sonrasında kauçuk EPDM levhaların derzin üzerine yapıştırılmasıyla güçlendirilmiştir. Üçüncü derz ise çelik levhaların derzin üzerine yapıştırılmasıyla güçlendirilmiştir.

2.2.5.1. Kauçuk EPDM ve Is-Seal (RJF) Güçlendirme Yöntemi

Bu derz güçlendirme yönteminde öncelikle beton kaplamalar hava püskürtme yöntemi ile iyice tozdan arındırılmış ve derzlerin içinde bulunan irili ufaklı agrega

parçaları çıkarılarak derz boşluğu temizlenmiştir. İlk derz boşluğunu oluşturan bir ve iki numaralı beton plakların derz içine bakan yüzeyleri önce EPDM kauçuk ile kaplanılmıştır. Kaplama sırasında tek bir EPDM parça kullanılarak özel kauçuk yapıştırıcısı ile önce bir yüzeye sonra diğer yüzeye yapıştırılarak havuz oluşturulmuştur. Daha sonra İSFALT tarafından üretilen Is-seal 10 türündeki bitüm esaslı dolgu malzemesi ile derzler doldurulmuştur (Şekil 2.22).



Şekil 2.22. Derze yerleştirilen kauçuk EPDM ve Is-seal (RJF) malzemesi

Is-seal 10 malzemesi, kent içi yollarda, havaalanlarında, köprü ve viyadüklerde çatlak tamiri ve derz dolgu malzemesi olarak kullanılan esnek ve geri dönüştürülebilir özelliğine sahip bitüm esaslı bir üründür. Katı halde tenekelerde temin edilen bu malzeme 120-130°C sıcaklığa kadar ısıtıldıktan sonra eritilmiş ve daha sonra uygulanmıştır.

Arazide yapılan gözlemlerde derz dolgu malzemesi olarak, bitüm esaslı ürünler, sünger fitiller, soğuk uygulanan kimyasalların kullanıldığı tespit edilmiştir. Ancak bu uygulamalar yapıldıktan bir süre sonra dolgu malzemelerinin, beton plakların trafik yükü etkisi altında yaptığı faylanma hareketinden dolayı yukarı doğru sıyrılıp çıktığı gözlemlenmiştir. Bu çalışmada, Is-seal malzemesinin EPDM kauçuk levhalarla birlikte kullanılma nedeni dolgu malzemesinin eriyik haldeyken kauçuk levhalarla daha iyi yapışacak olmasıdır. Çünkü derzlerin içindeki toz ne kadar uzaklaştırılsa da dolgu malzemesinin beton yüzeyine tam yapışmaması ve sertleştikten sonra kolayca sökülmesi mümkündür. Ayrıca EPDM kauçuk ile seal malzemesinin katı halinin elastik özellikler taşıması, beton plakların genleşme ve büzülmesine imkân tanıyacağından plaklar rahat hareket edecektir.

2.2.5.2. Kauçuk EPDM (RP) Güçlendirme Yöntemi

HYT tesisinde bulunan iki ve üç numaralı plakların arası kauçuk levha ile güçlendirilmiştir. Derzlerin arasına önce kauçuk EPDM levhalara destek olması için kauçuk plaklar dik bir şekilde yerleştirilmiştir (Şekil 2.23).



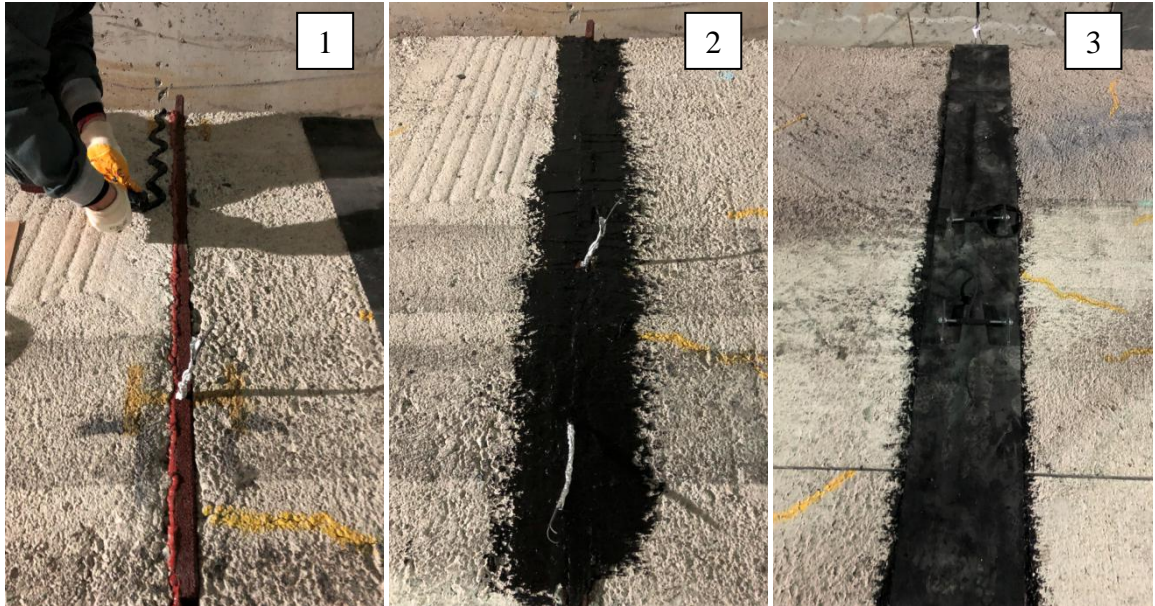
Şekil 2.23. Derze yerleştirilen kauçuk karolar

Bu plaklar piyasada kolayca bulunabilecek kauçuk zemin döşeme karolarıdır. 22×300×300 mm ölçülerindeki kauçuk karolar 200 mm derinliğindeki ve 20 mm genişliğindeki tam derz ölçülerine göre boyutlandırılmış ve sıkı sıkıya yerleştirilmiştir (Şekil 2.24).



Şekil 2.24. Derze yerleştirilen kauçuk karoların yerleşmiş görünümü

Yerleştirilen kauçuk karoların üst yüzeyleri ve beton yüzeyindeki yaklaşık 200 mm genişliğinde bir alan, enine derz boyunca EPDM kauçuk levha yapıştırıcısıyla kaplanmış ve ikinci güçlendirme malzemesi olarak seçilen 3 mm kalınlığındaki EPDM kauçuk levha bu alana yapıştırılmıştır (Şekil 2.25). İşlem adımları 1'den 3'e doğru devam etmektedir.



Şekil 2.25. Kauçuk EPDM (RP) uygulanması

Yaklaşık 20 mm genişliğinde olan derz açıklığının içinde kauçuk eleman kullanılmadan üzerinin 3 mm kalınlığındaki EPDM kauçuk ile kaplanması durumunda güçlendirme elemanının altı desteksiz kalacaktı. Bu durumda, güçlendirme elemanının üzerine serilecek asfalt kaplama yük altında derzin içine doğru baskı uygulayacak ve güçlendirme elemanını yerinden sökecekti. Alınan bu önlemlerle, deney sırasında asfalt kaplamanın beklenenden önce çatlamasının önüne geçilmiş oldu. Ayrıca bu güçlendirme yönteminde kullanılan kauçuk karolar, hem ilk güçlendirme türündeki gibi derz iç kısmını destekleme görevi görmüş hem de elastiklik özelliği sayesinde beton plakların büzülme ve genişleme durumlarında rahat hareket etmelerine imkân tanımıştır. Bu güçlendirme metodu uygulanmadan önce asfalt içine yerleştirilecek BŞD ölçerler kablolarının bir ucu ölçüm alınacak yere diğer ucu plak kenarına doğru uzatılmıştır.

2.2.5.3. Çelik Levha (SP) Güçlendirme Yöntemi

HYT tesisinde bulunan üç ve dört numaralı plakların arası çelik levha ile güçlendirilmiştir. Bu güçlendirme yönteminde, 3 mm kalınlığında 200 mm genişliğinde ve plak genişliği boyunca uzanan çelik levhalar kullanılmıştır. Derz yüzeyleri hava püskürtülerek tozdan arındırıldıktan sonra çelik levhaların yapıştırılmasına geçilmiştir. Deneyler sırasında çelik levhalarda oluşan birim şekil değiştirmelerin ölçülebilmesi için tekerleklerin denk geldiği yerlere boyuna ve enine yönde SG pulları yapıştırılmıştır (Şekil 2.26).



Şekil 2.26. SG pullarının çelik levhaya yapıştırılması

Bu ölçümlerin alınmasındaki temel amaç, yüklemeler sırasında çelik levhaların kalıcı şekil değiştirmelere uğrayıp uğramadığını tespit etmektir. SG pulları yapıştırıldıktan sonra gerekli kontroller yapıldıktan sonra kablolar derz içerisinden yürütülerek plak kenarına kadar uzatılmıştır. Daha sonra çelik levhalar sıcaklığa dayanıklı özel silikonlar ile beton yüzeyine yapıştırılmıştır (Şekil 2.27).

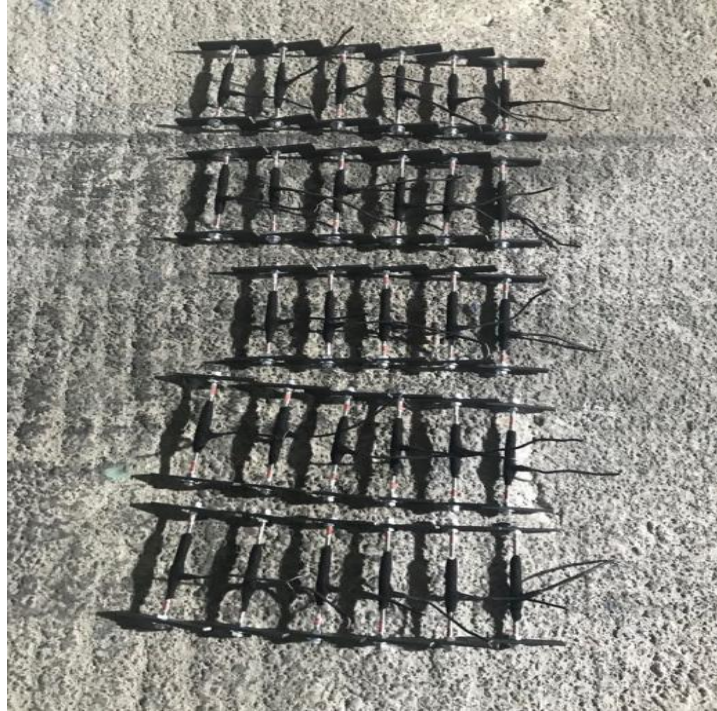


Şekil 2.27. Çelik levhaların derz bölgesine yapıştırılması

Çelik levhalar yapıştırıldıktan sonra BŞD ölçer kablolarının geçeceği çapta iki delik açılarak kablolar plak kenarına doğru uzatılmıştır. Daha sonra güçlendirme bölgesi üzerinde tekerlek geçiş güzergâhına denk gelen kısımlarda asfalt birim şekil değiştirmesini önleyecek iki adet BŞD ölçer yerleştirilmiştir. Derz güçlendirme malzemelerinden çelik levha daha rijit olduğu için kauçuk levha ise daha esnek olduğu için tercih edilmiştir. Bu sayede yansıma çatlaklarının engellenmesi için rijit bir malzemenin mi yoksa esneyebilen bir malzemenin mi kullanılmasının daha etkin olacağına karar verilecektir. Seçilen güçlendirme yöntemleri, kolay temin edilebilir, kolay uygulanabilir, uygun tasarım yapılması durumunda üretim ve uygulama maliyeti düşük aynı zamanda durabilitesi yüksek malzemeler olması sebebiyle tercih edilmiştir.

2.2.6. BŞD Ölçer ve Sıcaklık Ölçerlerin Yerleştirilmesi

KTÜ Ulaştırma laboratuvarında ön çalışmaları yapılan BŞD ölçerlerin seri üretimi yaklaşık 15 gün sürmüştür. BŞD ölçerler, HYT tesisindeki beton kaplama üzerine yerleştirilmek üzere hazırlandıktan sonra (Şekil 2.28) veri toplama kablolarının beton kaplamaya yerleştirilmesine geçilmiştir.



Şekil 2.28. Üretimi tamamlanan BŞD ölçerler

Öncelikle ölçüm alınacak yerlerin tespiti yapılarak işaretlenmiş (Şekil 2.29) daha sonra BŞD ölçer uzatma kabloları derzlerin içerisinde plastik borulardan geçirilmek suretiyle uzatılmıştır (Şekil 2.30).



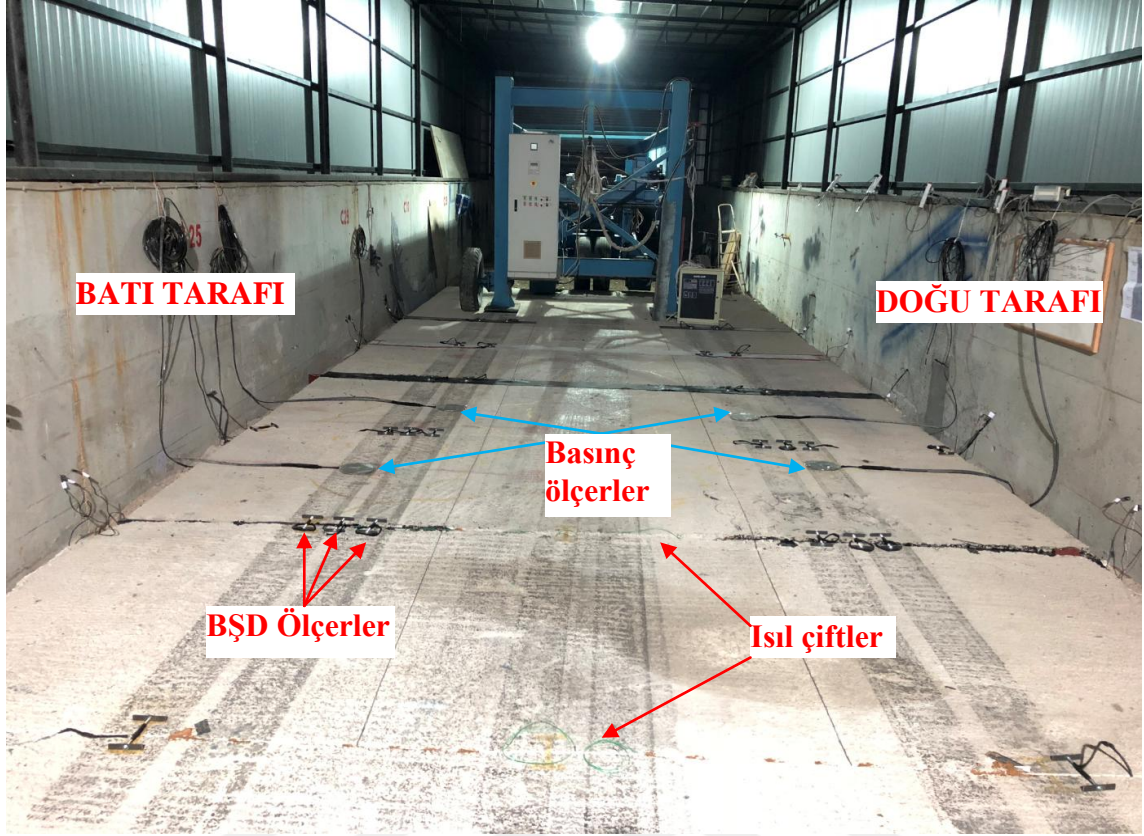
Şekil 2.29. BŞD ölçer yerlerinin işaretlenmesi



Şekil 2.30. BŞD ölçer kablolarının derz içine yerleştirilmesi

Kablolar her ne kadar derz içerisine yerleştirilecek olsa da yine asfalt sıcaklığına karşı korumak için makaron ile kaplanmıştır. Makaron ile kaplanma esnasında sıcaklıktan zarar görme ihtimali bulunan kablolar, kontrol edilmiş ve nihai durumda voltaj ilettiğine emin olunmuştur. BŞD ölçerler beton kaplama üzerine yerleştirilecek olsa dahi daha sonra üzeri asfalt ile kaplanacağından konumuna müdahale etme şansı bulunmamaktadır. Aynı zamanda BŞD ölçerlerden ölçüm alması istenilen yer, asfalt kaplama alt yüzeyidir. Bu maksatla, hem aparatların altında yastık vazifesi görmesini sağlayacak hem de asfalt kaplama alt yüzeyinde oluşan birim şekil değiştirme değerlerinin ölçülebilmesi adına BŞD ölçerlerin altına bir miktar asfalt betonu konulacaktır. Bu nedenle, kablolar derzlerden yürütüldükten sonra BŞD ölçerlerin bağlanabilmesi için yeterince pay bırakılmıştır.

Beton kaplamada üç farklı derz güçlendirme yöntemi uygulanacaktır. Her bir derzde, tekerlek izi geçiş güzergâhındaki tekerleklerin altına birer tane BŞD ölçer yerleştirilmiştir. Sadece ilk derz olan kauçuk EPDM ve Is-seal güçlendirmeli derzde, iki teker arasında denk gelen kısımda fazladan bir BŞD ölçer bulunmaktadır. HYT tesisinde yapılacak asfalt serimi sırasında iki farklı şerit ve bu şeritlerdeki asfalt kalınlıkları 50 mm ve 100 mm arasında olmasından dolayı her bir şeritte 7 adet olmak üzere toplamda 14 adet BŞD ölçer yerleştirilmiştir (Şekil 2.31). Bu şekilde ön hazırlığı yapılan BŞD ölçerlerin yerleştirme işinden sonra SG pullarının veri alıp almadığı kontrol edilmiş ve SG pullarındaki 120 Ω direnç kontrol edilmiş ve asfalt serimi öncesi çalışıklarından emin olunmuştur. Ayrıca beton kaplama üzerine her bir doğrultu için 2'şer tane basınç ölçer yerleştirilmiş, asfalt kaplama içerisinde kalan kısımları sıcaklıktan etkilenmemesi için korunmuş ve testler boyunca, asfalt kaplamalarda sıcaklık dağılımını takip edebilmek için K tipindeki ısıçiftler yerleştirilmiştir.



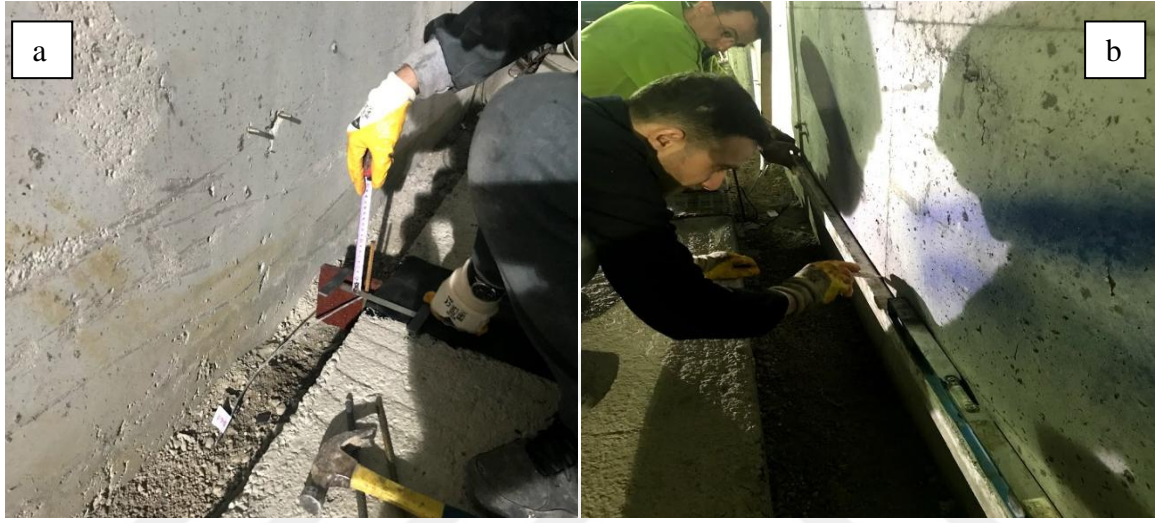
Şekil 2.31. Asfalt serimi öncesinde yerleştirilen tüm ölçüm cihazlarının görünümü

2.2.7. HYT Tesisinde Asfalt Kaplamanın Serilmesi

Tesiste bulunan beton kaplama üzerindeki hazırlıklar (derz güçlendirmeleri, BŞD ölçerlerin yerleştirilmesi, tozların havayla püskürtülmesi) tamamlandıktan sonra asfalt serimi için Trabzon Büyükşehir Belediyesi Fen İşleri Müdürlüğü ile irtibata geçilmiş ve asfalt siparişi verilmiştir.

Tesiste hazırlanacak asfalt kaplama kalınlığı 50 mm ve 100 mm olarak belirlenmiştir. Bu sayede her iki asfalt kalınlığının yansıma çatlaklarını önleme/geciktirmesine yönelik üstünlük ve sakıncaları araştırılmıştır. Kaplama kalınlığının 50 mm olarak seçilmesinin nedenlerinden biri, kaplamaya yerleştirilen BŞD ölçerlerin ihtiyaç duyduğu minimum kalınlığın 50 mm olmasıdır. BŞD ölçerlerin asfalt kaplama altında istenilen ölçümleri alabilmesi için beton kaplamanın üst seviyesinden en az 10 mm yukarı yerleştirilmesi gerekmektedir. Bu sayede BŞD ölçerlerin ölçüm alan kısmının asfalt kaplama içerisinde kalması sağlanmış olacaktır. 100 mm kalınlığındaki asfaltın seçilmesinin nedeni ise literatürdeki birçok araştırmacı tarafından asfalt kalınlığını artırmanın yansıma

çatlaklarının geciktirdiğine dair olan görüşleridir (Hu vd., 2010; Wu vd., 2012; Perez vd., 2012). Asfalt kaplama tesise gelmeden önce, HYT tesisinde asfalt kalınlığının istenilen ölçülerde ayarlanabilmesi için kot ayarlamaları yapılmıştır. Tesisin batı ve doğu tarafında bulunan perde duvarları, beton kaplama üst seviyesinden 50 mm ve 100 mm yükseklikte çelik master kullanılarak teraziye alınarak çizilmiştir (Şekil 2.32) ve asfalt kaplama üst kotları belirlenmiştir.



Şekil 2.32. Asfalt kaplama kalınlık ayarlamaları, a)Yükseklik ayarı, b)Kot çizgisinin çizilmesi

Arazi tecrübelerinde BŞD ölçerlerin sorunsuz yerleştirilmesi ve çalışabilmesi noktasında, asfalt kaplamaların finişer değil de robot türündeki serim aracıyla uygulanmasına karar verilmiştir. Bu sebeple, TBB asfalt malzemesini robotla getirdi. Bu esnada, HYT tesisi içinde bulunan test aracı dışarı çıkarılarak (Şekil 2.33) robotun çalışması için gerekli alan kazandırıldı.



Şekil 2.33. HYT test aracının dışarı çıkarılması

TBB'ye ait robot tesise alınarak asfalt serimine başlanılmıştır. Bu süreçteki çalışmalar kapsamında, önce BŞD ölçerlerin altına yaklaşık 10-20 mm arasındaki kalınlıklarda asfalt konularak aparatlar beton kaplama yüzeyine oturtulmuştur. Aynı işlem basınç ölçerler içinde uygulanmıştır. Asfalt kaplama 50 mm ve 100 mm kalınlıklarında, tesisin kuzey tarafından başlanılarak güneyine doğru serilmiştir. Kaplama yüzey düzgünlüğünün ve yüksekliğinin ayarlanabilmesi için çelik master ve su terazisi bir arada kullanılmıştır. Bu süreçler, sırasıyla Şekil 2.34-2.37'de gösterilmiştir. TBB ekiplerinden alınan bilgiye göre asfalt kaplama sıcaklığı asfalt plantinden çıktığında 160-170°C sıcaklığında olduğu anlaşılmış, alınan ölçümlerde serim sıcaklığının ise sıcaklığın 130-140°C aralığında olduğu görülmüştür. Asfalt kaplamaya ait fiziksel özellikler Tablo 2.1'de verilmektedir. Karışımdaki bitüm içeriği %5-6 olup, 50/70 penetrasyonlu bitüm kullanılmıştır.

Tablo 2.1. Asfalt karışım elek analizi

Elek Açıklıkları	Elek üstü (gr)	Elek üstü (%)	Elekten geçen %'si	Karışım gradasyonu
25 mm (1 in.)		0	100	100
19 mm (3/4 in.)	0	0	100	100
12.5 mm (1/2 in.)	135	8,4	91,6	92
9.5 mm (3/8 in.)	330	20,5	79,5	75,6
4.75 mm (No:4)	693	43,1	56,9	45,4
2 mm (No:10)	1057	65,8	34,2	30,1
0.425 mm (No:40)	1382	86	14	13,5
0.18 mm (No:80)	1442	89,7	10,3	9,9
0.075 mm (No:200)	1483	92,3	7,7	5,2



Şekil 2.34. TBB'ye ait robotun tesise alınması



Şekil 2.35. BŞD ölçerlerin ve basınç ölçerlerin tabanının asfalt kaplama ile desteklenilmesi



Şekil 2.36. Asfalt kaplama yüzeyinin teraziye alınması



Şekil 2.37. Asfalt kaplamanın serilmesi

Asfalt kaplama, sıkıştırma sonrasında kalınlığı azalacağından ve istenilen nihai yüksekliklerin 50 mm ve 100 mm olmasından ötürü, yaklaşık 10-20 mm daha yüksek

serilmiştir. Serimi tamamlandıktan sonra TBB'ye ait çelik bandajlı silindirlerle sıkıştırması yapılmış (Şekil 2.38) ve nihai kaplama yüksekliği olan 50 mm ve 100 mm sağlanmıştır.



Şekil 2.38. Asfalt kaplamanın sıkıştırılması

Tesiste yapılan asfalt kaplama serim işi bittikten sonra, tesisin batı tarafındaki şerit 50 mm kalınlığında, doğu tarafındaki şerit ise 100 mm kalınlığında testlere hazır hale getirilmiştir. Asfalt kaplama bir süre soğuduktan sonra şeritleri birbirinden ayırmak için boyuna şeritler sarı yol boyasıyla boyanmıştır (Şekil 2.39a). Daha sonra beton kaplamadaki enine derzlerin asfalt üzerinden yerlerinin belirlenmesi ve testler sırasında oluşacak yansıma çatlaklarının daha iyi takip edilebilmesi için ilk testin yapılacağı batı tarafının enine derzleri beyaz boya ile boyanmıştır (Şekil 2.39b).

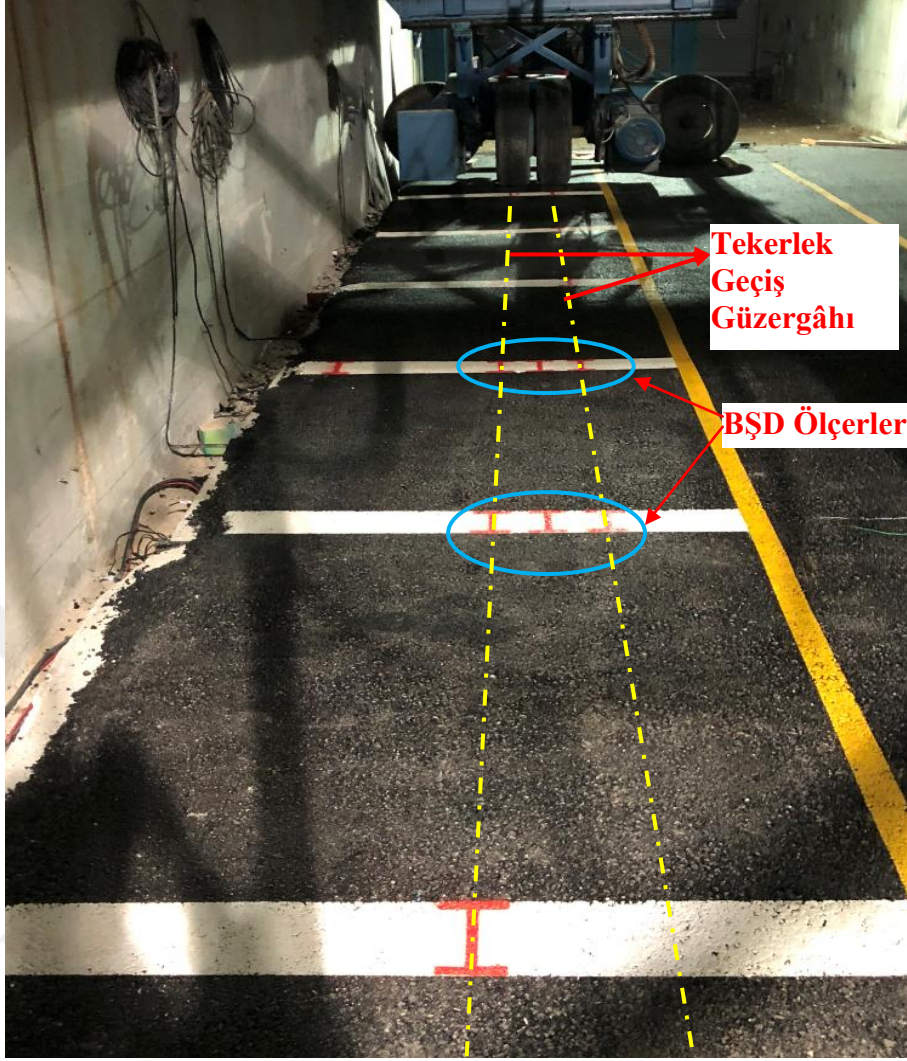


Şekil 2.39. a)Boyuna şeritlerin boyanması b)Enine derzlerin boyanması

Derzler boyandıktan sonra, asfalt kaplama altında kalan BŞD ölçerlerin ve basınç ölçerlerin yerinin belirlenmesi için metal tespit cihazıyla asfalt kaplama taranmıştır (Şekil 2.40a). Aynı zamanda daha önce total station (Şekil 2.40b) ile koordinatları alınan noktalar kaplama üzerine aplane edilerek cihazların tam olarak yeri tespit edilmeye çalışılmıştır. Yerleri belirlenen BŞD ölçerler kırmızı boya ile boyanarak (Şekil 2.41) HYT test aracının geçiş güzergâhı belirlenmiştir.



Şekil 2.40. Ölçüm cihazlarının bulunması; a)Metal tespit cihazıyla b)Total station aletiyle



Şekil 2.41. Tespit edilen ölçüm aletlerinin boyanması ve geçiş güzergâhının belirlenmesi

Yapılan tüm bu ince işler, tesisin batı tarafındaki testler tamamlandıktan sonra doğu tarafında bulunan 100 mm kalınlığındaki asfalt kaplama için de yapılmıştır.

2.2.8. Asfalt Kaplamaların HYT Test Aracıyla Yüklenmesi

Asfalt kaplama serimi tamamlandıktan sonra yansıma çatlağı oluşum sürecinin takip edilebilmesi için HYT test aracıyla önce batı tarafındaki 50 mm asfalt kaplama üzerine tekrarlı yüklemeler yapılmıştır. Bu kapsamda yapılan ilk iş, test aracının dış tekerleklerinin havasının indirilerek sistemin çelik ayakların üzerine oturtulması sağlanmış ve daha sonra teraziye alınmıştır (Şekil 2.42). Test aracının kaplama üzerinde hareket edecek yarım aksa

karşılık gelen ikiz tekerleklerinin ayrı ayrı iç hava basıncı kontrol edilmiş ve literatürde de kabul edilip birçok araştırmacı tarafından HYT tesislerinde kullanılan (Al-Qadi vd., 2009; Williamson, 2015) 120 psi değerinde olması sağlanmıştır. Daha sonra tekerlekler altına yerleştirilen basınç sensörleriyle (Şekil 2.43) beton kaplamalarda uygulanan 0.8 MPa basınç değerine ulaşıncaya kadar, aracın düşey pistonları aracılığıyla tekerlekler yol yüzeyine doğru bastırılmıştır.



Şekil 2.42. HYT aracının teraziye alınması ve dış lastiklerin havasının indirilerek çelik ayakların üzerine oturtulması



Şekil 2.43. Asfalt kaplama yüzeyine uygulanan basınç değerinin ölçülmesi

İstenilen basınç ayarları yapıldıktan sonra yüklemeler başlatılmıştır. Bu kapsamda, tesisin batı ve doğu tarafında bulunan asfalt kaplamalar, uygulanan basınç miktarı, günlük geçiş sayısı, toplam geçiş sayısı gibi özellikler bakımından birbiriyle eşit koşullardadır. İki kaplamaya uygulanan geçişlerin tek farkı mevsim zaman aralığıdır. Tesisin batı tarafı (50 mm asfalt kaplama) Mayıs-Ekim arasında yüklenirken, doğu tarafı (100 mm asfalt kaplama) Aralık-Mart ayları arasında yüklenmiştir. Bu durum sıcaklık farkı açısından güzergâhlar arasında önemli bir fark oluşturmaktadır. İki güzergâhın yüklemeleri arasında kalan Ekim ve Aralık ayları arasında tesis bakıma alınmış, tekerlekler yenilenmiş, gerekli bakım onarım işleri yapılarak testlere devam edilmiştir.

Her bir güzergâhtan toplamda 100,000 geçiş yapılmıştır. Testlerin ilk zamanlarında günlük 500 geçiş yapılmış, daha sonra bu sayı artırılarak günde 2,500 geçişe kadar ulaşmıştır. İlk başlarda kaplamada oluşan BŞD değerlerinin ne olduğu ve yansıma çatlaklarının ne zaman ortaya çıkacağı bilinmediğinden ötürü bu yöntem tercih edilmiştir. Bu sayede, eğer kaplamada çatlaklar oluşursa hangi zaman aralığında oluştuğu net olarak tespit edilmiş olacaktır.

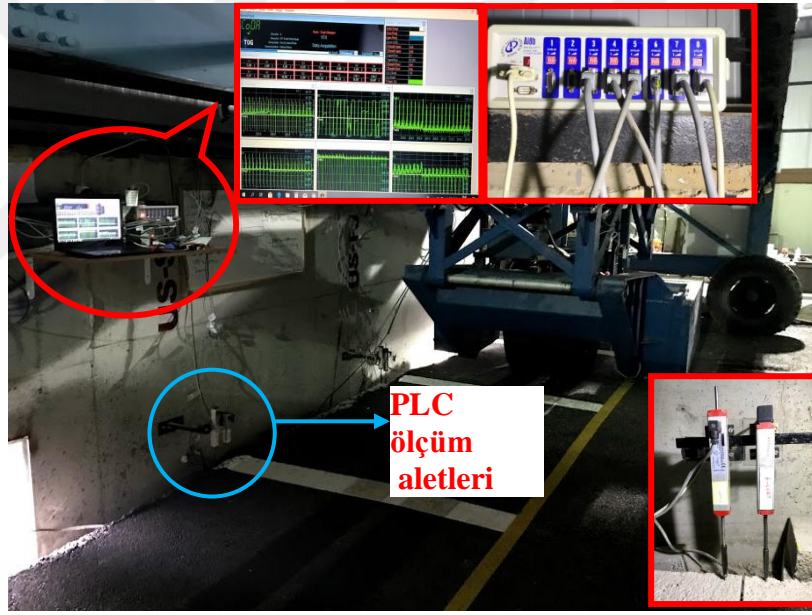
2.2.9. Asfalt Kaplamaların Ölçümlerinin Alınması

Tesisin doğu ve batı tarafında bulunan şeritler ayrı ayrı 100,000 yüklemeye tabi tutulmuştur. Bu süre zarfında, her 25,000 geçişte bir beton kaplamaların yüklenme sırasındaki düşey deplasmanlar ve 25,000-75,000 ve 100,000. geçişlerde asfalt kaplamada oluşan tekerlek izi oluşumları ölçülmüştür. Beton kaplamaların derz bölgelerine yerleştirilen BŞD ölçerlerle, 0-6,000-7,000-8,500-11,500-15,000-20,000-25,000-30,000-40,000-50,000-70,000 ve 100,000 geçiş sonrasında asfalt kaplamaların altında meydana gelen BŞD değerleri ölçülmüştür. Ayrıca her şerit için asfalt kaplama içine yerleştirilen basınç ölçerlerden veriler alınarak tekerlek izi oluşumu ve geçiş sayısı, asfalt kaplama içinde oluşan gerilmeler arasında ilişki kurulmaya çalışılmıştır.

2.2.9.1. Asfalt Kaplamada Deplasman Ölçümlerinin Alınması

Bölüm 2.2.4'de PLC ölçüm aletleriyle, beton kaplama derz bölgelerindeki düşey deplasmanların ölçüm yöntemi hakkında bilgi verilmiştir. Bahsedilen bu ölçümler

yapılırken, beton kaplama üzerinde hem derz güçlendirmeleri yapılmamıştı hem de asfalt kaplama serilmemişti. Güçlendirmeler yapıldıktan ve farklı iki kalınlıktaki asfalt kaplama serildikten sonra beton kaplamaların düşey yöndeki hareketi sınırlandırılmıştır. Bu bölümde anlatılan ölçümlerin alınmasının temel nedeni, aynı geçiş yükü altında, güçlendirme tiplerinin ve asfalt kaplama kalınlıklarının beton kaplamalarda ki düşey hareketlere olan etkisinin belirlenmesidir. Bu kapsamda, her bir derz bölgesine 2 adet PLC ölçüm aleti yerleştirilmiş üç derz için toplamda 6 adet PLC kullanılmıştır. Kalibrasyonları yapılan PLC'ler, veri toplama sistemine oradan da RS-485 sinyal dönüştürücü ile yazılımının bulunduğu bilgisayara bağlanılmıştır (Şekil 2.44). Test aracı, belirlenen 0.8 MPa basınçla geçiş yapmaya başlamadan önce ilk ölçümler alınmış ve daha sonra her 25,000 geçişte bir bu ölçümler tekrarlanmıştır.



Şekil 2.44. PLC ölçüm aletleri ve veri toplama cihazı

2.2.9.2. Asfalt Kaplamada BŞD Ölçümlerinin Alınması ve Yansıma

Çatlaklarının Takibi

Beton kaplama derz bölgelerinde asfalt kaplamalar altına yerleştirilen BŞD ölçerler test aracının yüklemeleri sırasında veri üretmeye başlamıştır. Doğu ve batı tarafındaki şeritlerde 7'şer taneden toplamda 14 adet BŞD ölçer bulunmaktadır. Ayrıca çelik güçlendirmenin kullanıldığı derzde, boyuna ve enine yönde iki BŞD ölçer çelik levha

üzerine yapıştırılmıştır. Asfalt kaplama serimi sırasında doğu tarafındaki BŞD ölçerlerden zarar gören olmamıştır. Ancak yüklemeler sırasında çelik levha ile güçlendirme yapılan derz bölgesindeki iki BŞD ölçerden biri bozulmuştur. Batı tarafında ise asfalt kaplama serimi sırasında kauçuk EPDM levha ile güçlendirme yapılan derz bölgesindeki iki BŞD ölçerden biri bozulmuştur. Her iki şeritte yapılan 100,000 yükleme neticesinde Bölüm 2.2.9'da belirtilen aralıklarla alınan ölçümler kaydedilmiştir. Alınan ölçümlerle, derz bölgelerinde meydana gelen yansıma çatlak oluşumu ilişkilendirmeye çalışılmıştır. Yansıma çatlakları, önce tekil olarak sonra çift çatlak şeklinde meydana gelmiştir. Yapılan yüklemeler sonucunda oluşan çatlaklar, günlük olarak takip edilmiş ve hangi geçiş seviyesinde ne kadar ilerleme kaydettiği not edilmiştir.

2.2.9.3. Asfalt Kaplamada Tekerlek İzi Oluşumunun Takibi

Asfalt kaplamaların HYT test aracıyla yüklenmeleri sırasında, uygulanan yük miktarı, sıcaklık, geçiş sayısı ve asfalt kaplama malzeme özelliklerinin de etkisiyle tekerlek izi oluşmuştur. Tekerlek izi oluşum miktarıyla, geçiş sayısı arasında ilişki kurulabilmesi her 25,000 geçişte bir doğu ve batı tarafındaki şeritlerin derz bölgelerinde tekerlek izi derinlik ölçümü yapılmıştır. KTÜ Harita Mühendisliği'nden alınan destekle total station aleti kurularak geçişlere başlamadan önce asfalt kaplamanın yüzey profili çıkarılmış, daha sonra alınan ölçümler, bu verilerle karşılaştırılarak grafik haline dönüştürülmüştür. Ayrıca derzlerde tekerlek izi oluşan yerlerin üzerine çelik mastar uzatılıp teraziye alınarak (Şekil 2.45), total station yöntemiyle alınan veriler doğrulanmaya çalışılmıştır.

Çalışmada Sokkia marka SDL serisi dijital nivo aleti kullanılmıştır (Şekil 2.46). Alet ölçüm yöntemi, barkod bölmeli mira üzerinden otomatik bir şekilde okumaların ekrana yansıtılması olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu sayede okuma hatası, tahmin hatası gibi kişisel hataların ölçümlere yansıtılması sıfıra indirilmiştir. Ayrıca derzler üzerlerinde işaretlenen bütün noktalarda mira el ile tutulmamış tek tek noktalara mira sehpası ile kurulmak suretiyle ölçümler yapılmıştır. Bu sayede el titremesine bağlı küçük mira hareketinden kaynaklı hatalar da sıfıra indirilmeye çalışılmıştır.



Şekil 2.45. Teraziye alınan çelik masterlarla tekerlek izi oluşumunun ölçülmesi

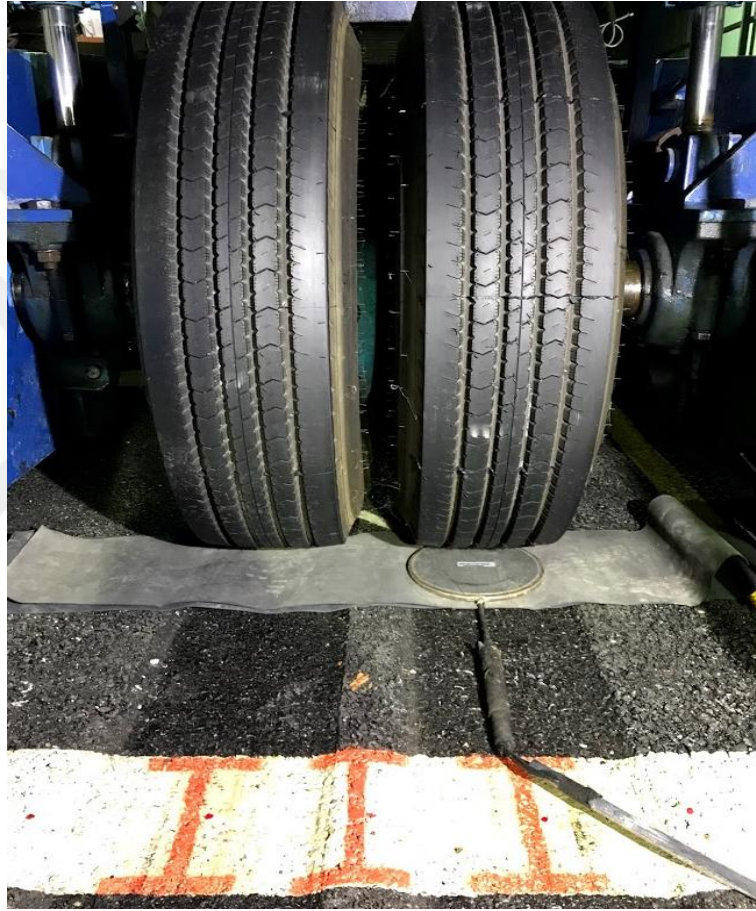


Şekil 2.46. Sokkia marka SDL serisi dijital nivo aletinin kullanılması

2.2.9.4. Asfalt Kaplamada Oluşan Gerilme Değerlerinin Takibi

Asfalt kaplamalar serildikten sonra hem doğu tarafında hem de batı tarafında geçişler sırasında kaplama yüzeyine 0.8 MPa basınç uygulanmıştır. Kaplamaların içerisine

yerleştirilen basınç ölçerlerle, yüzeyde uygulanan basınç değerinin kaplama içerisinde hangi değerlere ulaştığı belirlenmiştir. Bu ölçümler sayesinde, kaplama kalınlığının yüzeye uygulanan yükü hangi miktarda azalttığı ile ilgili bilgi edinilmeye çalışılmıştır. Ayrıca geçiş sayısı arttıķa oluşan tekerlek izi derinliği, uygulanan ilk basınç değerinde değişikliklere neden olmaktadır. Geçişler sırasında her 25,000 geçişte bu değerler kontrol edilerek 0.8 MPa değerindeki ilk basınç değeri korunmaya çalışılmıştır (şekil 2.47).



şekil 2.47. Yüklemeler sırasında asfalt kaplama yüzeyinden basınç ölçümü alınması

2.3. Sonlu Elemanlar (SE) Yöntemi

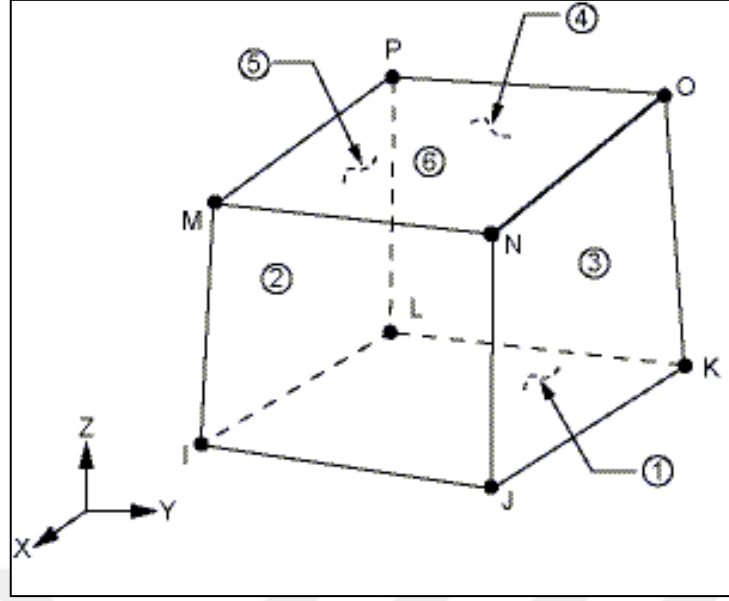
Çalışmanın bu kısmında, HYT tesisinde hazırlanan beton kaplama, temel tabakası, güçlendirme yöntemleri ve asfalt kaplamanın sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak oluşturulan modelleri analiz edilmiştir. Sonlu elemanlar programı olarak ANSYS

Mechanical APDL Product Launcher V 14.5 kullanılmıştır. Hazırlanan modeller ve bu modellere atanan isimler Tablo 2.2’de sunulmuştur.

Tablo 2.2. Sonlu eleman modellerinin isimlendirmesi

Tasarımlar	Derz üstü güçlendirme genişliği (cm)	Asfalt kalınlığı (cm)	Modellerin isimleri
Beton kaplama (CP)	-	-	CP
Beton üstü asfalt kaplama	-	5	RJF-5
<i>Kauçuk derz dolgusu (RJF)</i>	-	10	RJF-10
<u>Beton üstü asfalt kaplama</u> <i>Kauçuk levha (RP)</i>	10	5	RP10-5
		10	RP10-10
	20	5	RP20-5
		10	RP20-10
	30	5	RP30-5
		10	RP30-10
	40	5	RP40-5
		10	RP40-10
	50	5	RP50-5
		10	RP50-10
<u>Beton üstü asfalt kaplama</u> <i>Çelik levha (SP)</i>	10	5	SP10-5
		10	SP10-10
	20	5	SP20-5
		10	SP20-10
	30	5	SP30-5
		10	SP30-10
	40	5	SP40-5
		10	SP40-10
	50	5	SP50-5
		10	SP50-10

Sonlu eleman yönteminde üç boyutlu modeller hazırlanırken sekiz düğüm noktasına sahip, her düğüm noktasında üç serbestlik derecesi bulunan SOLID 185 eleman tipi kullanılmıştır (Şekil 2.48).

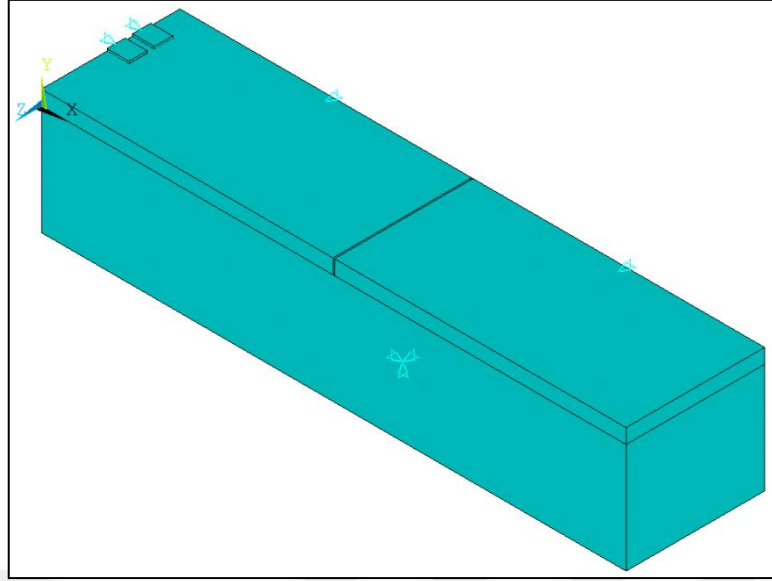


Şekil 2.48. Sekiz düğüm noktalı eleman tipi (ANSYS, 2012).

2.3.1. Beton Kaplama Tasarımı

Sonlu eleman modellerinin ilki beton kaplama (CP) tasarımıdır. HYT tesisinde yapılan çalışmalar kapsamında ilk olarak beton kaplamanın derz güçlendirmesiz ve asfalt kaplamasız halinde yüklemeler yapılmış ve plakların düşey deplasman hareketleri belirlenmiştir. Bu bölümde ise beton kaplamanın modellenmesi hakkında genel bilgiler verilecektir.

Geometrik ölçüler girilmeden önce kartezyen koordinat sistemi belirlenmiştir. Bu belirlemeye göre, “x” trafik seyir yönünü, “y” plakların kalınlık yönünü ve “z” plakların derinliğini temsil etmektedir. HYT tesisinde bulunan beton kaplama 200 mm kalınlığında, bir şerit genişliği 1.90 m ve tek bir plak uzunluğu 4 m’dir. Beton kaplamalar, iki ayrı plak ve arasında 20 mm genişliğinde tam derz olacak şekilde toplamda 8.02 m uzunluğunda hazırlanmıştır. Aslında HYT tesisinde 4 ayrı plak bulunmaktadır. Analiz sürelerini kısaltmak ve beton plaklar arasındaki tek derz modellemesinin yeterli verileri sağlayacağı düşünüldüğünden bütün plaklarının modellenmesine gerek duyulmamıştır. Beton plaklar 1.5 m kalınlığında doğal zemin üzerine oturtulmuştur. HYT tesisindeki zemin modeli de buna yakındır. Hazırlanan geometrik model Şekil 2.49’da gösterilmektedir.



Şekil 2.49. ANSYS beton kaplama geometrik modeli

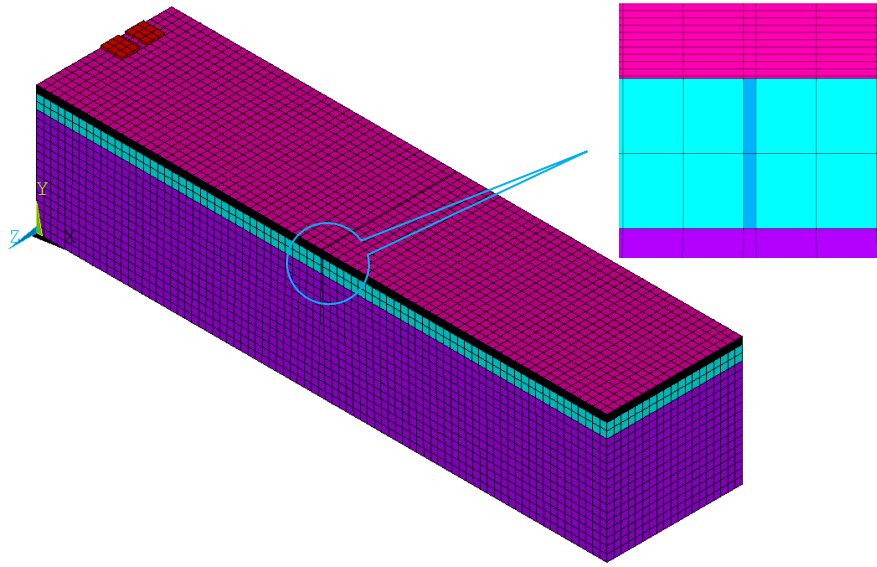
Modellemeler sırasında, HYT tesisindeki test aracının hareketli yükünü temsil etmek için iki plak üzerinden 8 sn’de yani 3.6 km/s hızla geçen iki adet dikdörtgen alan tanımlanmıştır. Lastik basınç alanlarını plak üzerine dikdörtgen alan olarak tanımlamak, literatürde birçok araştırmacı tarafından kullanılan bir yöntemdir (Beak, 2010; Perez vd., 2006). Dikdörtgen alanlara 0.8 MPa basınç uygulanmıştır. HYT test aracı tekerleklerinin plak üzerine bastığı alan ölçülerek 250×300 mm boyutlarında olduğu görülmüş, dikdörtgen alanlar bu ölçülerde modellenmiştir. 26 adım sayısı belirlenirken iki plak uzunluğunun toplamda 8.02 m olması göz önünde bulundurulmuş, dikdörtgen alanların hareket yönüne paralel kenarının 300 mm olarak belirlenmesi sonucunda yaklaşık 26 adımda tek bir yönde geçişini tamamlayacağı hesap edilmiştir. Hareketli yük etkisini kazandırabilmek için bu dikdörtgen alanların, plak üzerinde hareket etmesi sağlanmıştır. Sınır koşulları, temel tabakasının altından tüm yönlerden tutularak, beton plağın ise “z” yönünden hareketi sınırlandırılarak tanımlanmıştır. Beton plağın tek bir yandan tutulmasının nedeni, HYT tesisindeki plakların yan yana ve boyunda yarım derzlerle ayrılmış olmasını temsil edebilmek içindir. Bu yarım derzler, plakların “z” yönündeki hareketini kısıtlamakta ancak “x” ve “y” yönlerinde hareket edebilmesine izin vermektedir. Tekerlek basma alanlarını temsil eden dikdörtgen alanlarla, kaplama arasında yüzey-yüzeye kontakt tanımlanmıştır.

Geometrik model tamamlandıktan sonra sweep mesh yapılarak (Şekil 2.50 ve 2.51) hazırlanan tüm model küçük elemanlara ayrılmıştır. Mesh boyutunun belirlenebilmesi için aynı model için farklı mesh boyutları (75, 100, 150 ve 200 mm) seçilerek mesh analizi

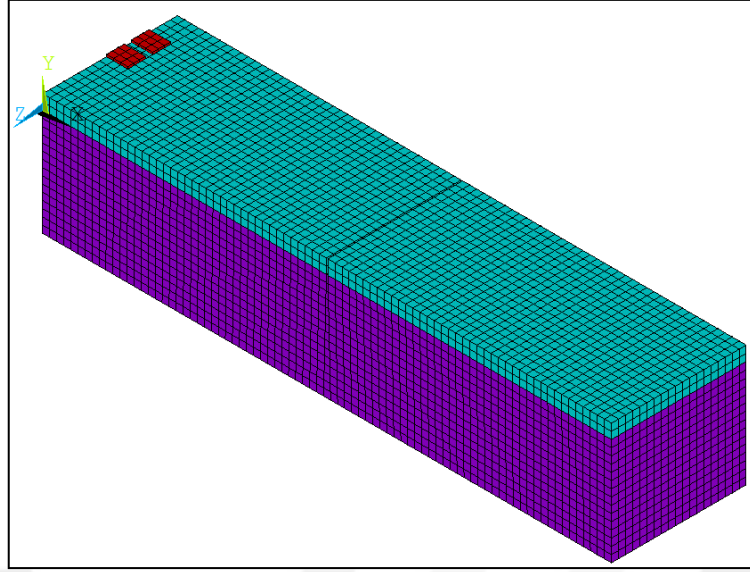
yapılmış ve mesh boyutlarının 100 mm ölçülerinde kullanılmasının yeterli olduğu kanaatine varılmıştır. Ancak asfalt kaplamalar hem 50 mm hem de 100 mm için düşeyde 10 mm'lik elemanlara bölünmüştür. Mesh işlemi tamamlandıktan sonra; 200 mm mesh için 9046 eleman, 150 mm için 17176 eleman, 100 mm için 44667 eleman ve 75 mm için 99254 eleman elde edilmiştir. Beton kaplama, asfalt kaplama, tekerlek, kauçuk, çelik ve taban zeminine ait malzeme özellikleri Tablo 2.3'te gösterilmektedir.

Tablo 2.3. Sonlu eleman modeli malzeme özellikleri

Malzemeler	Elastisite modülü (E) (MPa)	Poisson oranı (ν)	Birim Hacim Ağırlık (kg/m ³)
Beton kaplama	30,000	0.2	2,400
Taban zemini	12	0.45	1,800
Kauçuk	0.137	0.463	1,300
Çelik	210,000	0.3	7,850
Tekerlek	335	0.49	750
Asfalt kaplama (20°C)	1,400	0.35	2,100
Asfalt kaplama (10°C)	2,620	0.35	2,100



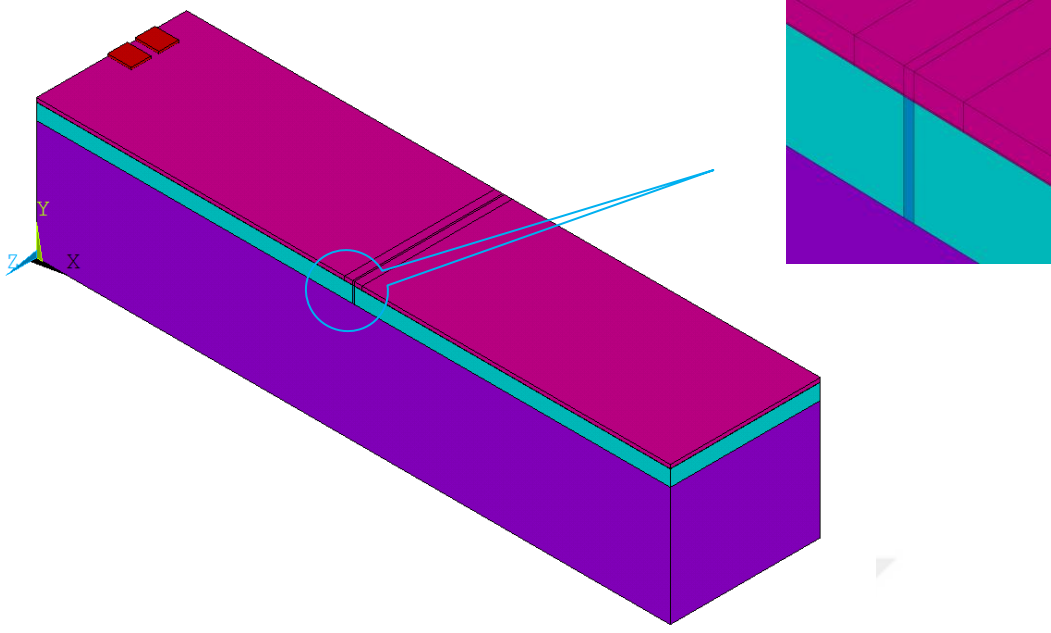
Şekil 2.50. Asfalt kaplama modelinin sonlu elemanlara bölünmüş hali



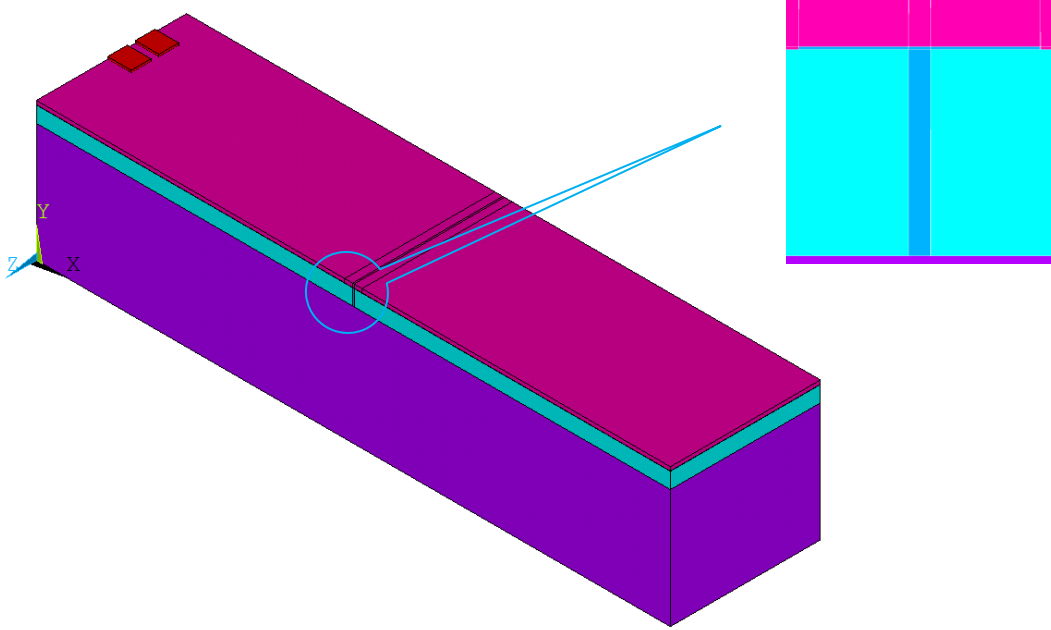
Şekil 2.51. Beton kaplama modelinin sonlu elemanlara bölünmüş hali

2.3.2. Beton Üstü Asfalt Kaplama Tasarımı

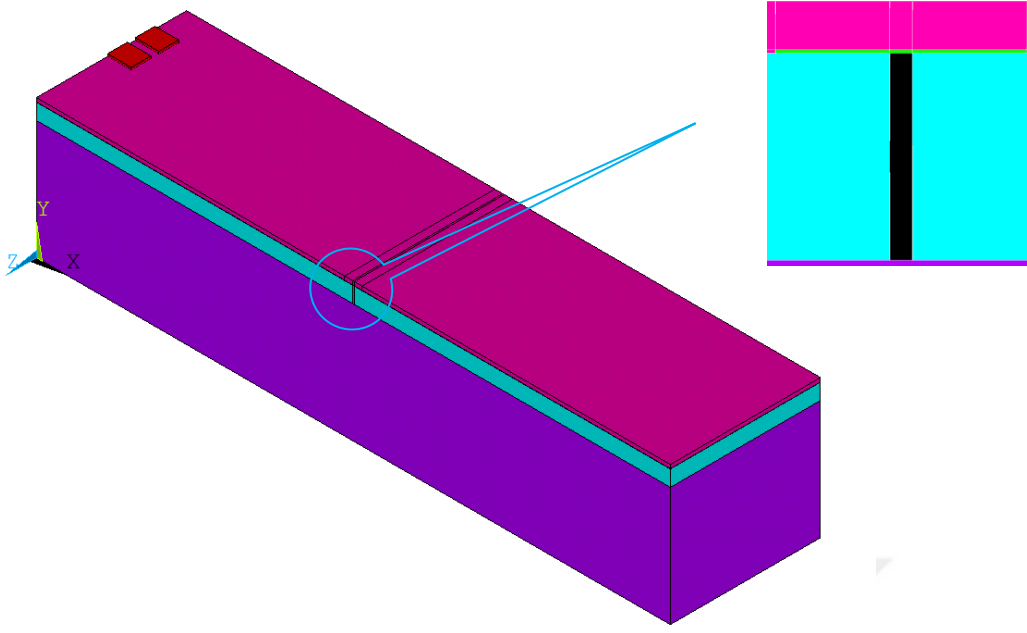
Beton kaplama tasarımı yapıp sonuçları alındıktan sonra, beton üstü asfalt kaplama modellerine başlanılmıştır. Bu modellerin CP modelinden temel farkı, beton üstüne asfalt kaplama modelleri oluşturulmasının yanı sıra derz bölgesinde üç farklı derz güçlendirme elemanının da modellenmesidir. Derz güçlendirme elemanı olarak, kauçuk derz dolgusu (RJF), kauçuk levha (RP) ve çelik levha (SP) kullanılmıştır. Asfalt kaplama kalınlığı olarak HYT tesisindeki gibi 50 mm ve 100 mm kalınlıklar kullanılmıştır. Ayrıca güçlendirme elemanlarından RP ve SP modeli 100, 200, 300, 400 ve 500 mm genişliklerinde ayrı ayrı denendikten sonra sonuçlarına göre en ideal ölçüye karar verilmiştir. Bu değişik parametreler neticesinde toplamda 22 model hazırlanmıştır. Hazırlanan geometrik modeller Şekil 2.52-2.54'te gösterilmektedir.



Şekil 2.52. RCF güçlendirme modeli

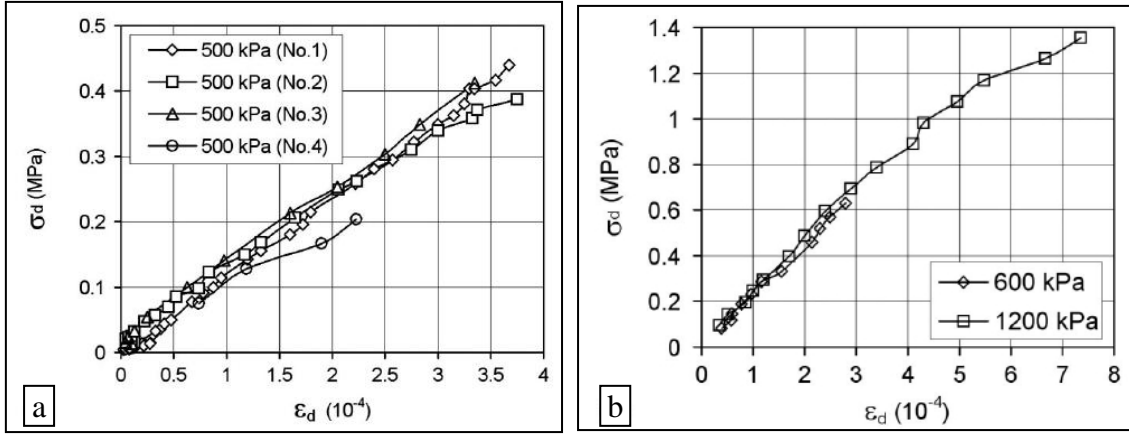


Şekil 2.53. RP güçlendirme modeli



Şekil 2.54. SP güçlendirme modeli

Asfalt kaplamalı model hazırlanırken, HYT tesisinde doğu ve batı şeritlerinin test edilme sıcaklıkları göz önünde bulundurulmuştur. Batı şeridi ortalama 20°C sıcaklıklarda test edilmişken, doğu şeridi ortalama 10°C sıcaklıklarda test edilmiştir. Asfalt kaplamaların malzeme davranışında, sıcaklığın etkisi bilinen bir gerçektir. HYT tesisinde yapılan çalışmanın, sonlu elemanlar yöntemiyle doğrulanabilmesi için malzeme özellikleri ve geometrik modelin gerçeğe yakın modellenebilmesi gerekmektedir. Bu amaçla, yapılan literatür taramalarında, HYT tesisine serilen asfalt kaplama modeline yakın malzeme özelliklerine ve bitüm içeriğine sahip bir çalışma bulunmuş ve irdelenmiştir. Wang ve Höeg (2011) tarafından yapılan çalışmada, 50/70 sınıfındaki %6.9 bitüm oranına sahip, sıkışma sonrası %3-10 aralığında hava boşluğu olabilen, %10-15 aralığında filler, %35-52 arasında ince agrega ve %33-55 arasında kaba agrega kullanılarak asfalt betonu hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler, 500 ve 600 kPa hücre basıncı altında üç eksenli basınç aletine yerleştirilmiş, 9°C ve 20°C sıcaklıklarda deney yapılmıştır. Yapılan deney sonucunda numunelerin gerilme-BŞD grafikleri (Şekil 2.55a ve 2.55b) çıkarılmıştır. Ayrıca asfalt kaplamaya ait gerilme-BŞD grafik değerleri Tablo 2.4'te gösterilmektedir.



Şekil 2.55 a)20°C’de asfalt gerilme-BŞD grafiği, b)9°C’de asfalt gerilme-BŞD grafiği (Wang ve Höeg, 2011).

Tablo 2.4. Sonlu eleman modeli asfalt kaplama gerilme-BŞD grafiğinin girdileri

Asfalt kaplama (20°C)		Asfalt kaplama (10°C)	
σ (MPa)	ϵ (10^{-6})	σ (MPa)	ϵ (10^{-6})
0.066843	47.75	0.086886	33.16
0.081892	68.97	0.144596	56.12
0.100650	87.00	0.190936	76.52
0.143309	122.02	0.231539	96.91
0.156957	133.69	0.399469	168.33
0.180816	160.21	0.694672	288.23
0.194456	174.01	0.776096	339.17
0.259316	222.81	0.886592	407.94
0.279791	239.79	1.072060	494.63
0.291700	257.83	1.176490	548.15
0.351445	301.33	1.270870	667.69
0.361660	315.12		
0.414574	354.38		

Tablo 2.4’ten elde edilen verilere göre; asfalt kaplamanın 10°C sıcaklıktaki elastisite modülü 2,620 MPa iken, 20°C sıcaklıktaki elastisite modülü 1,400 MPa olarak bulunmuştur. Bu değerler, Wang (2004) tarafından bulunan Formül (2.1) ile yeniden hesaplanmış ve doğruluğundan emin olunmuştur.

$$\frac{E_t}{E_c} = 1.0 - 1.5 \log \frac{T}{C} \quad (2.1)$$

E_t = T sıcaklığındaki elastisite modülü

E_c = C sıcaklığındaki referans elastisite modülü

Formül 2.1’de referans sıcaklığı 10°C, referans elastisite modülü 2,620 MPa olarak alındığında, 20°C’deki asfalt kaplamanın elastisite modülü 1,436 MPa olarak bulunmuştur. Sonlu eleman modelinde, 20°C’deki asfalt kaplama için kullanılan elastisite modülü 1,400 MPa olup bu iki değer arasında önemli bir fark bulunmamaktadır.



3. BULGULAR VE İRDELEME

Bu çalışma kapsamında, derzli donatısız beton kaplamaların asfalt kaplama ile yenilenmelerinden sonra derz bölgelerinde meydana gelen yansıma çatlaklarının mümkünse önlenmesi değilse geciktirilmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda, KTÜ’de bulunan HYT tesisindeki 200 mm kalınlığında, 5.50 m genişliğinde ve 4 m uzunluğundaki beton kaplamalar boyuna derzlerle ayrılmış ve doğu/batı adı verilen iki ayrı şerit elde edilmiştir. Batı şeridi daha sonra 50 mm asfalt kaplama ile Doğu şeridi 100 mm asfalt kaplama ile yenilenmiştir. Bu yenileme sırasında üç ayrı tam derz farklı güçlendirme malzemeleriyle (RJF, RP ve SP) güçlendirilmiştir. Beton kaplamalar, asfalt kaplama ile yenilenmeden önce yük altındaki düşey deplasman hareketinin anlaşılabilmesi için PLC ölçüm aletleriyle veri alınmıştır. Bu süreç devam ederken asfalt kaplamalarda oluşan BŞD değerlerinin ölçümü için uygun ölçüm aletleri hazırlanmıştır. Deneyler sırasında, HYT aracının uyguladığı basınç takip edilerek aynı değerde olması sağlanmıştır. Asfalt serilmeden önce, beton kaplama üzerinde her bir şeritten 25,000 geçiş, asfalt serildikten sonra ise 100,000 geçiş yapılmıştır. Yüklemeler sırasında, farklı derz güçlendirme malzemeleriyle güçlendirilen derz bölgelerinde yansıma çatlağı oluşum süreci, sıcaklık değişimleri, asfalt kaplama içindeki gerilmeler, BŞD değerleri ve tekerlek izi oluşumu takip edilmiştir.

Arazi yükleme koşullarını temsil eden HYT yönteminin yanısıra ANSYS sonlu elemanlar programı kullanılarak modellemeler yapılmış, bu modellerden elde edilen sonuçlara göre güçlendirme elemanlarının geometrik boyutlarına karar verilmiş, uygun boyutlar belirlenerek kendi arasında karşılaştırılmış ve son olarak HYT ile sonlu eleman modelleri arasındaki sonuçlarda kıyaslanarak oluşturulan modellerin doğruluğu tartışılmıştır.

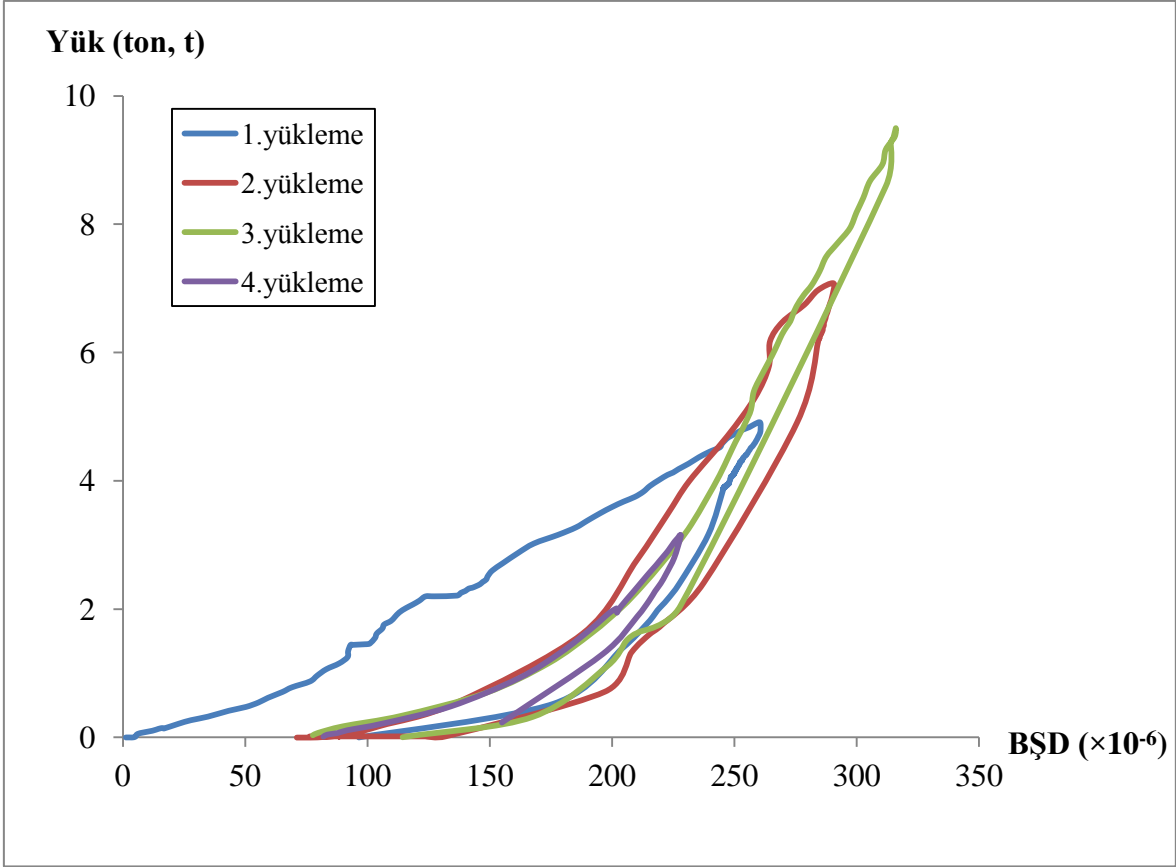
3.1. Birim Şekil Değişirme Ölçerlerin Tasarım Sürecindeki Verileri

Asfalt kaplamalarda meydana gelen BŞD değerlerinin ölçümü, bu çalışmanın en önemli adımlarından birini oluşturmaktadır. BŞD değerleri, farklı derz güçlendirme modellerinin aynı yükleme koşulları altındaki davranışının birbirlerine olan üstünlük ve

sakıncalarının belirlenebilmesi için kullanılmıştır. Ancak BŞD ölçerlerin ithal ediliyor olması büyük bir maddi külfet oluşturmaktadır. Çalışma kapsamında kullanılacak BŞD ölçer sayısı ve yüksek fiyat aralığı, bu cihazın KTÜ Ulaştırma Laboratuvarı'nda üretilme sürecini başlatmıştır. Bölüm 2.1.1'de üretim aşamaları detaylı olarak verilmiştir. Üretilen cihazların, literatürdeki asfalt kaplamalardan alınan veri aralığını yakalaması ve gerek tekrarlı trafik yüklerinden gerekse sıcaklık ve nem koşullarından en az etkilenmesi önemli bir başarı ölçütüdür. Bu bölümde, BŞD ölçerlerin tasarım sürecinde elde edilen verileri ve alınan verilerdeki güvenilirlik konusu tartışılacaktır. Asfalt kaplama sıcaklığına ve sıkıştırma etkisi altında parçalanıp dağılmaya karşı dayanıklı BŞD ölçer tasarımı yapıldıktan sonra KTÜ Ulaştırma Laboratuvarı'nda bazı testlerden geçirilmiştir. Bu testler kapsamında, öncelikle üretilen cihazın yerleştirildiği asfalt kaplama numunesi, 200 kN (20 ton) yük uygulama kapasitesine sahip plaka yükleme deney düzeneğine yerleştirilmiş ve sıkıştırma sırasında bozulmadan veri okuyabilme kapasitesi denenmiştir (Şekil 3.1). Asfalt kaplama numunesine maksimum değerleri farklı çevrimsel yüklemeler uygulanmış olup ölçülen yük-BŞD değişimi Şekil 3.2'de gösterilmektedir.



Şekil 3.1. Asfalt kaplama numunelerinin plaka yükleme deneyinde sıkıştırılması



Şekil 3.2. Plaka yükleme deney düzeneğinden elde edilen yük-BŞD eğrileri

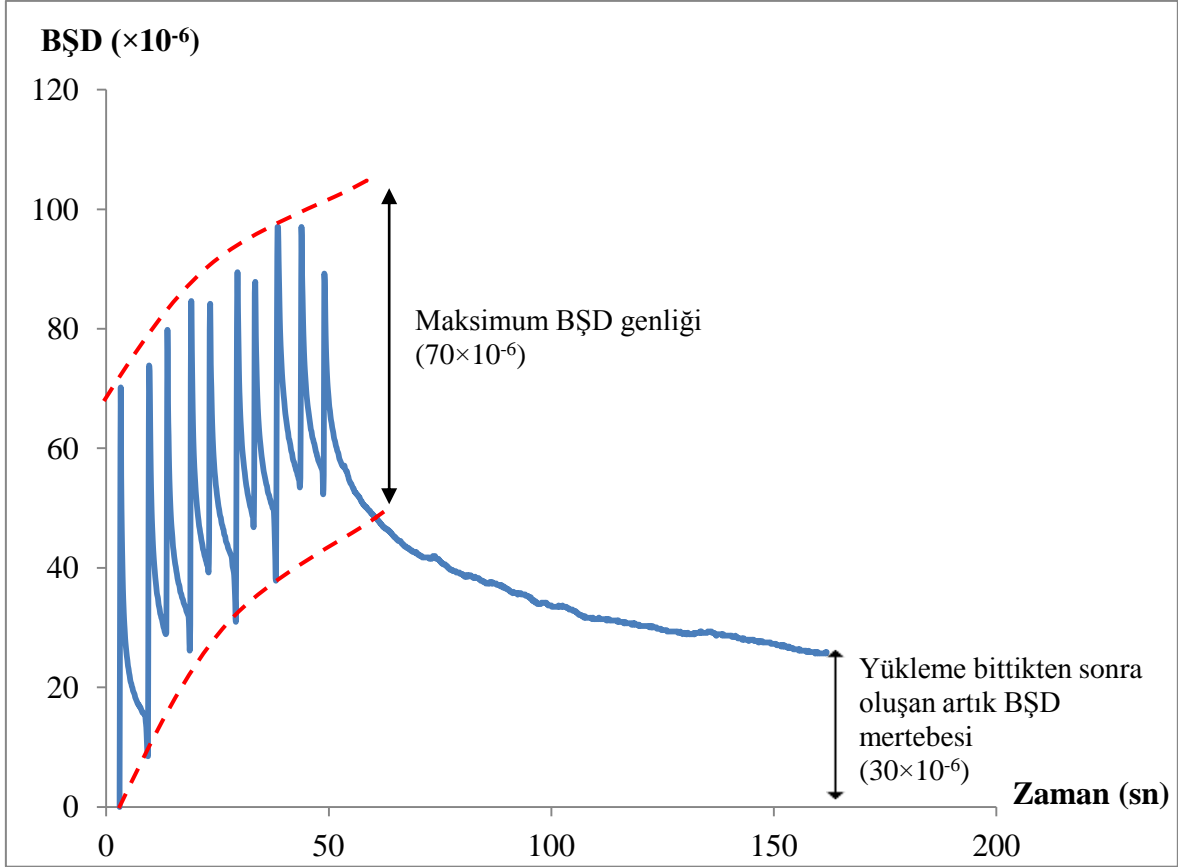
Plaka yükleme deney aleti altına yerleştirilen asfalt numunesi, sırasıyla 4.5, 7, 9.5 ve 3 t'a kadar çevrimsel yüklenmiştir. Şekil 3.2'den de görüleceği üzere, 1. yüklemede numunenin oldukça düşük bir tanjant rijitliğine sahip olduğu ancak diğer yükleme çevrimlerinde, asfalt numunesinin kararlı bir davranış sergilediği anlaşılmıştır. Diğer yükleme çevrimlerinde, 0-2 t arasındaki çevrimsel yükleme durumlarında yük-BŞD eğrilerinin tanjant rijitliğinin aynı olduğu görülmüş ve böylece numuneye yerleştirilen BŞD ölçerinin aynı yük mertebeleri altında birbirine çok yakın değerler okuduğu tespit edilmiştir. Grafik genel olarak değerlendirildiğinde, numunenin ilk çevrimsel yükten sonra BŞD değerinin sıfırlanması beklenmiş ancak asfaltın viskoelastoplastik bir davranış sergilemesinden kaynaklı olarak yaklaşık 90×10^{-6} mertebesinde artık plastik şekil değiştirme gözlemlenmiştir. Diğer yükleme adımlarında ise bu artık BŞD değerlerinin birbirine oldukça yakın olduğu ve malzemenin kararlı hale geçtiği anlaşılmıştır.

Asfalt numuneler farklı yük koşullarında test edildikten sonra net ağırlığı 1.5 t olan bir otomobil altına yerleştirilerek yeni bir test daha yapılmıştır. Numunenin altında süresiz herhangi bir bölge olmayacak şekilde beton kaplama üzerine yerleştirildikten

sonra aracın hareket yönüne göre numunenin başına ve sonuna rampalar yapılmış (Şekil 3.3) ve araç numunenin üzerinde ileri-geri hareket ettirilmiştir. Her bir geçişte alınan BŞD değerleri Şekil 3.4’te gösterilmektedir.



Şekil 3.3. Beton kaplama üzerindeki asfalt numunenin otomobil ile yüklenmesi



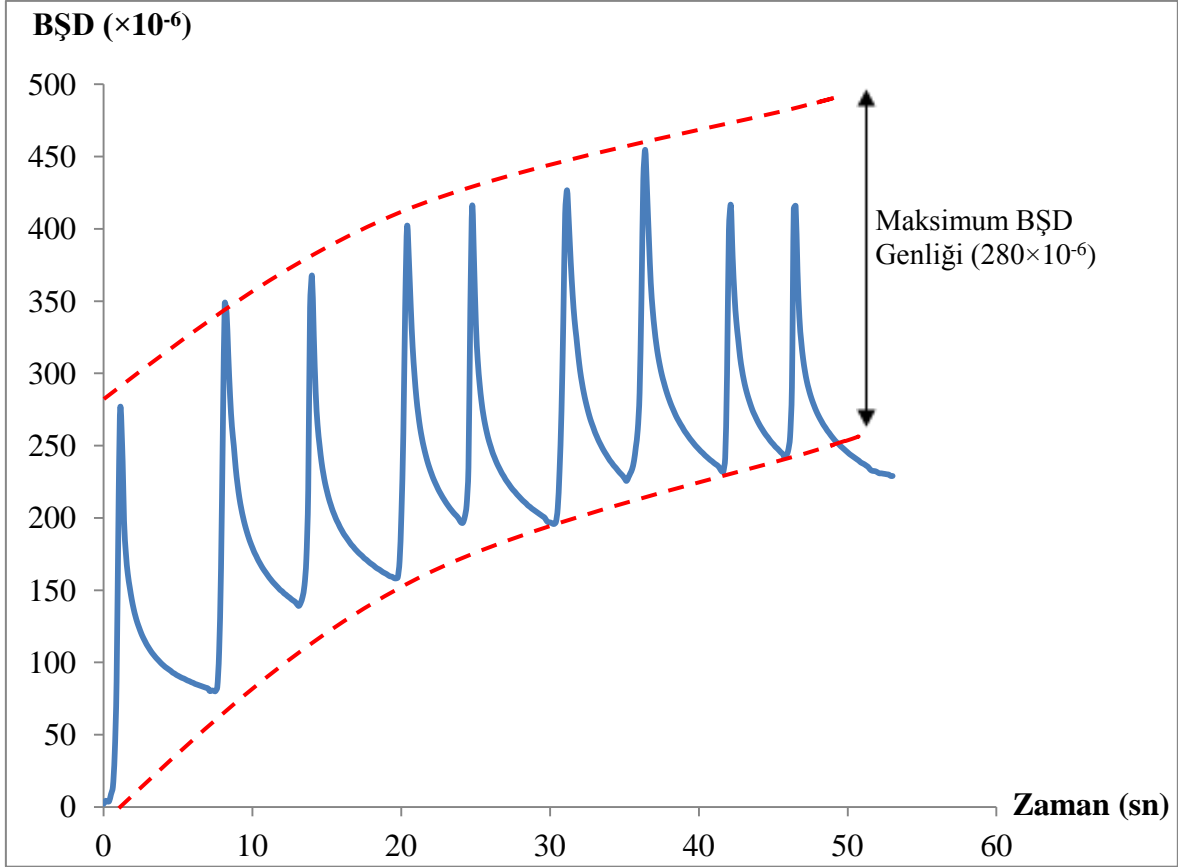
Şekil 3.4. Beton kaplama üzerine yerleştirilen asfalt numunenin otomobil geçişi sırasında oluşan BŞD değerleri

Şekil 3.4'teki asfalt numune içerisinde yerleştirilmiş boyuna doğrultudaki BŞD ölçerden alınan veriler, sabit yük mertebesi altında üretilmiştir. Asfalt numune, otomobilin geçiş hızına ve iki yükleme arasındaki bekleme süresine bağlı olarak maksimum 70×10^{-6} mertebelerinde BŞD'ye uğramıştır. Grafikte görüldüğü üzere, her bir geçiş sonrasında BŞD değeri sanki yükseliyormuş gibi algılanabilir ancak iki yükleme arasında geçen süre 5 saniyenin altında olduğu için oluşan ilk BŞD değeri tam geri dönüş sağlayamadan ikinci yükleme başlamış olup grafikteki yükselme eğiliminin asıl nedeni iki yükleme arasında geçen süredir. Grafikten çıkarılması gereken sonuç; maksimum BŞD genliği olan 70×10^{-6} mertebesidir. 10. yüklemeden sonra elde edilen değer yaklaşık 120 sn sonra değişmemiş ve 30×10^{-6} mertebelerinde artık BŞD değeri oluşmuştur. Elde edilen bu veriler hem literatürde yapılan çalışmaların sonuçlarına yakın çıkmış hem de asfalt numunelerin çevrimsel yüklemeler altında artık BŞD değeri oluşturduğunu bir kez daha göstermiştir. BŞD ölçer, bu testten de başarıyla geçmiş ve sabit yüklemeler altında okuduğu verilerin güvenilirliği kanıtlamıştır.

HYT tesisinde, BŞD ölçerler tam derzler üzerine yerleştirilecek ve süreksiz bir bölge üzerinde veri üretmeye çalışacaktır. Bu amaç doğrultusunda hazırlanan asfalt numune, bir önceki denemeden farklı olarak iki ahşap plak üzerine oturtulmuştur (Şekil 3.5). Ahşap plaklar arasında yaklaşık 20 mm açıklık bırakılarak asfalt numune içindeki BŞD ölçerin bu boşluğa denk gelmesine özen gösterilmiştir. Otomobil ile yükleme prosedürü aynıdır.



Şekil 3.5. Ahşap plaklar üzerindeki asfalt numunenin otomobil ile yüklenmesi



Şekil 3.6. Süreksiz beton kaplama üzerine yerleştirilen asfalt numunenin otomobil geçişi sırasında oluşan BŞD değerleri

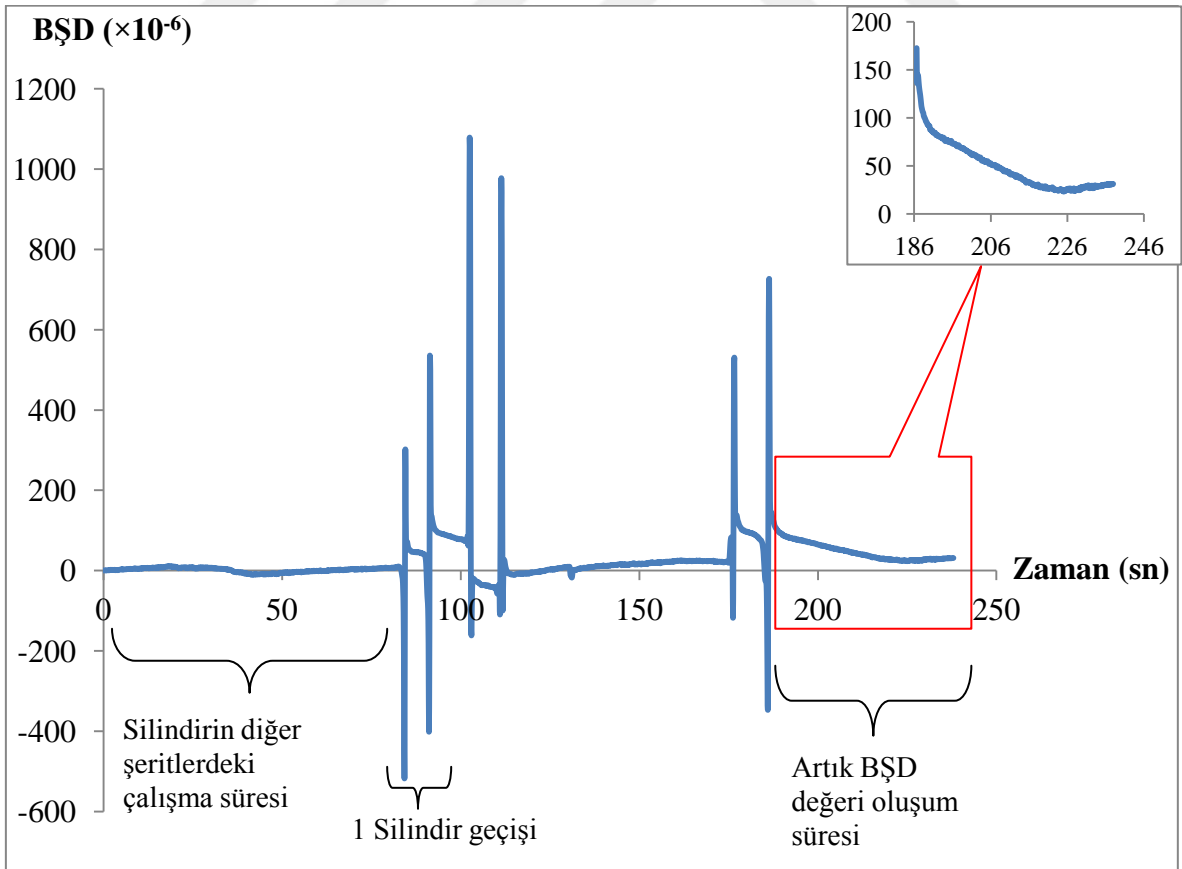
Şekil 3.6'da görüldüğü üzere ahşap plaklar üzerine yerleştirilen asfalt numune, otomobilin geçiş hızına ve iki yükleme arasındaki bekleme süresine bağlı olarak maksimum 280×10^{-6} mertebelerinde BŞD'ye uğramıştır. Bu test sonucunda, aynı yük mertebesi altında asfalt kaplamanın yerleştirildiği düzlemin sürekli ya da süreksiz olması arasında yaklaşık dört kat BŞD farkı olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca yapılan bu test, ölçüm aletinin süreksiz bölgelerde de sağlıklı bir biçimde veri alabildiğini göstermiştir.

KTÜ Ulaştırma Laboratuvarı'nda yapılan testler tamamlandıktan sonra, tasarımı tamamlanan BŞD ölçerler arazi koşullarında denenmiştir. Arazi denemeleri için Rize-Trabzon istikameti Devlet Sahil Yolu-Trabzon Havalimanı yol ayrımında yapılacak asfalt yenileme çalışmalarının olduğu alana gidilmiştir. Asfalt kaplamanın içine gidiş yönüne dik (enine) ve paralel (boyuna) doğrultuda olacak şekilde iki adet BŞD ölçer yerleştirilmiştir (Şekil 3.7).

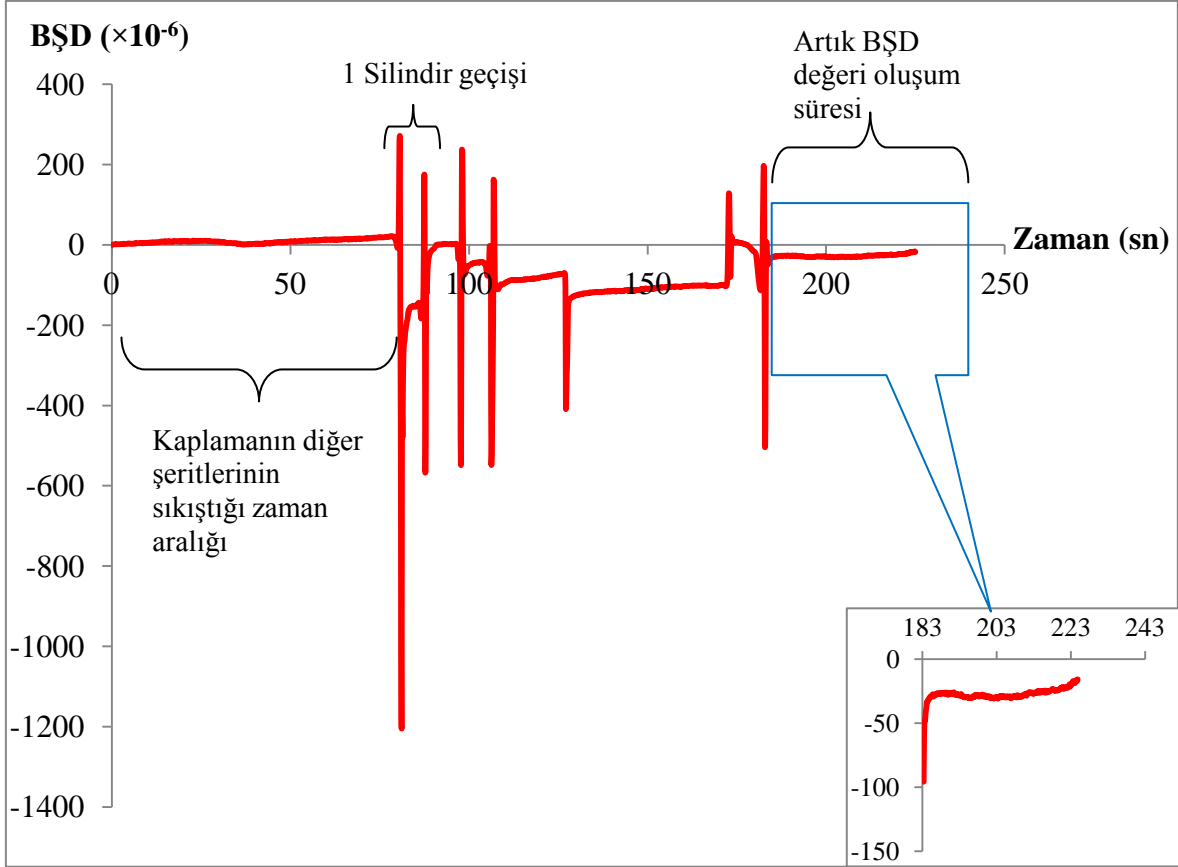


Şekil 3.7. Arazide BŞD ölçerlerin yerleştirilmesi

Asfalt kaplama serimi tamamlandıktan sonra çelik bandajlı silindirle sıkıştırılırken ilk veriler alınmaya başlamış olup Şekil 3.8 ve Şekil 3.9'da gösterilmektedir.



Şekil 3.8. Arazide silindirle sıkıştırma sırasında enine BŞD ölçerlerden okunan veriler

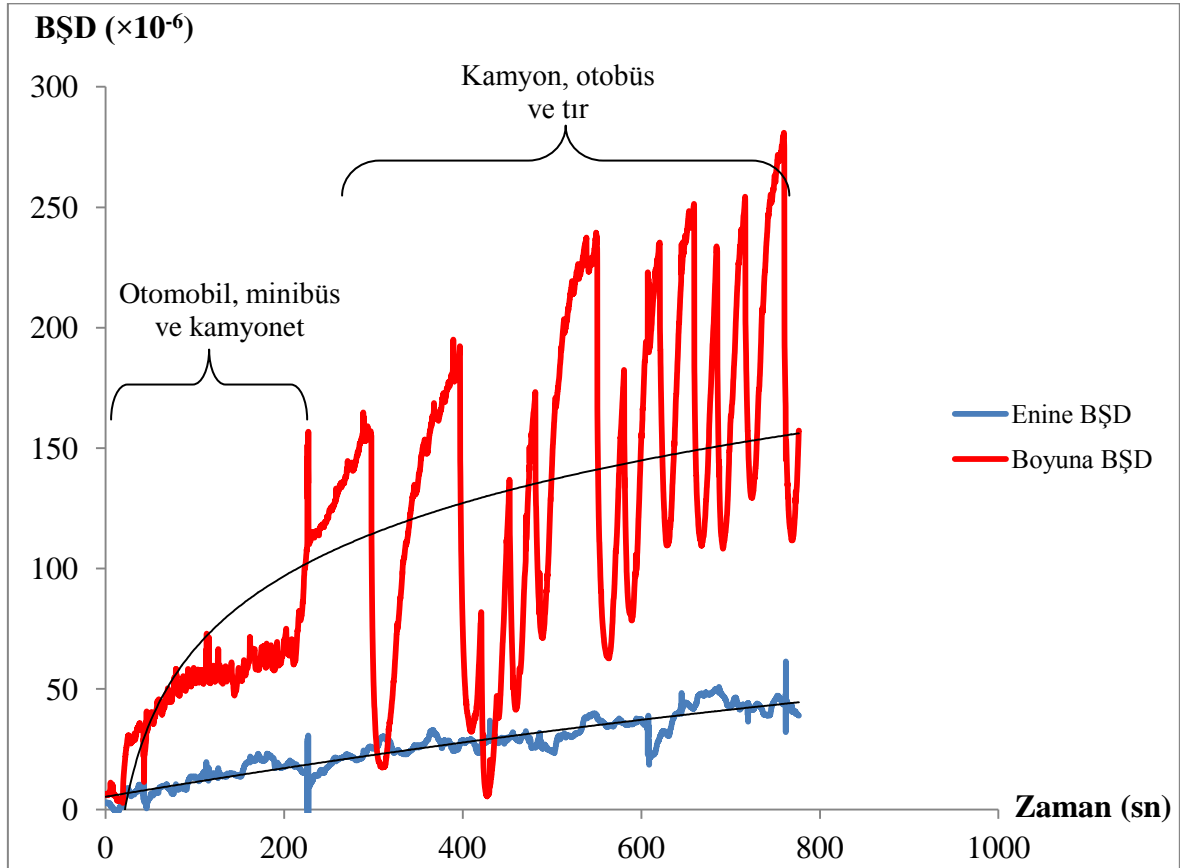


Şekil 3.9. Arazide silindirle sıkıştırma sırasında boyuna BŞD ölçerlerden okunan veriler

Arazi koşullarında BŞD ölçer testlerinin ilk verileri, silindirle sıkıştırma sırasında alınmıştır. Bu testin amacı, serilen asfalt kaplamanın yük altındaki BŞD davranışını belirlemekten öte BŞD ölçerlerin sıkışma sırasında zarar görüp görmediğinin tespit edilmesidir. Şekil 3.8 ve Şekil 3.9’da görüldüğü üzere her iki BŞD ölçer, silindir geçişi sırasında veri üretebilmiştir. Silindirin iki adet çelik bandaja sahip olması tek bir geçiş için iki ayrı veri alınmasını sağlamıştır. Silindir, BŞD ölçerlerin bulunduğu yerden geçtiğinde veri üretirken, diğer şeritleri sıkıştırma sırasında BŞD ölçerler bundan önemli ölçüde etkilenmemiştir. Bu durum, grafiklerde oluşacak muhtemel veri yığılmasının önüne geçmiştir. Bu sayede, alınan veriler daha rahat yorumlanabilmiştir. Sıkışma işlemi tamamlandıktan sonra BŞD değerleri, önceki testlerde olduğu gibi sıfırlanmamış ve artık değerler oluşmuştur. Değerlerin 200 ila 1,000×10⁻⁶ mertebelerinde çıkmasında, asfaltın sıcaklığının yüksek olmasının katkısı olduğu gibi sıkışma öncesi boşluk oranının tasarım boşluk oranından yüksek olmasının da etkisi vardır.

Arazide asfalt serimi tamamlandıktan sonra, BŞD ölçerlerin veri kabloları platform kenarında korumaya alınmış ve kaplamanın asıl davranışının belirlenebilmesi adına aynı

yerden ölçüm almak için 15 gün sonra tekrar gidilmiştir. Arazi deneyine gidilecek zaman için sıcaklık ve hava koşullarının benzer olmasına dikkat edilmiştir. Farklı türdeki araçların BŞD ölçerlerin üzerinden geçmesi için yol platformu daraltılmış ve veri toplanmaya başlanmıştır (Şekil 3.10).



Şekil 3.10. Arazide farklı türdeki araçların geçişi sırasında BŞD ölçerlerden okunan veriler

Bu test kapsamında BŞD ölçerler üzerinden 10-15 arasında araç geçişi olmuş ve her bir araç geçişinde başarılı ölçümler elde edilmiştir. Şekil 3.10'da görüldüğü üzere, boyuna doğrultuda yerleştirilen BŞD ölçerlerden alınan veriler, enine doğrultuda alınan verilerden daha büyüktür. Bu durum, literatürde yapılan çalışmalarla benzer niteliktedir (Al-Qadi vd., 2009). Araştırmacılar, boyuna BŞD değerinin daha yüksek ve kritik olmasını göz önünde bulundurarak çalışmalarında, boyuna BŞD değer ölçümleri yapmışlardır (Williamson, 2015; Perez vd., 2006; Al-Qadi vd., 2009 ve Perez vd., 2006). Bu çalışmalardan alınan ölçümlerin değer aralığı, Şekil 3.10'da gösterilen boyuna BŞD değerleriyle paralellik göstermektedir. Özellikle boyuna BŞD genlik değerlerinin yüksek olanları kamyon, otobüs

ve tır geçişlerinde, küçük genlikli BŞD değerleri ise kamyonet, otomobil ve minibüs gibi araçların geçişi sırasında elde edilmiştir. Birim zamanda BŞD ölçerler üzerinden geçen araç sayısı arttıkça, ölçülen değerlerin parabolik artışı devam etmektedir. Asfalt kaplama, herhangi bir araç geçişi sırasında oluşan BŞD değerini yüklemeye öncesi durumuna çeviremeden yeni bir araç geçince, bu araçtan ötürü oluşan BŞD değeri eski değer üstünden devam etmektedir. Asfalt kaplamalarda oluşan bu artık BŞD değerlerinin, erken bozulmalara neden olan kayma deformasyonları oluşturduğu bilinmektedir (Al-Qadi vd., 2009).

3.2. Beton Kaplamalardan Alınan Ölçümler

HYT tesisindeki beton kaplamalar üzerinde yapılan çalışmalar; mevcut beton kaplamanın basınç dayanımının belirlenmesiyle başlamış, test aracı kaplamaya 0.8 MPa basınç uygulayacak şekilde ayarlanmış, doğu ve batı şeritlerinden 25,000'er kez geçiş yapılmış, başlangıçta ve bitişte beton kaplamaların düşey deplasman ölçümlerinin alınmasıyla tamamlanmıştır. Beton kaplamaların serimi sırasında alınan küp numuneler (Şekil 3.11), 7 ve 28 gün kür havuzunda bekletildikten sonra basınç dayanım ölçümleri için kırılmıştır (Şekil 3.12). Numuneler kırılırken oluşan basınç dayanımı-zaman ilişkisi Şekil 3.13'de, sonuçlar Tablo 3.1'de gösterilmektedir. 28 gün sonunda ortalama basınç dayanımı 25.4 MPa olarak bulunmuştur.



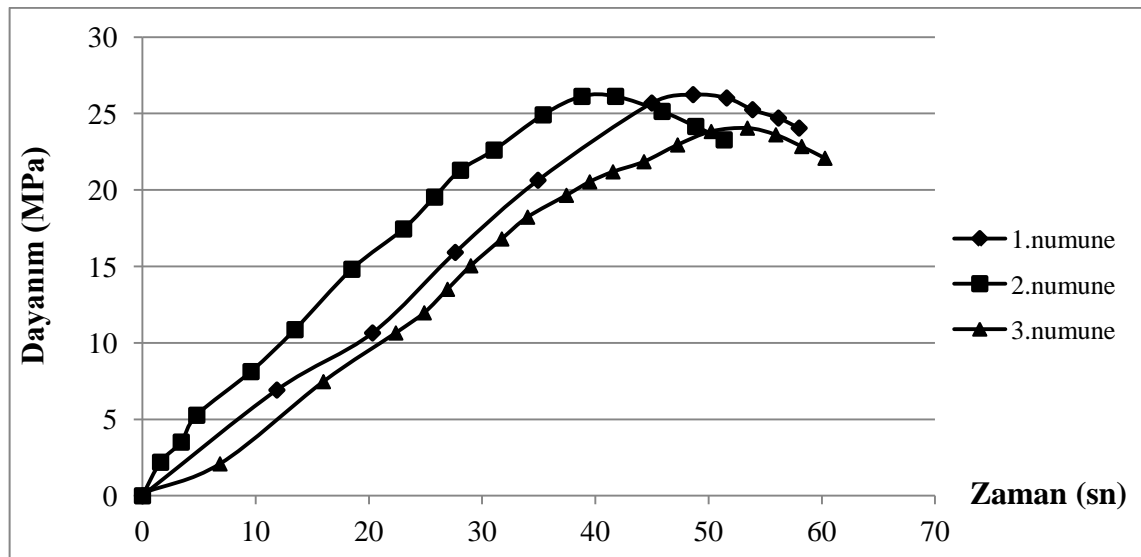
Şekil 3.11. Betondan alınan küp numuneler



Şekil 3.12. Küp numunelerin kırılması

Tablo 3.1. Beton yol plaklarından alınan numunelerin 7 ve 28 günlük basınç dayanımları

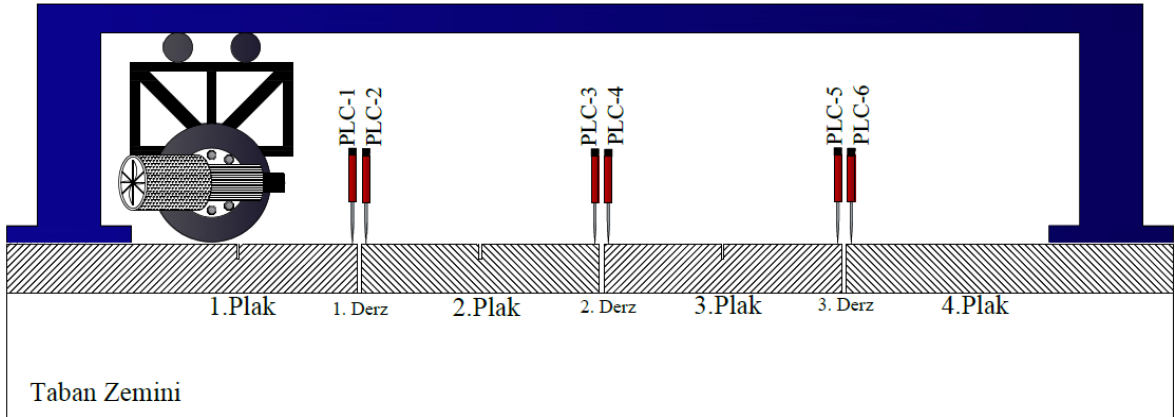
Küp (150×150×x150)	Beton Dayanımı (MPa)	
	7 Gün	28 Gün
1. numune	18.9	26.02
2. numune	21.3	26.12
3. numune	16.3	24.05
Ortalama	18.83	25.40



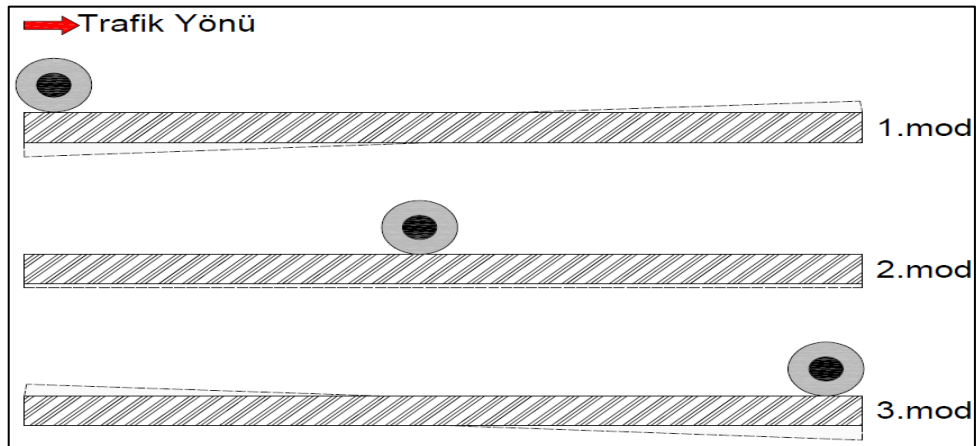
Şekil 3.13. Beton basınç dayanım testinde elde edilen sonuçlar

3.2.1. Düşey Deplasman Ölçümleri

Deplasman ölçümlerinin takibi doğu ve batı şeritleri için ayrı ayrı yapılmıştır. Her bir derzde 2'şer adet potansiyometrik lineer cetvel (PLC) bulunmakta olup bir şeritte toplam 6 adet yerleştirilmiştir (Şekil 3.14). PLC'ler milimetrenin yüzde biri hassasiyetinde çalışmakta olup, beton kaplamaların çökmesi durumunda negatif (-) değer, yükselmesi durumunda pozitif (+) değerler üretecek şekilde kalibre edilmiştir. HYT test aracı, beton kaplamaların başlangıcındayken (1. mod) derz kısmı yukarı doğru hareket ederek pozitif değer üretirken, kaplama ortasına doğru ilerledikçe (2. mod) bütün plakta çökmeye neden olmakta ve derz üstünden geçerken (3. mod) PLC ölçümleri negatif değerlere dönüşmektedir (Şekil 3.15). Batı şeridinden alınan ölçüm grafikleri Tablo 3.2'de, doğu şeridinden alınan ölçüm grafikleri Tablo 3.3'te verilmektedir.



Şekil 3.14. HYT tesisinde PLC ölçüm aletlerinin yerleşimi

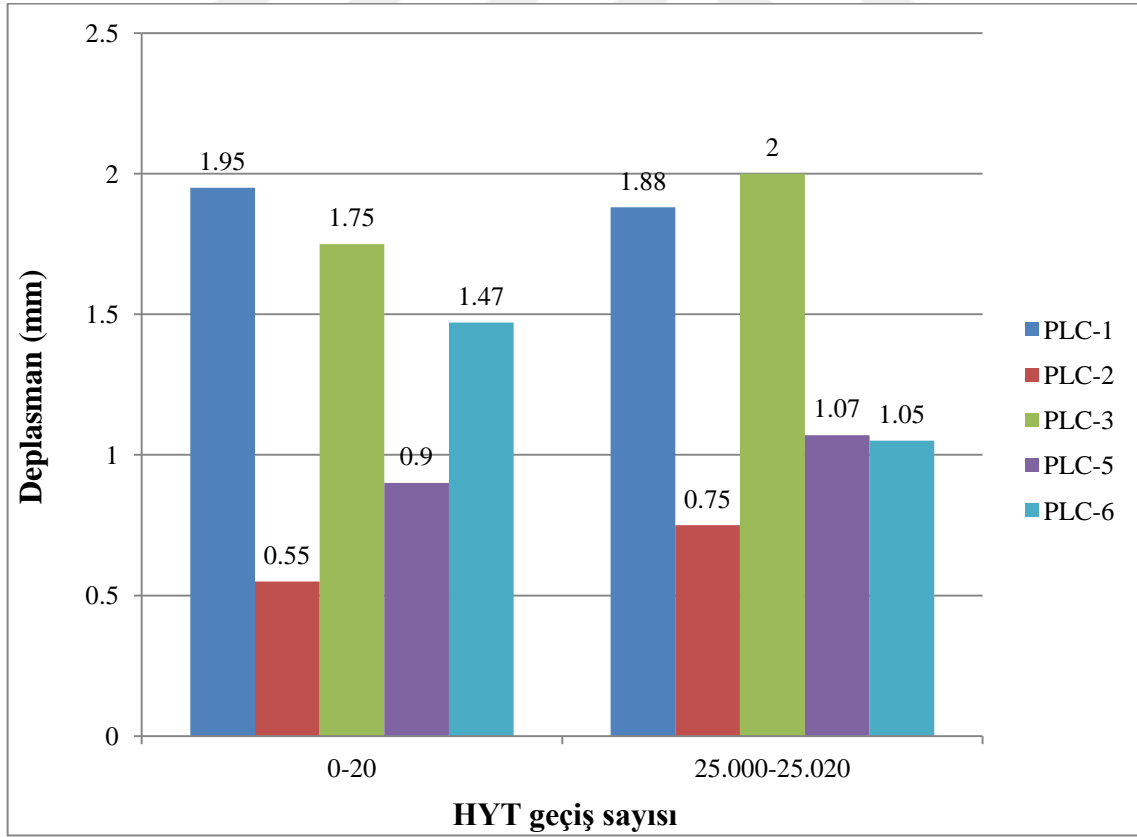


Şekil 3.15. Beton kaplamaların yüklenmesi durumunda oluşan deplasman modları

Tablo 3.2. Batı şeridinde beton kaplamasının deplasman grafikleri

	0-20 geçiş	25,000-25,020 geçiş
PLC-1		
PLC-2		
PLC-3		
PLC-4		
PLC-5		
PLC-6		

Tablo 3.2’de batı şeridinin derz bölgelerindeki düşey deplasman hareketleri verilmiştir. PLC-1 ve PLC-6 ölçüm aletlerinin (0-20 geçiş) verileri sadece negatif yönlüdür. Bunun nedeni, plakların uç kısımlarında HYT test aracının dış tekerleklerinin bulunması ve 1.modda hareket etmesidir. Dış tekerlekler bu kısımlarda mesnet gibi davranarak beton kaplamanın yukarı doğru kalkmasını önlemiştir. PLC-4 dışındaki diğer ara ölçüm aletleri ise negatif ve pozitif değerler üreterek kaplamanın 1, 2 ve 3. modlara uğradığını göstermektedir. 25,000 geçiş sonrasında yapılan ölçümlerde, ara plakların deplasman genliklerinin (çökme+kabarmama) arttığı, başlangıç ve bitiş plaklarında azaldığı tespit edilmiştir. Başlangıç deneyleri ile bitiş deneyleri arasında toplam genlik hareketinde %14-%36 arasında artış gerçekleşmiştir (Şekil 3.16). Beton kaplamanın bu şeridinde 25,000 geçiş sonrasında kaplama altındaki zemin, serbest plakların derz bölgelerinde gittikçe oyularak toplam deplasman genliğini artırdığı düşünülmektedir. Bu ilerleme, beton kaplamaların tekrarlı trafik yükleri altında deplasman hareketinin artması olup, beton kaplamalarda oluşan faylanma hareketinin oluşum mekanizması olarak açıklanabilir.

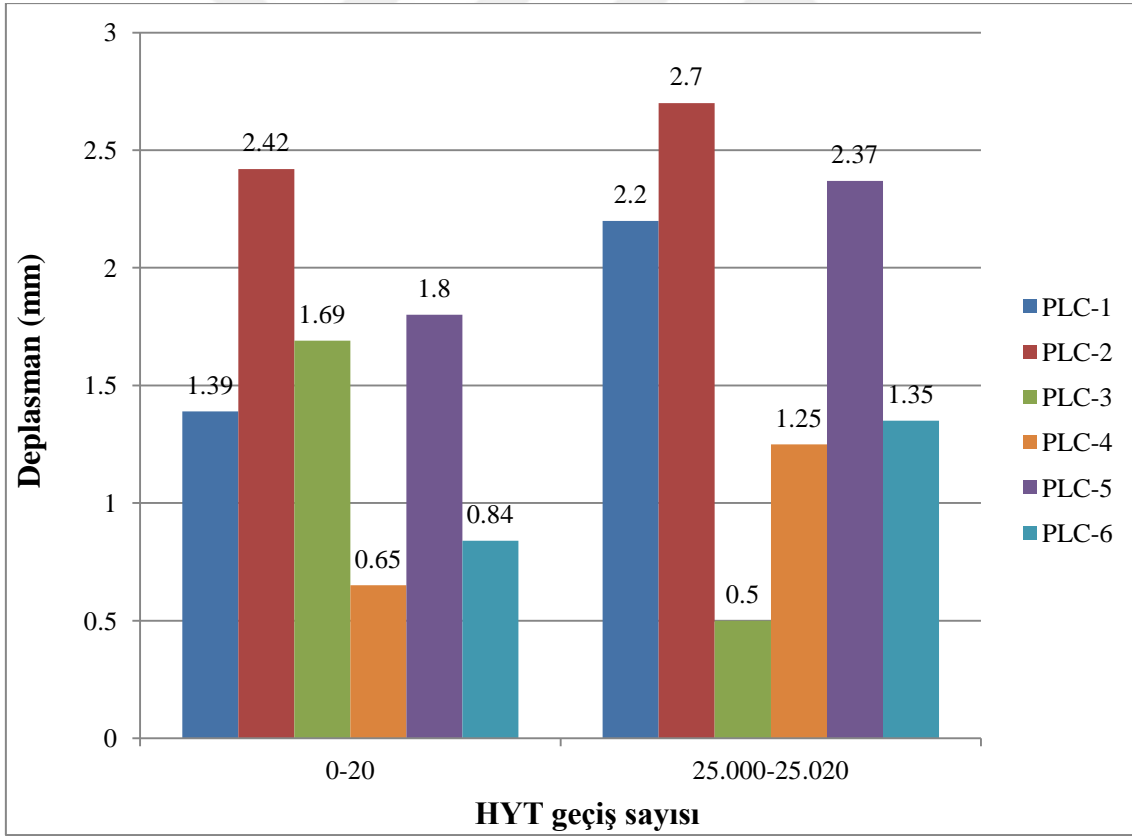


Şekil 3.16. Batı şeridinde beton kaplama deplasman genliklerinin kıyaslanması

Tablo 3.3. Doğu şeridinde beton kaplamasının deplasman grafikleri

	0-20 geçiş	25000-25020 geçiş
PLC-1		
PLC-2		
PLC-3		
PLC-4		
PLC-5		
PLC-6		

Tablo 3.3'te doğu şeridinin derz bölgelerindeki düşey deplasman hareketleri verilmiştir. PLC-1 ve PLC-6 ölçüm aletleri batı şeridinde ki gibi ağırlıklı olarak negatif yönlüdür. 25,000 geçiş sonrasında yapılan ölçümlerde, tüm plakların deplasman genliklerinin (çökme+kabarmama) arttığı tespit edilmiştir. Başlangıç deneyleri ile bitiş deneyleri arasında toplam genlik hareketinde %11-%92 arasında artış gerçekleşmiştir (Şekil 3.17). Beton kaplamanın bu şeridinde 25,000 geçiş sonrasında kaplama altındaki zeminin batı şeridine göre yaklaşık 2 kat oyularak toplam deplasman genliğini artırdığı gözlemlenmiştir. HYT tesisi genel durumu itibariyle, tesisi içindeki su tesisatı yüzünden doğu tarafında daha fazla suya maruz kalmaktadır. Şeritler arasındaki deplasman farkının bu denli yüksek olmasında taban zemininin nem durumunun etkisinin olduğu düşünülmektedir. Öyle ki, doğu şeridinde su ile temasa geçen taban zemini yüklemeler altında daha fazla deformasyona uğramaktadır.



Şekil 3.17. Doğu şeridinde beton kaplama deplasman genliklerinin kıyaslanması

3.3. Asfalt Kaplamalardan Alınan Ölçümler

HYT tesisindeki asfalt kaplamalar üzerinde yapılan çalışmalar kapsamında; doğu ve batı şeridi için ayrı ayrı 100,000 geçiş (1,192,000 ESAL) uygulanmıştır. Asfalt kaplamaya yerleştirilen basınç ölçerlerden alınan verilerle geçiş sayıları arasındaki ilişki belirlenmiş, tekerlek izi oluşumları takip edilmiş, asfalt kaplama serimi sonrasında beton plakların deplasman hareketleri takip edilmiş, asfalt kaplamada oluşan BŞD mertebeleri incelenmiş, derzlerde oluşan yansıma çatlaklarının ilerlemesiyle geçiş sayısı ilişkisi kurulmuştur.

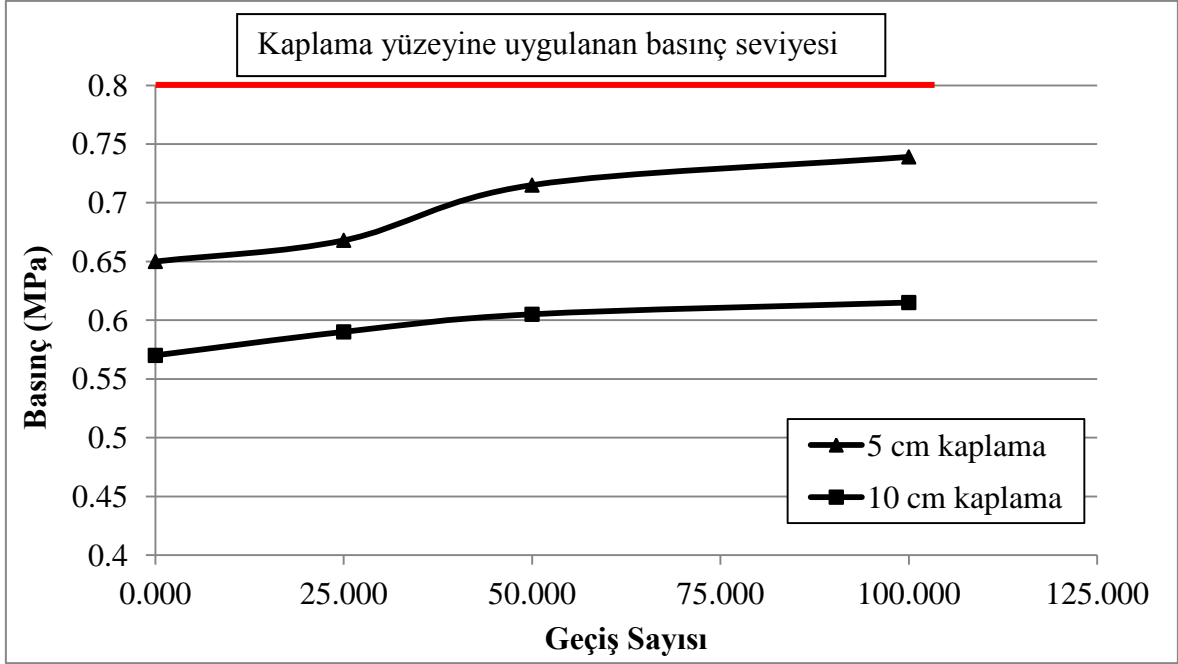
3.3.1. Basınç Ölçerlerden Alınan Veriler

HYT tesisinde doğu şeridi 100 mm kalınlıkta, batı şeridi ise 50 mm kalınlıkta asfalt ile kaplanmıştır. Asfalt kaplama ile beton kaplama arasına, test aracının iki tekerleğinin de altına gelecek şekilde iki adet basınç ölçer yerleştirilmiştir. Deneyler sırasında bu basınç ölçerlerden veri alınarak her iki tekerinde asfalt kaplamaya uyguladığı basınç dağılımı takip edilmiştir. Ayrıca doğu ve batı şeridi için asfalt kaplama yüzeyine uygulanan basınç takip edilerek, kaplama kalınlığı ile basınç dağılımı arasındaki ilişki belirlenmeye çalışılmıştır.

Asfalt kaplama yüzeyine uygulanan basınç ve kaplama kalınlığı boyunca oluşan basınç değerleri Tablo 3.4'te gösterilmektedir. Şekil 3.18'de asfalt kaplama kalınlığı, geçiş sayısı ve basınç değerlerinin grafik hali verilmiştir.

Tablo 3.4. Asfalt kaplamalar altında oluşan basınç değişimleri

Asfalt kaplama kalınlığı	Yüzeye uygulanan basınç (MPa)	Asfalt ile beton kaplama arasında okunan basınç değerleri (MPa)			
		Başlangıç	25,000 geçiş	50,000 geçiş	100,000 geçiş
50 mm	0.8	0.65	0.668	0.715	0.739
100 mm	0.8	0.57	0.59	0.605	0.615



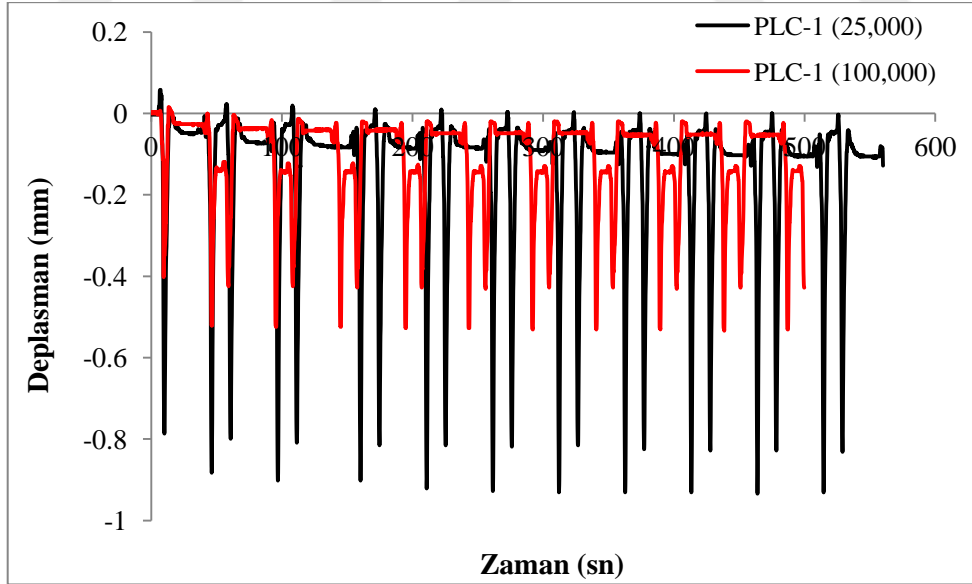
Şekil 3.18. Asfalt kaplamalarda oluşan basınç değişimi-geçiş sayısı ilişkisi

Tablo 3.4 ve Şekil 3.18'deki ölçüm sonuçlarına göre; yüzeye uygulanan basınç, kaplama kalınlığı boyunca tabana doğru yayılarak ilerlemektedir. Doğu şeridindeki 50 mm'lik asfalt kaplamanın, yüklemeler başlamadan önce kaplama altına yerleştirilen basınç ölçerlerden alınan basınç değerlerini %28.75 oranında, batı şeridindeki 100 mm'lik asfalt kaplamanın ise %18.75 oranında azalttığını göstermektedir. Yüklemeler başladıktan sonra kaplama altından alınan basınç ölçümleri, kaplamada oluşan tekerlek izinin de etkisiyle artmaya başlamıştır. Boussinesq'e (1885) göre, yüzey yüklemesinden oluşacak düşey gerilme artışlarının, yüzeye yaklaştıkça arttığı bilinen bir gerçektir. Yüklemeler tamamlandıktan sonra oluşan artış oranları, batı şeridi için %13.7 seviyelerindeyken, doğu şeridi için %7.9 seviyesindedir. Oluşan bu farklılığın nedeni; batı şeridinde oluşan tekerlek izinin doğu şeridine göre yüksek olmasıdır. Dolayısıyla uygulanan yüzey basıncı ile basınç ölçer arasındaki düşey mesafe azaldığından, Boussinesq teoremine de uygun olarak daha yüksek değerler okunmuştur. Yüklemeler başlamadan önce, doğu şeridinde bulunan yaklaşık 6 mm kalınlığındaki basınç ölçerin üzerindeki net asfalt kaplama kalınlığı 44 mm iken, batı şeridinde bu değer yaklaşık 94 mm'dir. Ancak yüklemeler tamamlandıktan sonra, batı şeridinde oluşan tekerlek izi derinliği, doğu şeridine kıyasla daha yüksektir. Yapılan bu ölçümler sonucunda, basınç ölçerler üzerindeki net asfalt kaplama kalınlığının, yüzeye uygulanan basıncın dağılmasında önemli bir etkisinin olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

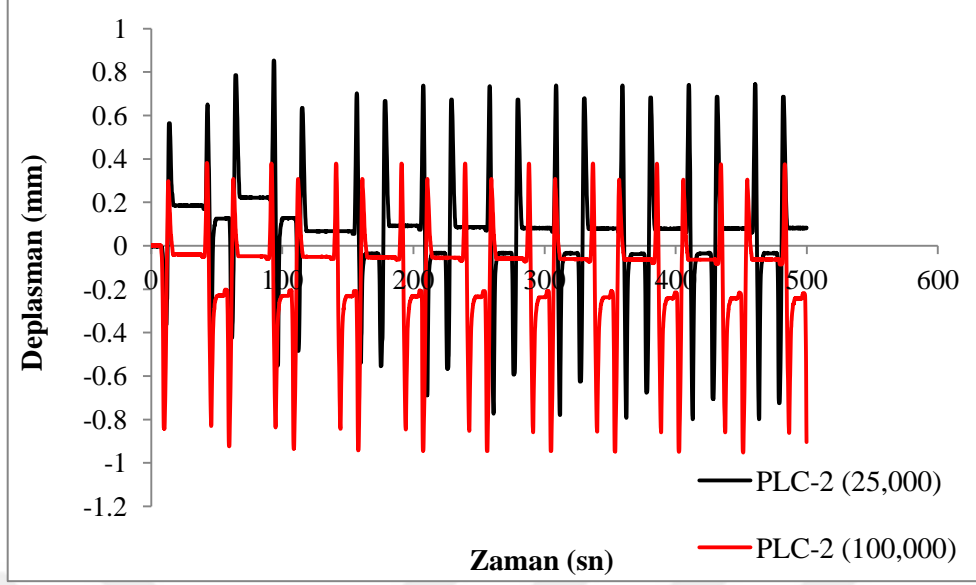
Ayrıca Şekil 3.18 incelendiğinde, geçiş sayısı arttıkça her iki şeritte okunan basınç değerinin artmasının yanı sıra 50,000 geçiş sonrasında basınç eğrisinin asimptota yaklaşarak önemli bir değişikliğe uğramadığı görülmüştür. Bu durum, asfalt kaplamada oluşan tekerlek izi değişiminin ve dolayısıyla basınç ölçerler üzerindeki net asfalt kalınlığının 50,000 geçişinden sonra değişmediğinin bir göstergesidir. Tekerlek izi değişimi, Bölüm 3.3.3'te ayrıca ele alınacaktır.

3.3.2. Düşey Deplasman Ölçümleri

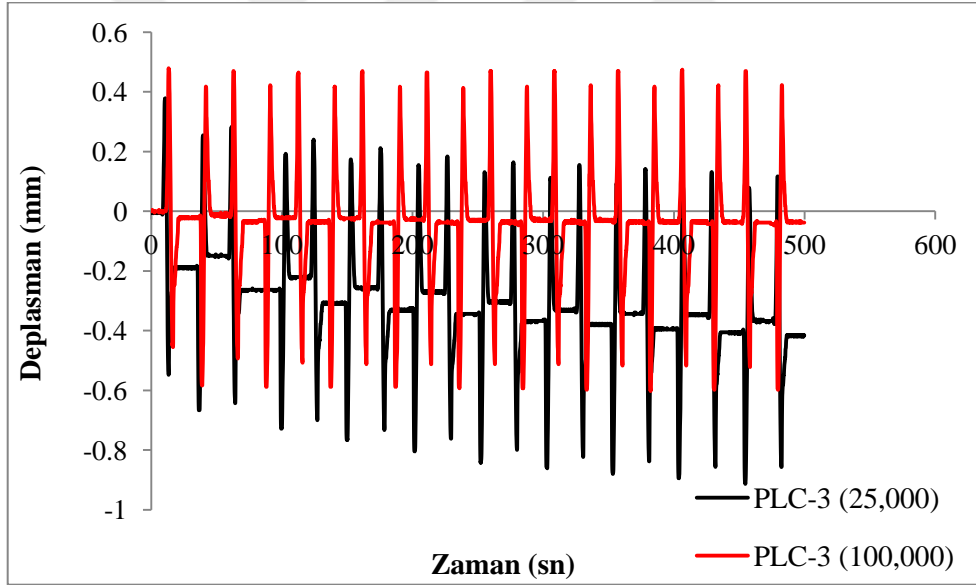
doğu ve batı şeritlerinde bulunan beton üstüne asfalt kaplamalar serildikten sonra 100,000 geçiş boyunca beton kaplamanın düşey deplasman değişimleri takip edilmiştir. bu deneylerin yapılmasındaki amaç, asfalt kalınlığının beton kaplama hareketine olan etkisini incelemek ve beton kaplamaların düşey deplasman hareketlerinin yansıma çatlağı oluşum sürecindeki etkisini belirlemektir. Ölçüm alma metodu, asfalt kaplama serilmeden önceki süreçle aynıdır. Batı şeridinden alınan ölçüm grafikleri Şekil 3.19-3.24'te verilmektedir.



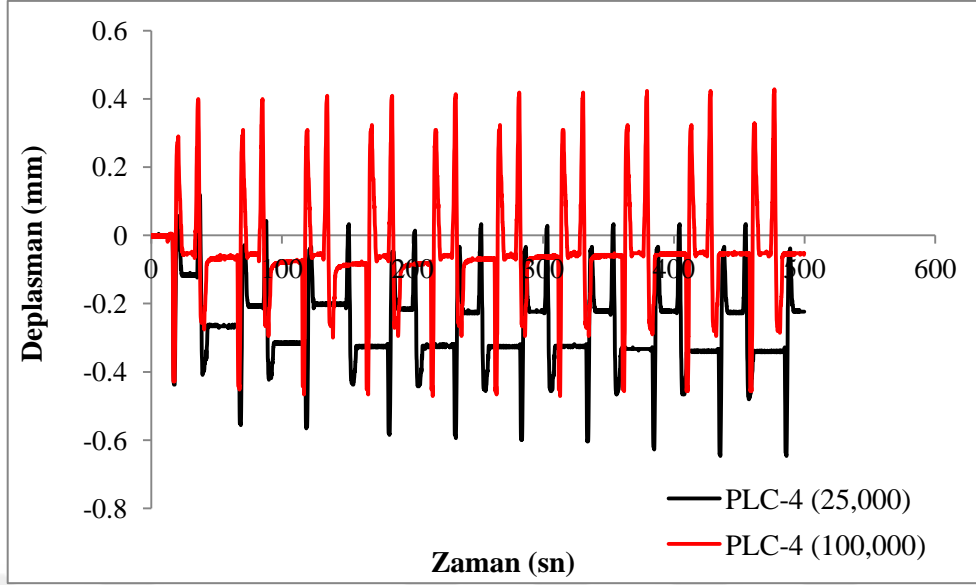
Şekil 3.19. Batı şeridinde asfalt kaplama serimi sonrasında PLC-1 verileri



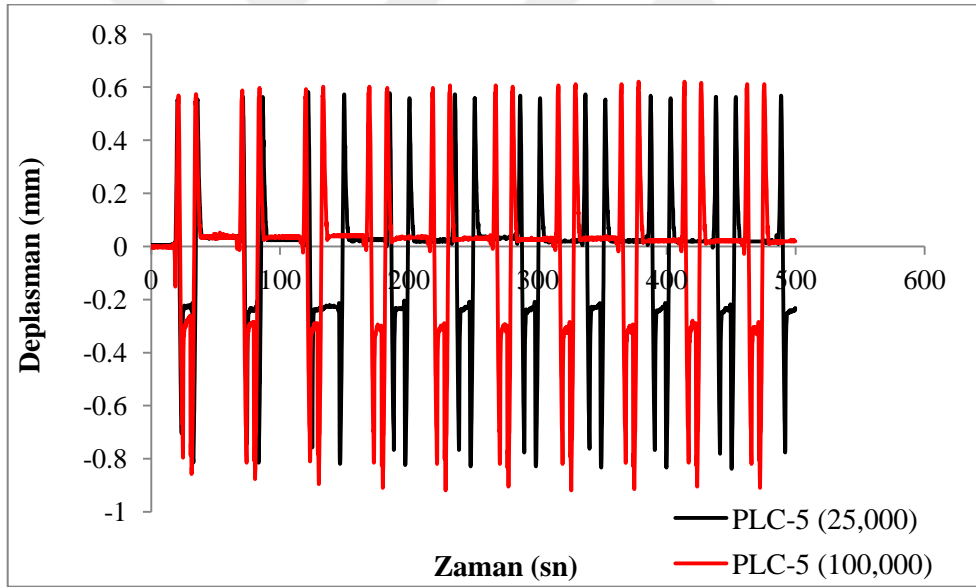
Şekil 3.20. Batı şeridinde asfalt kaplama serimi sonrasında PLC-2 verileri



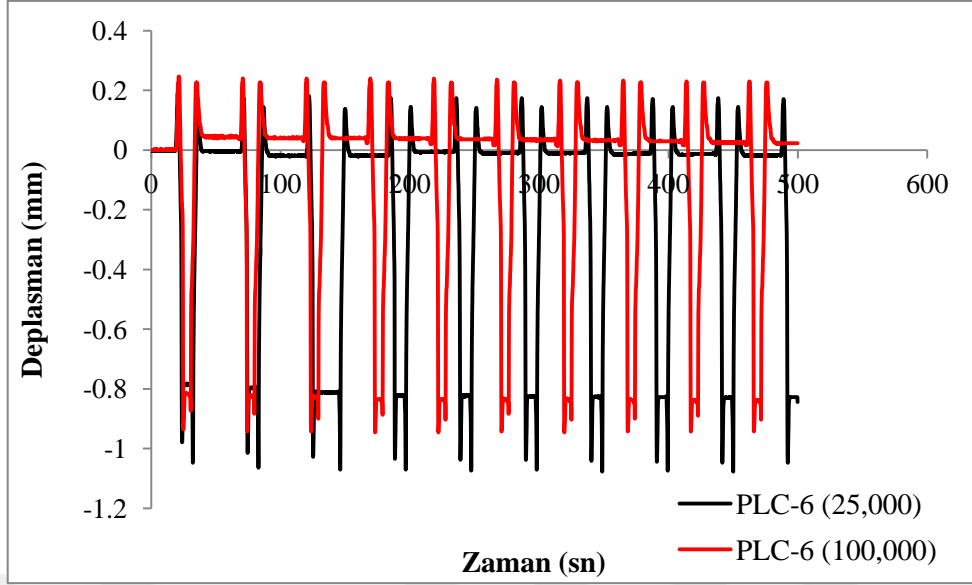
Şekil 3.21. Batı şeridinde asfalt kaplama serimi sonrasında PLC-3 verileri



Şekil 3.22. Batı şeridinde asfalt kaplama serimi sonrasında PLC-4 verileri

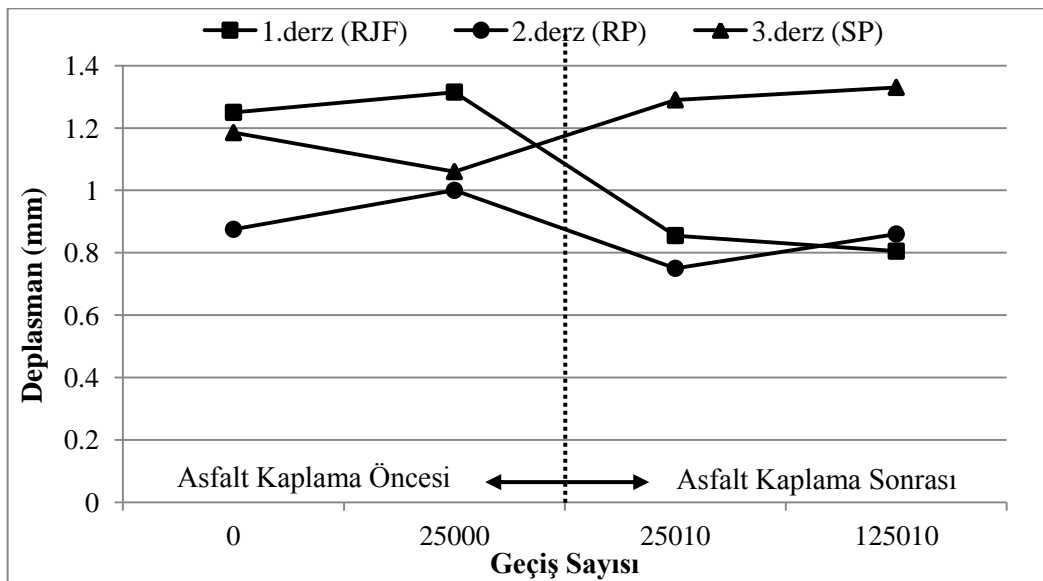


Şekil 3.23. Batı şeridinde asfalt kaplama serimi sonrasında PLC-5 verileri



Şekil 3.24. Batı şeridinde asfalt kaplama serimi sonrasında PLC-6 verileri

Batı şeridindeki beton kaplama derzleri, farklı güçlendirme malzemeleriyle desteklenip, üzeri 50 mm asfalt ile kaplanılmıştır. Daha sonra PLC-1 ve PLC-2 ölçüm aletleri 1. derzde (RJF), PLC-3 ve PLC-4 2. derzde (RP) ve son olarak PLC-5 ve PLC-6 3. derzde (SP) ölçüm olarak beton plakların deplasman mertebelerini belirlemede kullanılmıştır. Şekil 3.25'te tüm yüklemeler boyunca batı şeridindeki beton plak hareketinin değişim grafiği verilmektedir.



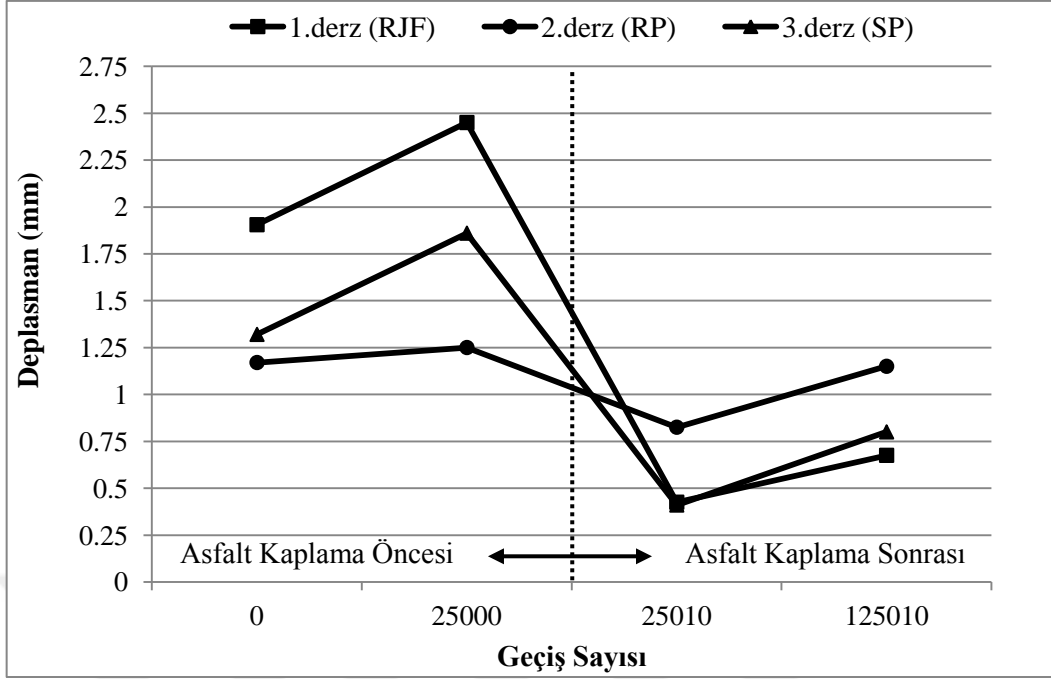
Şekil 3.25. Batı şeridinde asfalt kaplama serimi sonrasında beton plak hareketlerinin yüklemelere göre değişimi

Batı şeridinde asfalt sonrası 100,000 geçiş uygulandığında oluşan beton plak hareketliliği incelendiğinde, geçiş sayısı arttıkça 2. ve 3. derzlerde toplam deplasman genliğinin arttığı görülmüştür. Artış oranları 2. derzde %7.3 iken, 3. derzde %3.1 civarında gerçekleşmiştir. 3. derzde artış oranı az olsa da toplam deplasman genliği yaklaşık 1.3 mm olup, en fazla beton plak hareketliliği bu derzde oluşmuştur. 1. derzde ise yüklemeler arttıkça toplam deplasman genliği %5.8 oranında azalmıştır. Bu değişim oranları, 50 mm asfalt kalınlığı altında RP ve SP ile güçlendirilen derzlerde beton plak deplasman mertebesinin azaltılmadığını ancak RJF ile güçlendirilen derzde azaltılabildiğini göstermektedir. Asfalt kaplama serilmesinin etkisi incelendiğinde, 50 mm kalınlığın kullanılması, RP ve RJF kullanılan derzlerde beton plak hareketliliğini sırasıyla %25 ve %35 oranlarında azaltmasına rağmen SP kullanılan derzde azaltmak yerine %21 oranında artırmıştır. Tüm bu bilgiler ışığında, 50 mm kalınlığında asfalt kaplama serilmesinin beton kaplama derzlerindeki düşey deplasmanları kısıtlayabilmesi için uygun derz güçlendirme yönteminin kullanılmasının önemli olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca derz güçlendirme malzemelerinden RJF'nin, 1. ve 2. beton plağı birbirine iyice bağlayarak yük aktarım verimliliğini artırdığı tespit edilmiştir. RP güçlendirme malzemesi de plaklar arasındaki yük aktarım verimliliğine katkı sağlamış ancak SP güçlendirme malzemesi, katkı sağlamadığı gibi üzerindeki asfalt kaplamanın betona yapışmasını da engelleyerek yük aktarma verimliliğini azaltmıştır.

Asfalt kaplama serildikten sonra doğu şeridinden alınan başlangıç (0-10 geçiş) ve bitiş (100,000-100,010) ölçüm grafikleri Tablo 3.5'te verilmiş olup, bu grafiklere göre 100 mm kalınlığındaki asfalt kaplamanın beton plak hareketine etkisi incelenmiştir.

Tablo 3.5. Doğu şeridinde 100 mm asfalt serimi sonrasında düşey deplasman verileri

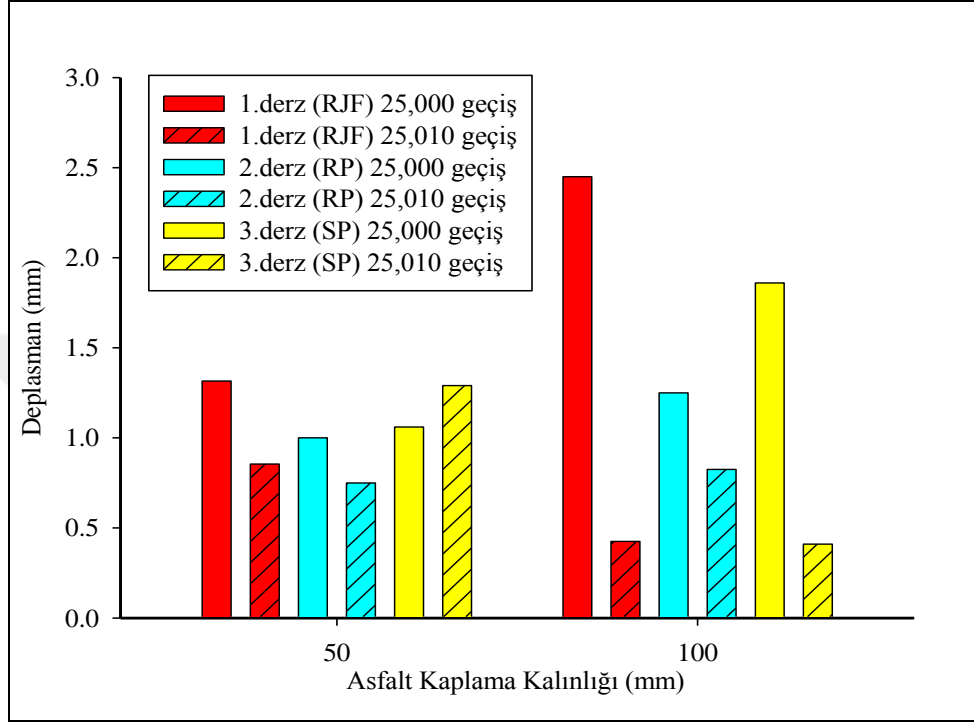
	0-10 geçiş	100,000-100,010 geçiş
PLC-1		
PLC-2		
PLC-3		
PLC-4		
PLC-5		
PLC-6		



Şekil 3.26. Doğu şeridinde asfalt kaplama serimi sonrasında beton plak hareketlerinin yüklemelere göre değişimi

Doğu şeridinde asfalt sonrası 100,000 geçiş uygulandığında oluşan beton plak hareketliliği incelendiğinde, Şekil 3.26'da görüldüğü üzere geçiş sayısı arttıkça bütün derzlerde toplam deplasman genliğinin arttığı görülmüştür. Artış oranları 1. derzde %42.1 iken, 2. derzde %39 ve 3. derzde %95.1 civarında gerçekleşmiştir. 100,000 geçiş sonrasında toplam deplasman genlikleri açısından en düşük deplasman 0.675 mm ile 1. derzde olmasına rağmen artış oranları bakımından en yüksek oran 3. derzde oluşmuştur. En yüksek toplam deplasman genliği ise 1.15 mm ile 2. derzde oluşmuştur. Bu bilgiler ışığında; 100 mm kalınlığında asfalt uygulanmasının, derzlerdeki düşey deplasman genliğini önemli ölçüde azalttığı anlaşılmıştır. 100 mm asfalt kaplama kalınlığı ve derz güçlendirmeleri yapıldıktan sonra 25,000 ve 25,010 geçişler arasında kıyaslama yapılmıştır. 1. derzde toplam deplasman genliği 2.45 mm'den 0.425 mm'ye düşerek yaklaşık %82 azalmış, 2. derzde bu oran yaklaşık 1.5 kat olup, 3. derzde 4.5 kat civarındadır. Bu oranlar, RJF güçlendirme malzemesinin 100 mm asfalt kalınlığı uygulanması durumunda daha belirgin bir biçimde beton plak hareketliliğini kısıtladığını göstermektedir.

Doğu ve batı şeridindeki derz güçlendirme yöntemleri ve farklı (50 ve 100 mm) kalınlıklardaki asfalt kaplama uygulamasının, beton plak hareketliliğine etkisi bir arada değerlendirilmiş ve veriler derlenerek Şekil 3.27’de gösterilmiştir.



Şekil 3.27. Doğu ve Batı şeridinde asfalt kaplama serimi sonrasında beton plak hareketi

Şekil 3.27 incelendiğinde, 50 mm kalınlığında asfalt kaplama serilmesi durumunda 1. derzde (RJF) toplam deplasman genliği %34 azalırken, 100 mm kalınlığındaki asfalt altında yaklaşık %82 azalmıştır. 50 mm asfalt altında 2. derzde %25 azalırken, 100 mm asfalt altında %34 azalmıştır. Son olarak 50 mm asfalt altında 3. derzde %21 artarken, 100 mm asfalt altında %78 azalmıştır. Asfalt kalınlığı 50 mm’den 100 mm’ye çıkarıldığında kalınlık iki katına çıkmış ancak altındaki beton plak hareketliliğini kısıtlama noktasındaki etkisi, oranlar arasındaki farka bakıldığında daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. 100 mm kalınlığındaki asfalt kaplamadaki yansıma çatlaklarının gerek daha fazla geçişten sonra oluşması gerekse çatlak uzunluklarının kısalığı, asfalt kaplama kalınlığının artırılmasının doğrudan etkisini göstermiştir.

3.3.3. Asfalt Kaplamadaki Tekerlek İzi Oluşumları ve Sıcaklık Ölçümleri

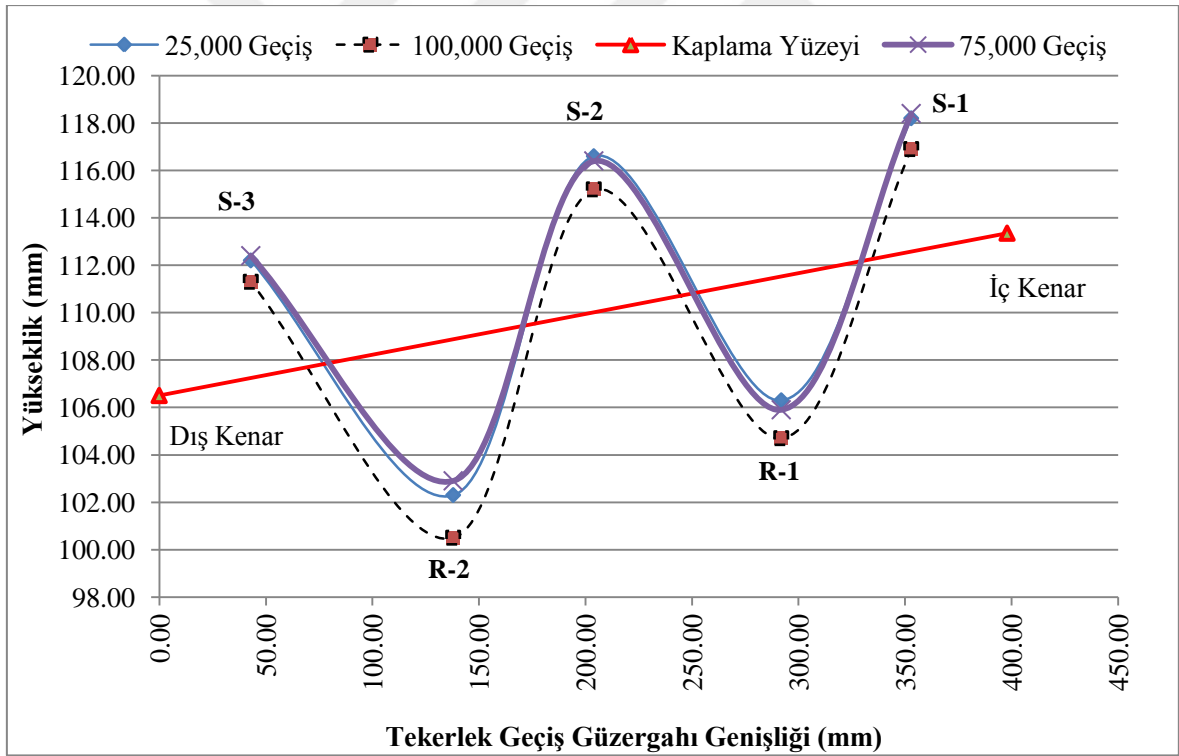
HYT tesisinde, asfalt kaplama serimi sonrasında batı şeridi üzerinde yapılan geçişler 2018 yılı Mayıs ayında başlamış Aralık ayında tamamlanmıştır. Doğu şeridinde ise 2018 yılı Ocak ayında başlamış 2019 yılı Şubat ayında tamamlanmıştır. Deneyler sırasında HYT tesisi ortam sıcaklığı ve derzlerdeki asfalt kaplama sıcaklığı takip edilerek kaydedilmiş, veriler Tablo 3.6'da gösterilmektedir.

Tablo 3.6. HYT tesisinde asfalt kaplamalardan yapılan geçişler ve sıcaklık değerleri

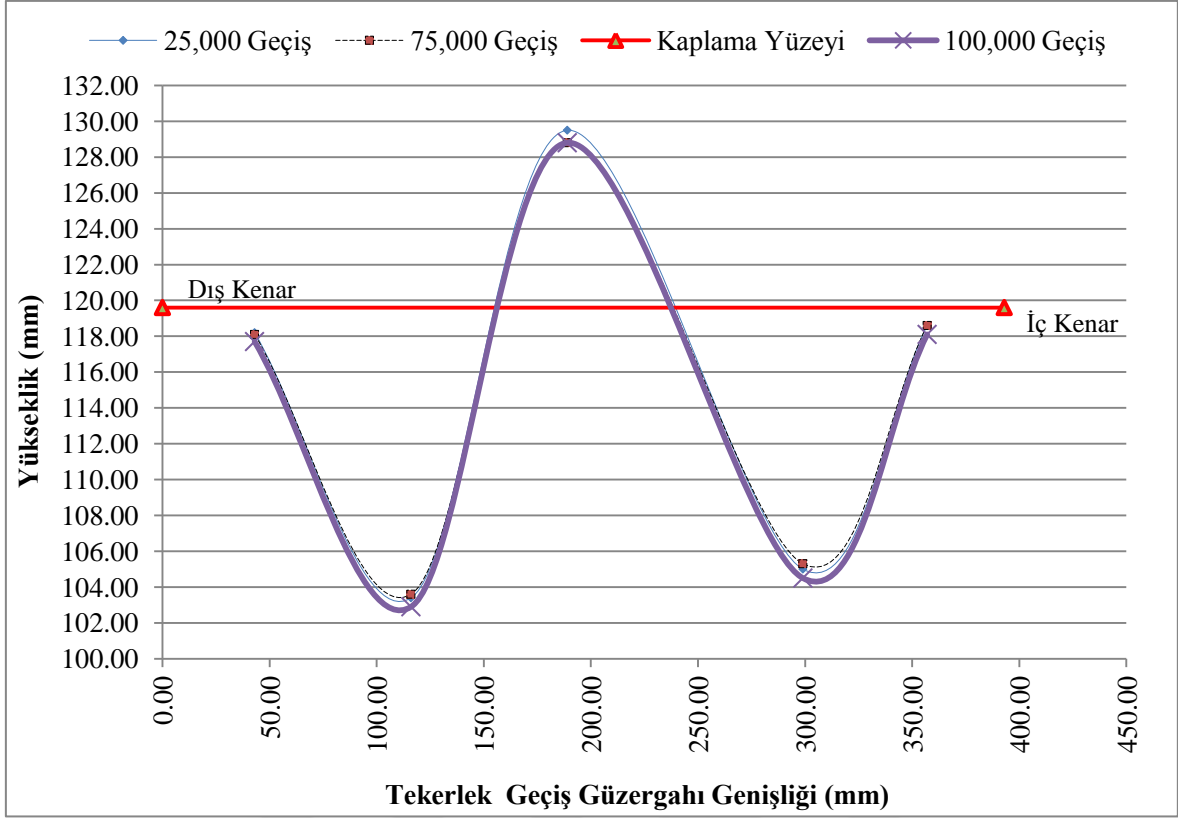
Şeritler	Tarih	Geçişler	Toplam geçiş yüzdesi, %	HYT tesisi ortam sıcaklığı, °C	Asfalt alt yüzey sıcaklık, °C	Ortalama sıcaklık °C
Batı (50 mm)	24.May.18	100	0.10	22.2	21.9	20.15
	22.Haz.18	6,000	6.00	28	27.9	
	23.Haz.18	7,000	7.00	28.1	28.2	
	27.Haz.18	8,500	8.50	27.4	27.6	
	1.Tem.18	11,500	11.50	26.2	26.5	
	20.Eyl.18	15,000	15.00	20.4	20.5	
	5.Eki.18	20,000	20.00	20.1	20.1	
	12.Eki.18	25,000	25.00	19.2	19.1	
	16.Eki.18	30,000	30.00	18.2	17.9	
	16.Kas.18	50,000	50.00	13.2	13	
	8.Ara.18	70,000	70.00	10.5	10.1	
	28.Ara.18	100,000	100.00	9.4	9.1	
Doğu (100 mm)	5.Oca.19	50	0.05	10.1	9.2	9.46
	7.Oca.19	6,000	6.00	11.3	9.3	
	8.Oca.19	7,000	7.00	10.5	9.2	
	9.Oca.19	8,500	8.50	9.8	9.4	
	12.Oca.19	11,500	11.50	10.4	9.5	
	13.Oca.19	15,000	15.00	11.3	9.6	
	16.Oca.19	20,000	20.00	10.2	9.5	
	18.Oca.19	25,000	25.00	8.7	8.9	
	20.Oca.19	30,000	30.00	8.1	8.5	
	23.Oca.19	40,000	40.00	8.9	8.6	
	30.Oca.19	50,000	50.00	11.1	9.5	
	10.Şub.19	70,000	70.00	10.9	10.4	
22.Şub.19	100,000	100.00	12.7	11.5		

Tablo 3.6'da da görüldüğü üzere, asfalt kaplama serimi sonrasında batı şeridinin (50 mm kalınlık) testleri ortalama 20.15°C kaplama sıcaklığında yapılmışken, doğu şeridinin (100 mm kalınlık) testleri ortalama 9.46°C sıcaklıklarda yapılmıştır. HYT

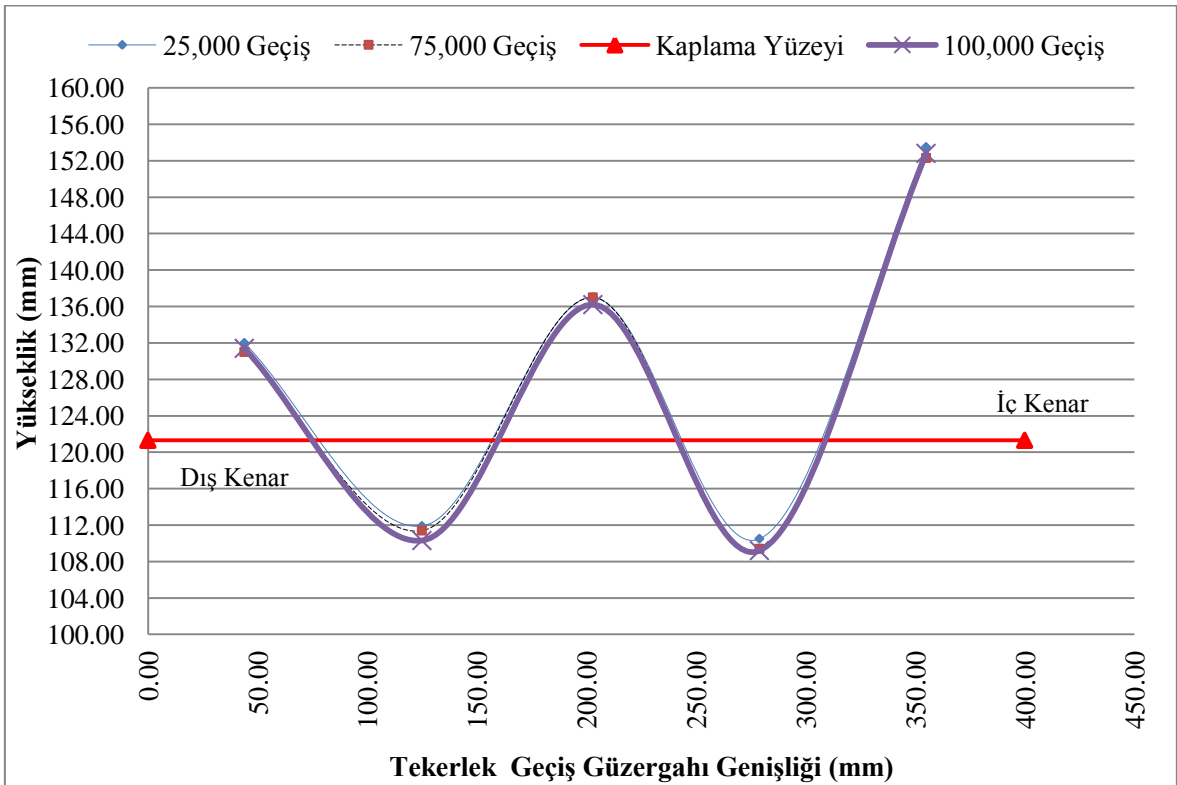
tesisindeki ortam sıcaklığı, 50 mm kalınlığında asfalt kaplama tabanındaki sıcaklıklardan 0.1°C ile 0.4°C arasında farklılık göstermesine rağmen kaplama kalınlığının 100 mm'ye çıkması durumunda bu farklılık 0.3°C ile 2°C arasında değişmektedir. Kaplama kalınlığının artmasıyla, ortam sıcaklığının kaplama tabanına doğru ilerleme sürecinde ısı kaybına uğraması beklenen bir durumdur. Bu sıcaklık koşulları, asfalt kaplama tabakalarında meydana gelen tekerlek izi oluşumlarına doğrudan etki etmiştir. Deneyler sonunda asfalt kaplamalarda oluşan tekerlek izi oluşumları Bölüm 2.2.9.3'de anlatıldığı gibi ölçülmüştür. Alınan veriler bilgisayar ortamına aktarılarak işlenmiş ve kaplamalardan yapılan geçiş sayısı ile ilişkilendirilerek batı şeridi ölçümleri Şekil 3.28-3.30'da gösterilmiştir. Şekillerde çökme bölgeleri R-1 ve R-2 olarak, kabarmalar ise S-1, S-2 ve S-3 olarak tanımlanmış ve 100,000 geçiş sonrasında batı şeridinde oluşan nihai değişimler Tablo 3.7'de gösterilmiştir.



Şekil 3.28. Batı şeridi 1. derzde (RJF) geçiş sayısına bağlı tekerlek izi oluşumu



Şekil 3.29. Batı şeridi 2. derzde (RP) geçiş sayısına bağlı tekerlek izi oluşumu



Şekil 3.30. Batı şeridi 3. derzde (SP) geçiş sayısına bağlı tekerlek izi oluşumu

Batı şeridindeki asfalt kaplamada oluşan tekerlek izleri ilk 25,000 geçişe (298,000 ESAL) kadar her üç derzde de belirli bir forma ulaşmış ve 100,000 geçişe (1,192,000 ESAL) kadar önemli bir değişikliğe uğramamıştır. 25,000 geçişle 100,000 geçiş arasındaki en belirgin fark 3 mm'lik artışla 1. derzde oluşmuştur. Bu sonuçlara göre, 1. derzde asfalt kaplama altında doğrudan beton kaplamanın bulunmasının tekerlek izi nihai oluşumunu zamana yaydığı tespit edilmiştir. Diğer 2. ve 3. derzler üzerindeki asfalt kaplamanın, toplam geçiş sayısının %25'ine (25,000 geçişe) ulaştığında hemen hemen nihai tekerlek izinin oluştuğu tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, asfalt kaplama ile beton kaplama arasında farklı malzeme özelliklerine sahip herhangi bir malzemenin kullanılmasının tekerlek izi oluşum sürecinde olumsuz etki bıraktığını göstermektedir.

Tablo 3.7. Batı şeridinde 100,000 geçiş sonrasında oluşan tekerlek izi oluşumları

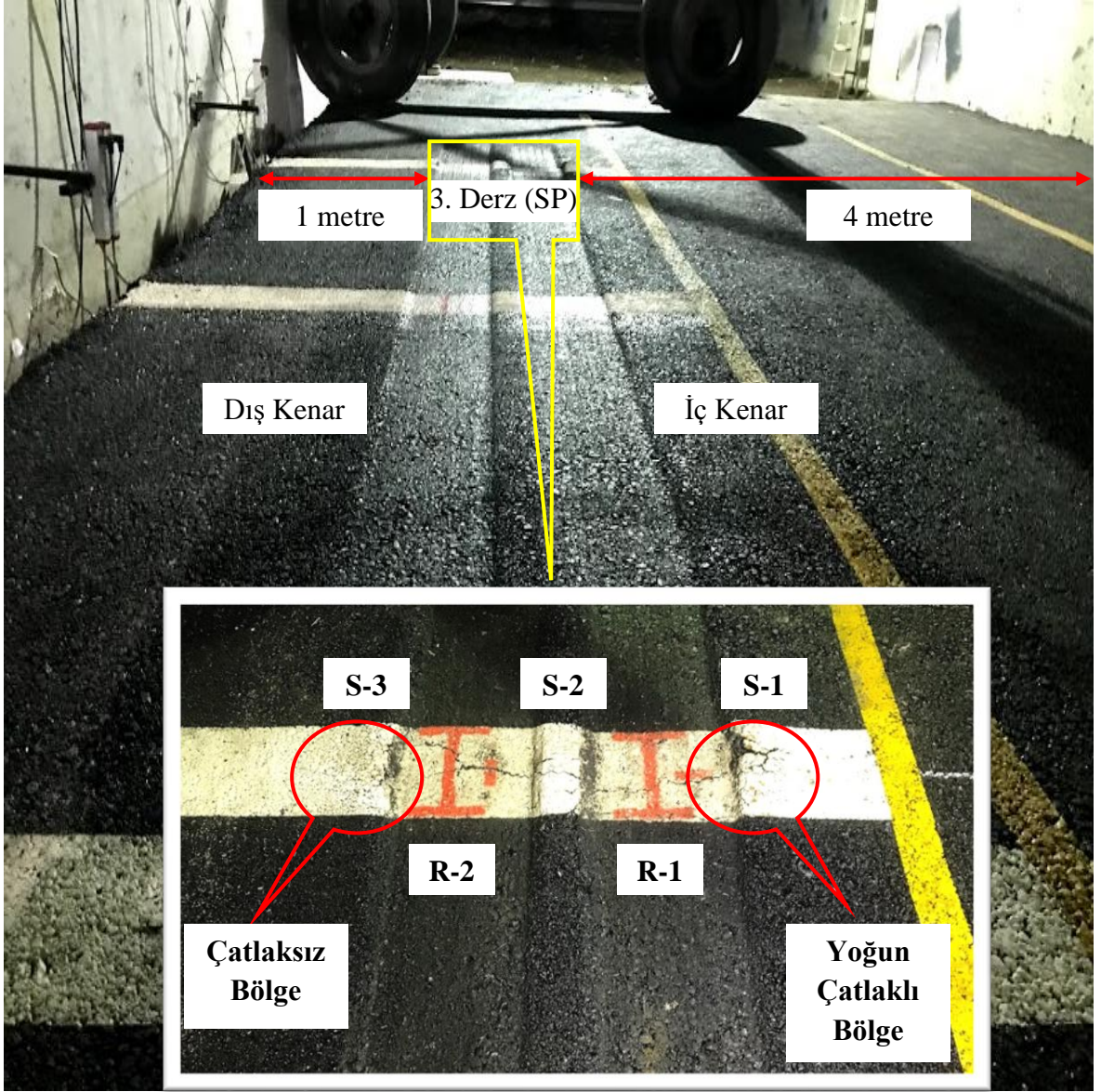
	1. derz (RJF)	2. derz (RP)	3. derz (SP)
Ölçüm noktaları	Kaplama yüzeyine olan mesafe (mm)		
S-1	5.05	-1.5	31.5
R-1	-7.45	-15.1	-12.1
S-2	9.9	9.2	14.9
R-2	-10.45	-16.7	-11
S-3	5.9	-1.9	10.1

Tablo 3.7'deki sonuçlar incelendiğinde, derz bölgelerinde en fazla tekerlek izi ortalama 15.9 mm ile 2. derz üstünde oluşurken, en az tekerlek izinin ortalama 8.95 mm ile 1. derz üstünde olduğu görülmüştür. İki tekerlek arasında kalan S-2 bölgesinde, en fazla kabarma 14.9 mm ile 3. derz üstünde oluşurken, en az kabarma 9.2 mm ile 2. derz üstünde oluşmuştur. Bu sonuçlara göre, asfalt kaplama ile beton kaplama arasında kalan yüzeyde kauçuk levha kullanılmasının en fazla tekerlek izi oluşumuna neden olduğu anlaşılmıştır. Asfalt kaplama, 2. derz bölgesinde altında bulunan kauçuk levha ile birlikte çökmüş, iç ve dış kenarda kabarma oluşumu gözlemlenmemiştir. Ancak bu derzde oluşan bütün çökmelere rağmen iki teker arasında 9.2 mm yüksekliğinde kabarma oluşmuştur. Bu sonuçlardan hareketle, iki tekerlek arasında oluşacak kabarmaların tekerlek izi oluşum mekanizmasında önemli bir yere sahip olduğu anlaşılmıştır.

3. derzde oluşan çökme ve kabarmalar incelendiğinde, iki teker arasında en fazla kabarmanın oluştuğu derz bölgesinin 3. derz olduğu ayrıca iç kenar (S-1) ve dış kenar (S-3) bölgesinde en fazla kabarmanın da yine burada oluştuğu anlaşılmıştır. Bu derz ile ilgili

olarak dikkat çeken husus, S-1 bölgesinde oluşan kabarmanın S-3 bölgesine göre yaklaşık 3 kat fazla olmasıdır. Derz bölgesinin iç kenarında asfalt kaplama sürekliliği yaklaşık 4 m daha devam ederken dış kenarda bu mesafe yaklaşık 1 m kadardır. Dolayısıyla 3. derzde asfalt kaplama, S-1 bölgesinde yatayda ciddi bir dirençle karşılaşmış ve karşı koyabilmek için yukarı doğru yaklaşık 31.5 mm kabarmış ancak kabarma sonrasında çatlayarak bu dirence karşı duramadığını göstermiştir. Yine aynı asfalt kaplama S-3 bölgesinde sadece 10.1 mm kabarma ile bu süreci atlattığı ve kabarma bölgesinde herhangi bir çatlak oluşumu gözlemlenmemiştir (Şekil 3.31). Ayrıca Şekil 3.32 ve Şekil 3.33'te sırasıyla 1. ve 2. derz bölgelerindeki tekerlek izi oluşum seviyesi gösterilmiştir.

Sonuç olarak ağır taşıt trafiğine maruz beton üstü asfalt kaplamaların banket genişliklerinin artırılmasının tekerlek izi kenarlarındaki kabarma oluşumunu artıracığı, asfalt kaplama ile beton kaplama arasında asfalt kaplamadan daha yumuşak bir malzemenin kullanılmasının tekerlek izi derinliğini artıracığı, tekerlek izi oluşumuna karşı en iyi direncin 1. derzde (RJF) olduğu görüşüne varılmıştır.



Şekil 3.31. Batı şeridi 3. derz bölgesinde tekerlek izi oluşumunun gösterimi

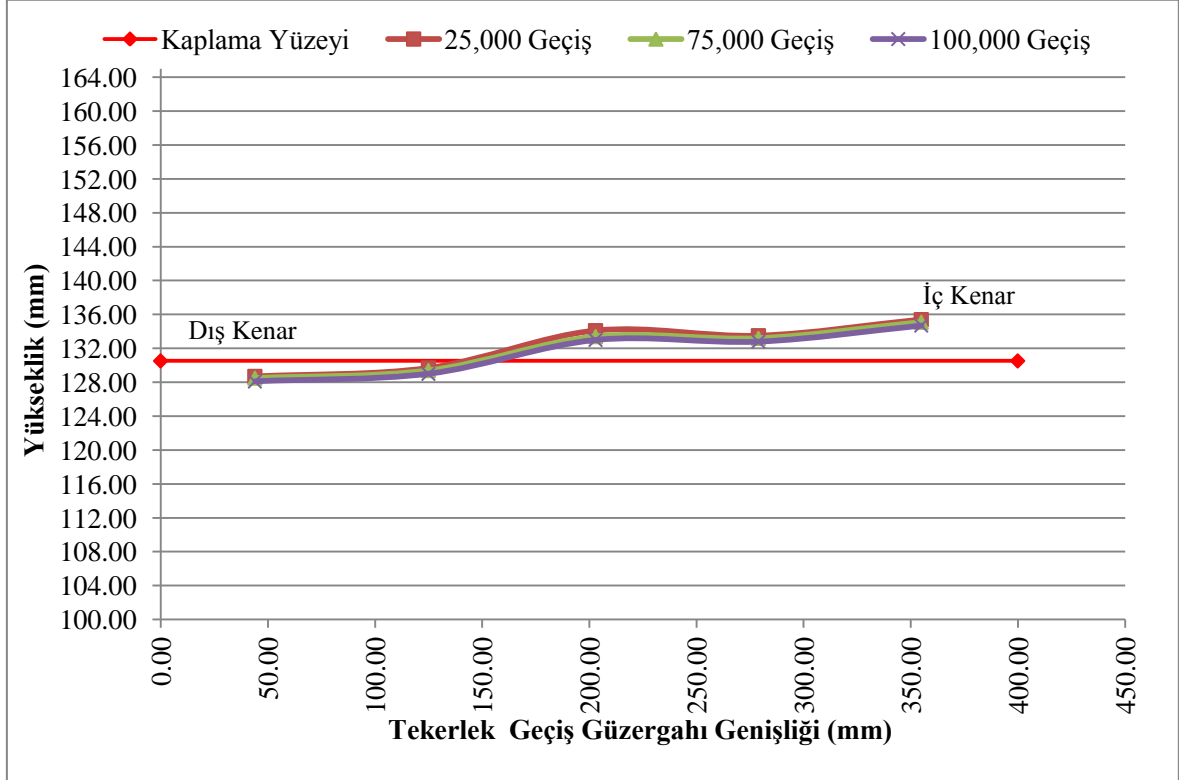


Şekil 3.32. Batı şeridi 1. derz bölgesinde tekerlek izi oluşumunun gösterimi

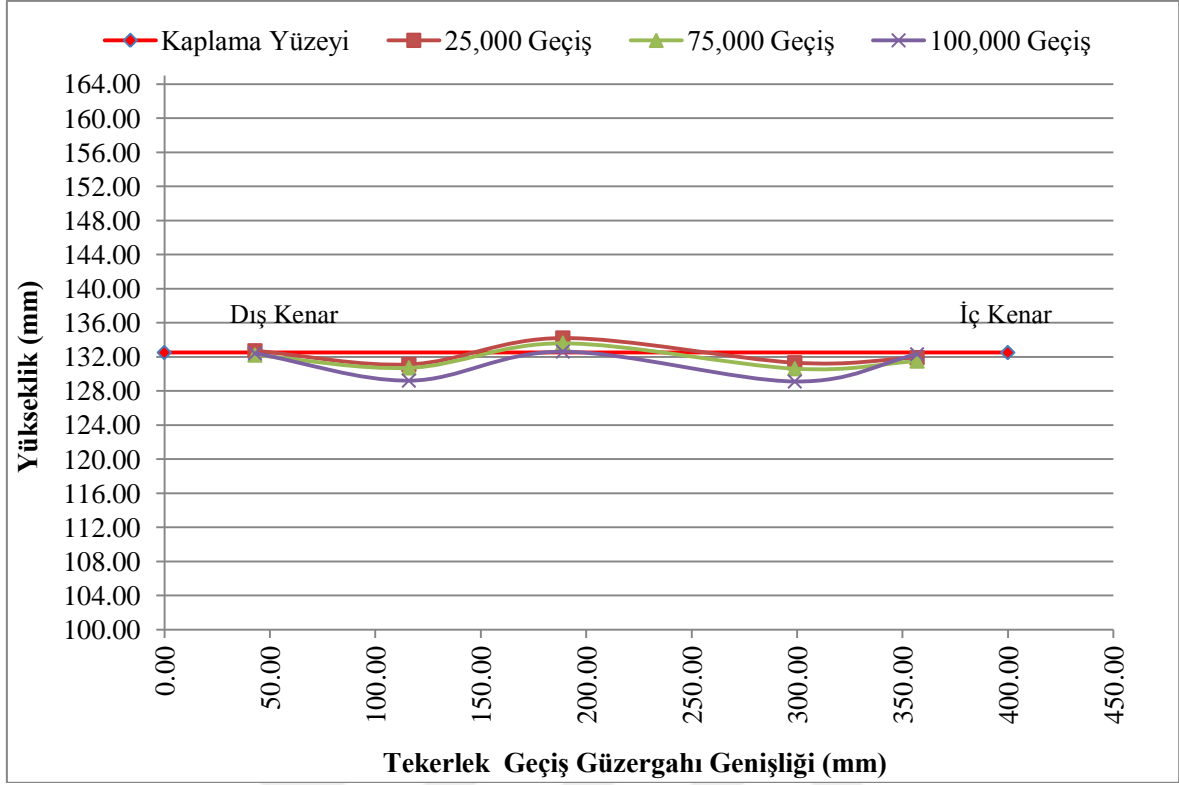


Şekil 3.33. Batı şeridi 2. derz bölgesinde tekerlek izi oluşumunun gösterimi

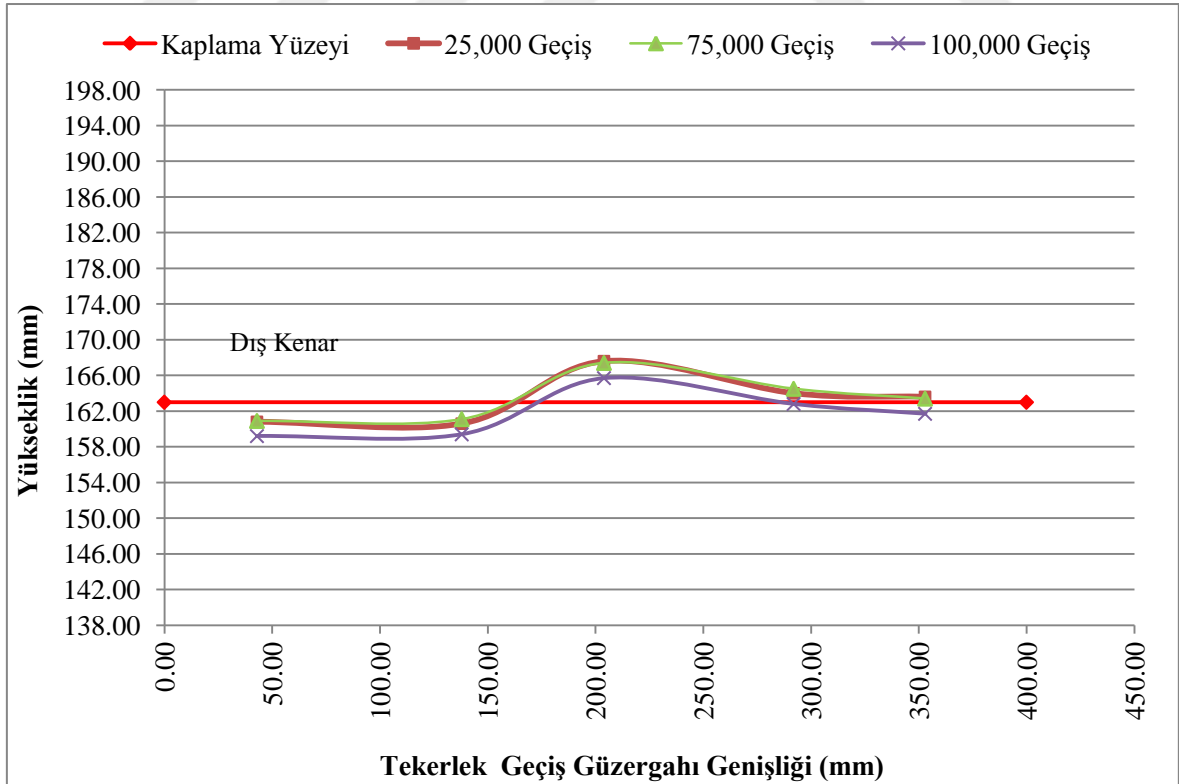
Doğu şeridindeki tekerlek izi oluşum değerleri Şekil 3.34-3.36'da gösterilmiştir. Şekillerde çökme bölgeleri (rutting) R-1 ve R-2 olarak, kabarmalar (swelling) ise S-1, S-2 ve S-3 olarak tanımlanmış ve 100,000 geçiş sonrasında doğu şeridinde oluşan nihai değişimler Tablo 3.8'de, gösterilmiştir.



Şekil 3.34. Doğu şeridi 1. derzde (RJF) geçiş sayısına bağlı tekerlek izi oluşumu

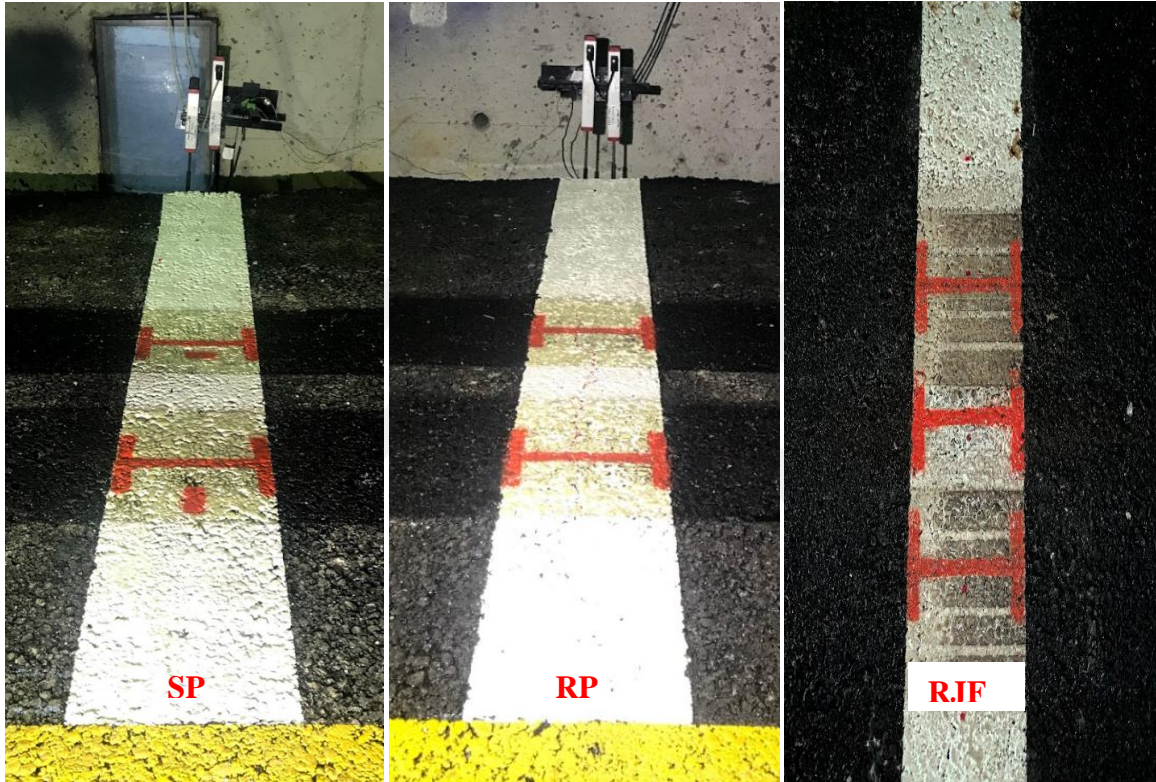


Şekil 3.35. Doğu şeridi 2. derzde (RP) geçiş sayısına bağlı tekerlek izi oluşumu



Şekil 3.36. Doğu şeridi 3. derzde (SP) geçiş sayısına bağlı tekerlek izi oluşumu

Doğu şeridindeki asfalt kaplamada oluşan tekerlek izleri ilk 25,000 geçişe (298,000 ESAL) kadar her üç derzde de belirli bir forma ulaşmış ve sonrasında 100,000 geçişe (1,192,000 ESAL) kadar önemli bir değişikliğe uğramamıştır. 25,000 geçişle 100,000 geçiş arasındaki en belirgin yükselti farkı yaklaşık 1 mm'lik artışla 2 ve 3. derzde oluşmuştur. Doğu şeridindeki geçişlerin sonunda derzlerde oluşan tekerlek izi oluşumları Şekil 3.37'de gösterilmiştir.



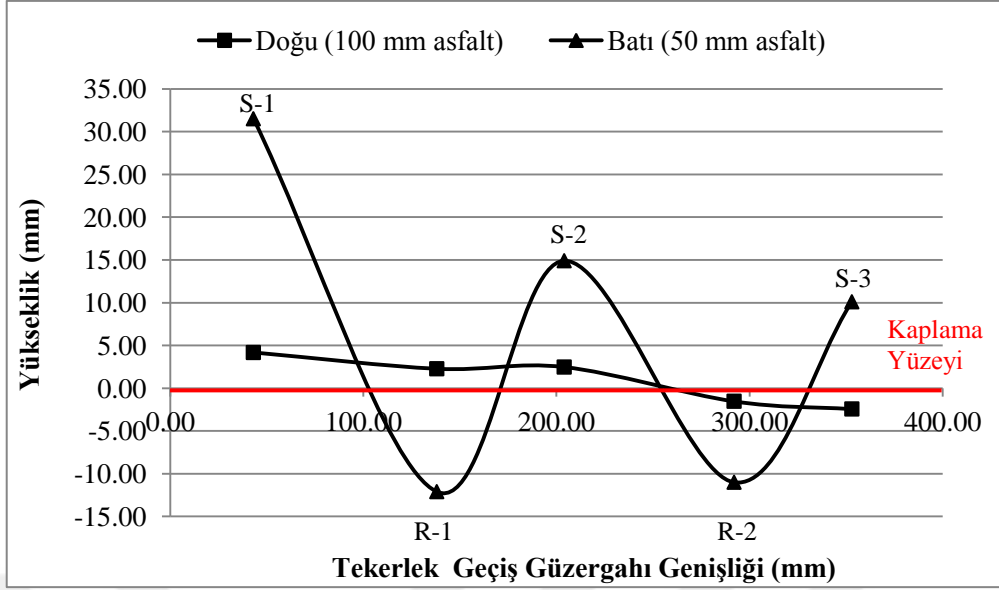
Şekil 3.37. Doğu şeridi derz bölgelerinde oluşan tekerlek izi oluşumlarının gösterimi

Asfalt kaplama kalınlığının 100 mm'ye çıkarılması ve testlerin ortalama 9.46 °C'de yapılması tekerlek izi oluşumunu azaltmıştır. Asfalt kaplamaların düşük sıcaklıklarda yüksek rijitliğe sahip olduğu bilinen bir gerçektir. Doğu şeridinin testleri Tablo 3.8'de görüleceği üzere batı şeridindeki testlere göre yaklaşık 2 kat daha düşük sıcaklıklarda yapılmış olup, tekerlek izi oluşumunun bu denli düşük seviyelerde çıkmış olması bu sıcaklık koşullarında beklenen bir sonuçtur.

Tablo 3.8. Doğu şeridinde 100,000 geçiş sonrasında oluşan tekerlek izi oluşumları

Ölçüm noktaları	1. derz (RJF)	2. derz (RP)	3. derz (SP)
	Kaplama yüzeyine olan mesafe (mm)		
S-1	0.4	-0.2	4.17
R-1	1.5	-3.4	2.27
S-2	4.4	0.1	2.47
R-2	-1.9	-3.3	-1.53
S-3	-2.1	-0.1	-2.43

Tablo 3.8'deki sonuçlar incelendiğinde, derz bölgelerinde en fazla tekerlek izi ortalama 3.4 mm ile 2. derz üstünde oluşurken, batı şeridinde oluşan tekerlek izi bu değer yaklaşık 5 katı kadardır. Asfalt kaplama 2. derz bölgesinde, altında bulunan kauçuk levha ile birlikte çökmüş, iç ve dış kenarda kabarma oluşumu gözlemlenmemiştir. Ancak bu derzde oluşan bütün çökmelere rağmen iki teker arasında 0.1 mm yüksekliğinde kabarma oluşmuştur. 100,000 geçiş (1,192,000 ESAL) sonucunda derzlerde oluşan tekerlek izi sonuçları arasında farklılıklar olsa da, en fazla değişim yaklaşık 4 mm civarında olup bu değer tekerlek izi sınır değerleri açısından oldukça düşük bir değerdir. Karayolları esnek üstyapı projelendirme rehberi 0-15 mm arasındaki tekerlek izi oluşumlarının takip edilebileceğini ancak önlem almaya gerek olmadığını belirtmektedir (Sağlık ve Güngör, 2008). Doğu ve batı şeritlerinden 3. derz ele alınarak, farklı kaplama kalınlıklarına göre tekerlek izi oluşum mertebeleri Şekil 3.38'de gösterilmiştir. Şekil 3.38'de görüldüğü üzere, batı şeridinde en fazla değişim S-1 bölgesinde yaklaşık %60 kadarken, doğu şeridinde ise bu oran S-1 bölgesinde %4'ü kadardır.



Şekil 3.38. Doğu ve Batı şeritlerinde 3.derz (SP) üstünde 100,000 geçiş (1,192,000 ESAL) sonrasında oluşan nihai tekerlek izi yükseklikleri

Doğu ve batı şeridindeki tekerlek izi oluşumlarında, asfalt kaplamanın sıkışma ve boşluk oranlarının etkisini incelemek adına kaplamalardan karotlar alınmıştır (Şekil 3.39). Doğu ve batı şeridinden alınan ikişer numune 40°C sıcaklık altında 24 saat bekletilerek içerisindeki su kurutulmuştur. Havada ve suda ayrı ayrı tartıldıktan sonra karotlardaki boşluk oranları ve birim hacim ağırlıkları (BHA) belirlenmiştir (Tablo 3.9).



Şekil 3.39. Asfalt kaplamalardan karot alınması

Tablo 3.9. Asfalt kaplamalardan alınan karotlardan elde edilen BHA ve boşluk oranları

Kaplama kalınlığı (mm)	Numuneler	Birim hacim ağırlık (gr/cm ³)	Boşluk oranı (%)
50	1. numune	2.365	8.40
	2. numune	2.364	9.27
100	1. numune	2.318	5.99
	2. numune	2.325	6.32

Tablo 3.9'daki veriler, kaplamaların BHA değerlerinin birbirine oldukça yakın olduğunu, ancak boşluk oranları açısından farklı olduğunu göstermektedir. 50 mm kalınlığındaki asfalt kaplamasının boşluk oranı, 100 mm kalınlığındaki asfalt kaplamaya göre %50 daha fazladır. Alınan veriler sonucunda, kaplamalardaki boşluk oranının tekerlek izi oluşumu üzerindeki etkisinin belirgin bir biçimde ortaya çıktığı görülmüştür.

3.3.4. Asfalt Kaplamalardaki BŞD Değerleri

Doğu ve batı şeritlerinde, asfalt kaplama ile beton kaplama arasına boyuna (geçiş yönünde) yerleştirilen BŞD ölçerlerden 100,000 geçiş boyunca veri alınmıştır. Ölçüm cihazlarının asfalt kaplama altına yerleştirilmesi ve yerleşim düzeni Bölüm 2.2.6'da detaylı olarak anlatılmıştır. Asfalt kaplama serimi yapılırken doğu şeridinde 3. derzde yer alan bir BŞD ölçerin ara bağlantı kablosunda deformasyon olduğu için veri alınamamıştır. Batı şeridinde 2. derzde bulunan bir BŞD ölçerde, deneyler sırasında bozulmuştur. Toplamda her iki şeritte bulunan 18 BŞD ölçerden 2 tanesi 100,000 geçişe gelmeden veri üretmez hale gelmiştir. BŞD ölçerlerden veri alabilme başarısı %88.8 olup, literatürde asfalt kaplamaların altına yerleştirilen BŞD ölçerlerden %70 oranında veri alınabilmesi başarılı olarak kabul edilmektedir (Gokhale, vd. 2008).

BŞD ölçerlerin veri alma prensibi, asfalt kaplama yüzeyine uygulanan basınç sayesinde BŞD aparatlarının uzamaya veya büzülme çalışması sırasında, SG (strain gauge) pulunun uzayarak çekme BŞD değerlerini, kısalarak basınç BŞD değerlerini üretmesi esasına dayanmaktadır. doğu ve batı şeridinde veri alma başarısına ulaşılan toplam 16 BŞD ölçerden 100,000 geçiş boyunca 208 veri grafiği elde edilmiştir. Elde edilen grafiklerin bu bölümde verilmesi ciddi bir karmaşaya neden olacağından Ekler bölümünde verilmiştir. Bu bölümde, verilerin alındığı grafiklerden sadece başlangıç ve

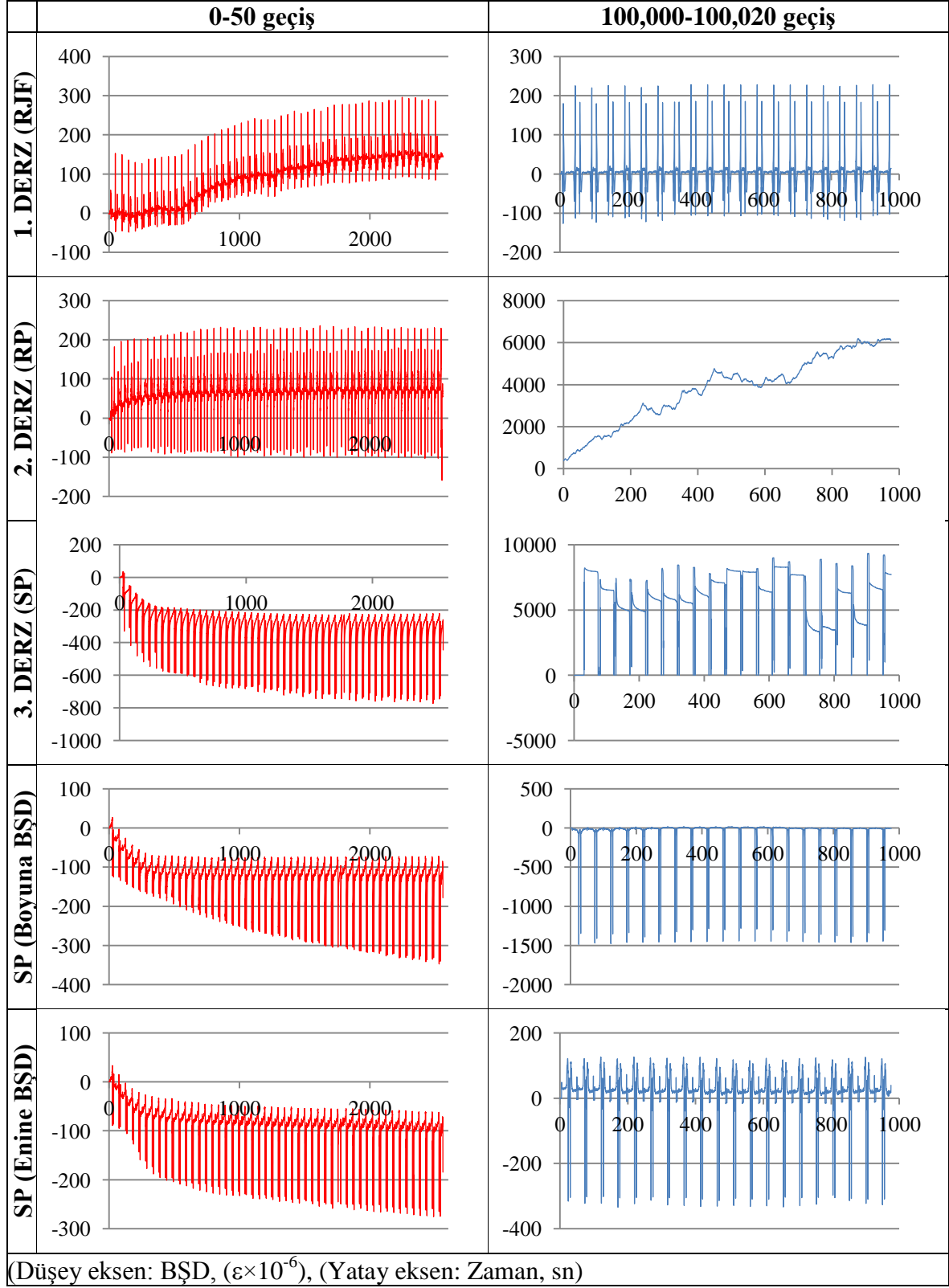
bitiş geçişlerindeki ölçümler ve tüm grafik verilerinin toplu halde değerlendirildiği genel grafikler verilmiştir.

3.3.4.1. Batı Şeridindeki BŞD Değerleri

Batı şeridindeki derzlerden alınan başlangıç ve bitiş BŞD ölçümleri Tablo 3.10'da verilmiştir.



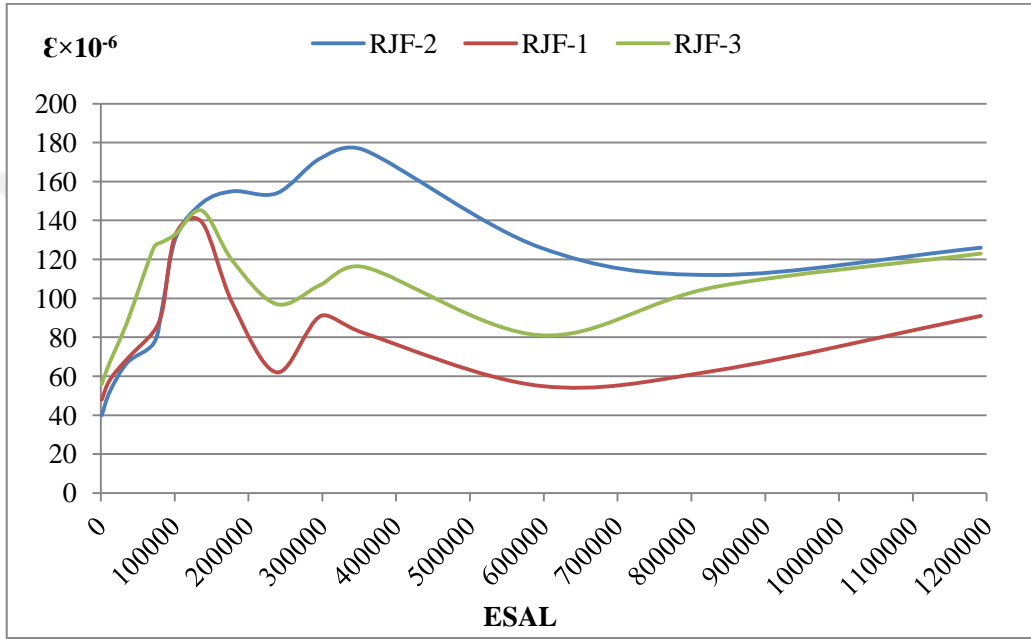
Tablo 3.10. Batı şeridindeki başlangıç ve bitiş geçişlerinde alınan BŞD ölçümleri



Tablo 3.10'daki grafikler incelendiğinde, batı şeridi için başlangıç geçişlerinde 1. derzde oluşan BŞD değerinin 152×10^{-6} , 2. derzde 230×10^{-6} ve 3. derzde 329×10^{-6} mertebesinde olduğu, 100,000 geçiş (1,192,000 ESAL) sonrasında 1. derzde 225×10^{-6} , 2. derzde $6,000 \times 10^{-6}$ ve 3. derzde $7,500 \times 10^{-6}$ mertebelerinde değerler oluştuğu anlaşılmıştır. Başlangıç ve bitiş geçişleri arasındaki farklara göre 1. derzde yaklaşık %50 oranında bir artış olduğu, 2. ve 3. derzlerde yoğun çatlak oluşumundan kaynaklı olarak BŞD mertebesinin yaklaşık 25 katına çıktığı görülmüştür. Batı şeridinde yapılan ilk geçişlerde, BŞD ölçerlerin tasarım aşamasında yapılan deneylerdeki davranışa benzer hareket ettiği tespit edilmiştir. BŞD ölçerler, asfalt kaplamanın davranışı kararlı hale geçinceye kadar artık BŞD değerlerini ölçmeye devam etmiş ancak Tablo 3.10'daki 1. derz verilerine bakılacak olursa toplam genliğin değişmediği anlaşılmış, 2. ve 3. derzlerde ise ilk 50 geçişte azda olsa değerlerin artmaya başladığı görülmüştür. 100,000 geçiş sonunda ise 1. derz bölgesindeki tekerlek izi oluşumuyla asfalt kaplamadaki boşluk oranının iyice azaldığı ve her geçişte aynı değerlerin okunmasından kararlı hale geldiği kanısına varılmıştır. Bu kararlı davranışın bir nedeni ise kaplamanın 1. derz bölgesinde çatlak oluşmadan testleri tamamlamasıdır. Aynı açıdan 2. ve 3. derz bölgelerindeki değişimlere bakacak olursak meydana gelen çatlakların 100,000 geçiş sonunda bu davranış biçimine müsaade etmediği anlaşılmıştır. Batı şeridi 2. ve 3. derz bölgelerinde 100,000 geçişe ulaşmadan yansıma çatlakları oluşmaya başlamış olup, çatlak oluşumundan kaynaklı BŞD değerlerindeki artış değerleri Şekil 3.42 ve 3.45'te gösterilmektedir.

Şekil 3.40'ta batı şeridi 1. derzde alınan BŞD ölçümlerinin ESAL'e bağlı değişimi verilmiştir. Derzde bulunan 3 farklı ölçüm cihazından ikisi (RJF-1 ve RJF-3) tekerlek altlarına gelecek şekilde sonuncusu (RJF-2) iki tekerlek ortasına gelecek şekilde yerleştirilmiştir. İki tekerlek arasında oluşan BŞD değerlerinin tek tekerlek altında oluşan değerlerden yüksek çıkması, yüzeye uygulanan basıncın iki teker arasında bileşke kuvvetinin açığa çıktığının bir göstergesidir (Çelik, 2019). Tekerlekler altındaki BŞD değerleri ilk 100,000 ESAL'e kadar artış göstermiş daha sonra 240,000 ESAL'e kadar asfalt kaplamanın kararlı halde bir davranış sergilemesiyle beraber düşüşe geçmiştir. Bu geçişlerden sonra 1,192,000 ESAL'e kadar olan geçişlerde, asfalt kaplamada silindirle sıkışma sonrasında kalan boşluklar kapanarak asfalt kaplamanın asıl davranışı ortaya çıkmıştır. Bu derzde çatlakların oluşmamasındaki en önemli etkenlerden biri, RJF güçlendirme uygulamasıyla beton plakların düşey deplasman hareketlerinin sınırlandırılmasındaki başarıdır. RJF güçlendirmesi ve 50 mm kalınlığındaki asfalt

kaplama, beton kaplamada 1. ve 2. plak üzerine uygulandıktan sonra düşey deplasman mertebesi %34 oranında azalmıştır. 1. derz bölgesi, 1,192,000 ESAL boyunca gözlemsel olarak incelenmiş ve herhangi bir çatlak oluşumuna rastlanılmamıştır (Şekil 3.41). En yüksek BŞD değeri (RJF-2) bölgesinden 170×10^{-6} olarak okunmuş, bu değer literatürde asfalt kaplamalar için önerilen boyuna BŞD sınır değerinin (500×10^{-6}) yaklaşık 1/3'ü kadar olduğu anlaşılmıştır (Von Quintus vd., 2009).

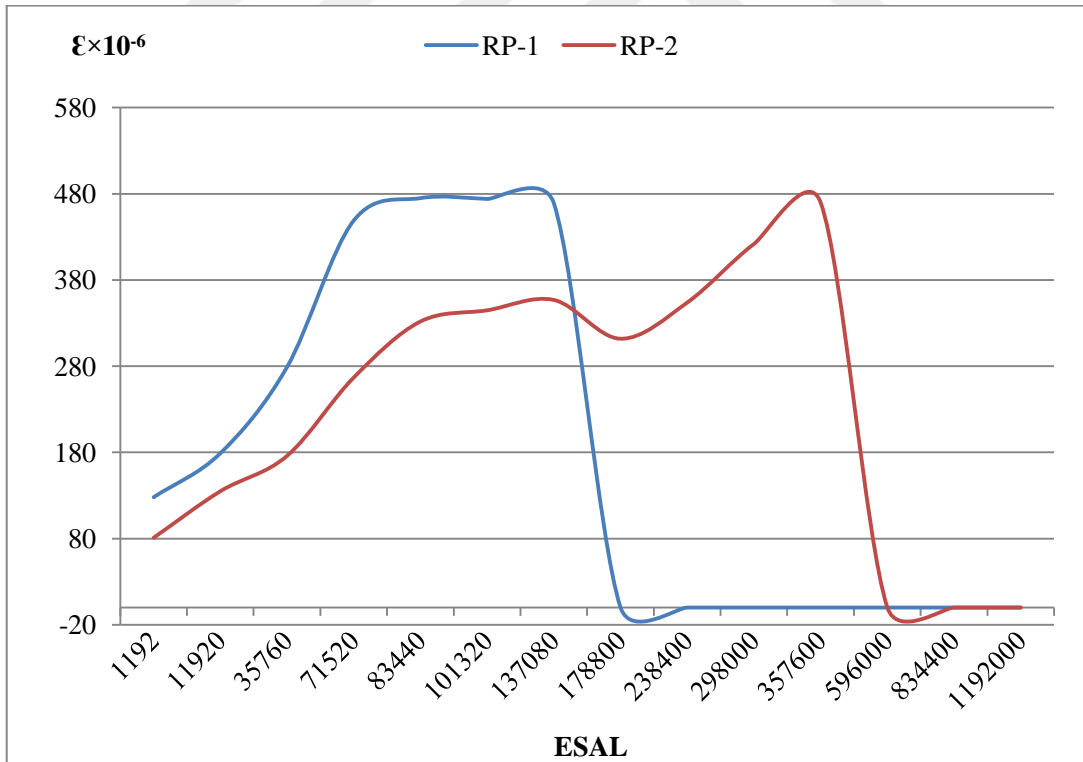


Şekil 3.40. Batı şeridi (RJF) 1. derzde BŞD ölçümleri

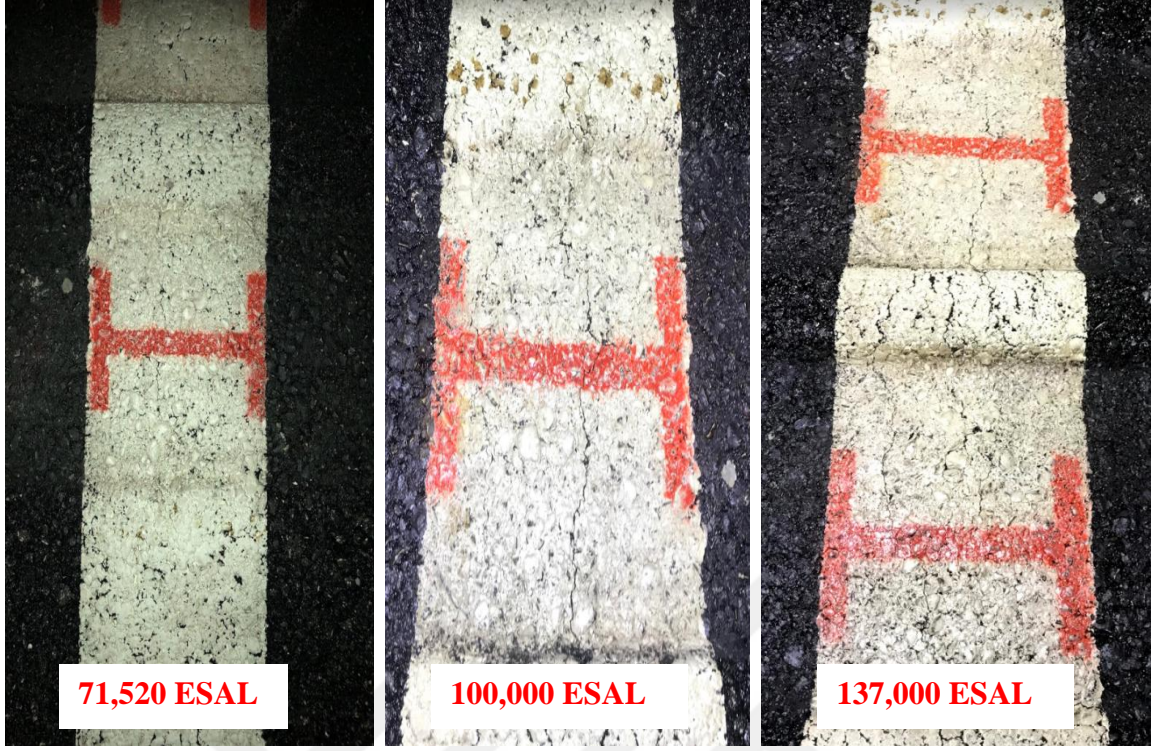


Şekil 3.41. Batı şeridi (RJF) 1. derzde yansıma çatlakları ilerlemesi

Şekil 3.42’de verilen 2. derz bölgesindeki BŞD verileri tekerlekler altına yerleştirilen BŞD ölçerlerden okunmuştur. İki BŞD ölçer verileri arasında yaklaşık %28’lik bir fark bulunmaktadır. Bu farklılığın en önemli sebeplerinden biri, BŞD ölçerlerin beton kaplama üzerine yerleştirilmesi sırasında altına serilen asfalt kaplama kalınlığıdır. BŞD ölçerlerin yerleştirilmesi sırasından azami derecede dikkat gösterilmiş olsa da, asfalt kaplama serimi sonrasında yüzeyden alınan profometre ölçümlerinde iki BŞD ölçerler arasında yaklaşık 5-10 mm arasında değişen kot farklılıkları saptanmıştır. Bu derzde, 71,520 ESAL’e gelindiğinde ilk yansıma çatlakları belirmeye başlamıştır. Tekil olarak büyümeye devam eden bu yansıma çatlağına paralel şekilde 137,080 ESAL’dan sonra yeni bir çatlak ortaya çıkmıştır. Her iki çatlak yaklaşık olarak 834,400 ESAL’e kadar devam etmiş ve bu değerden sonra son halini almıştır. Çatlakların başlama dönemine denk gelen BŞD değer aralığı $350-400 \times 10^{-6}$ mertebesidir. RP-1 ölçüm aleti 137,080 ESAL’e kadar ölçüm almaya devam ederken RP-2 ölçüm aleti 357,600 ESAL’e kadar devam etmiştir. Çatlak ilerleme evreleri Şekil 3.43 son halini Şekil 3.44’te gösterilmektedir.



Şekil 3.42. Batı şeridi (RP) 2. derzde BŞD ölçümleri

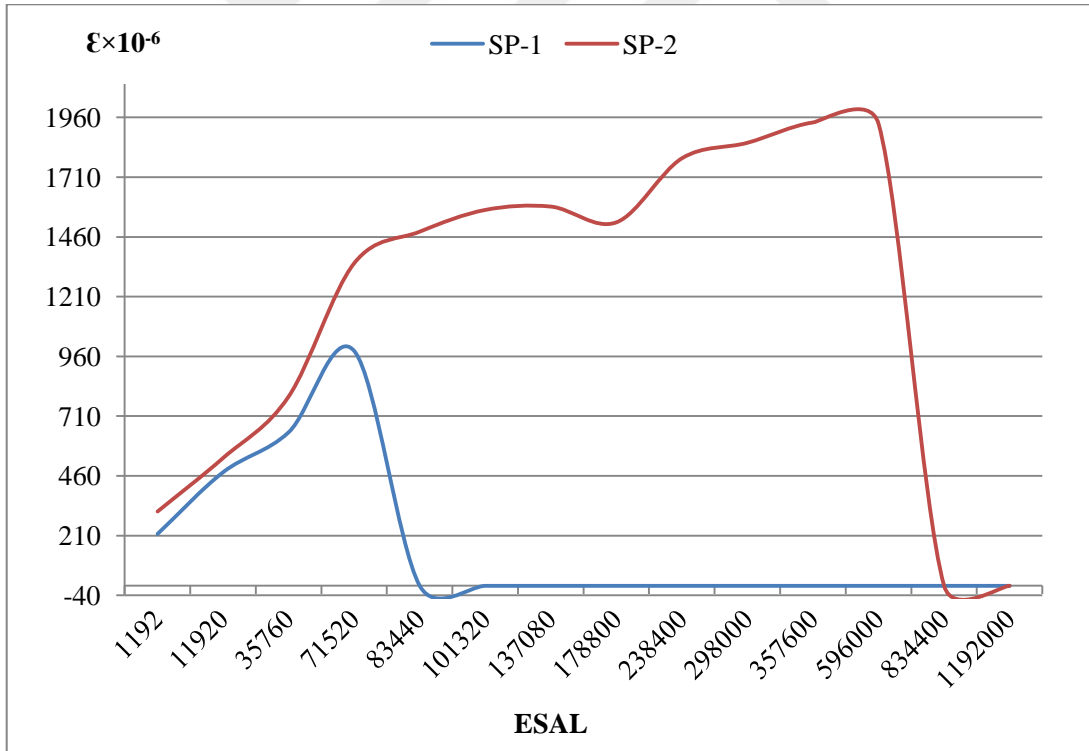


Şekil 3.43. Batı şeridi (RP) 2. derzde yansımaya çatlağı ilerlemesi

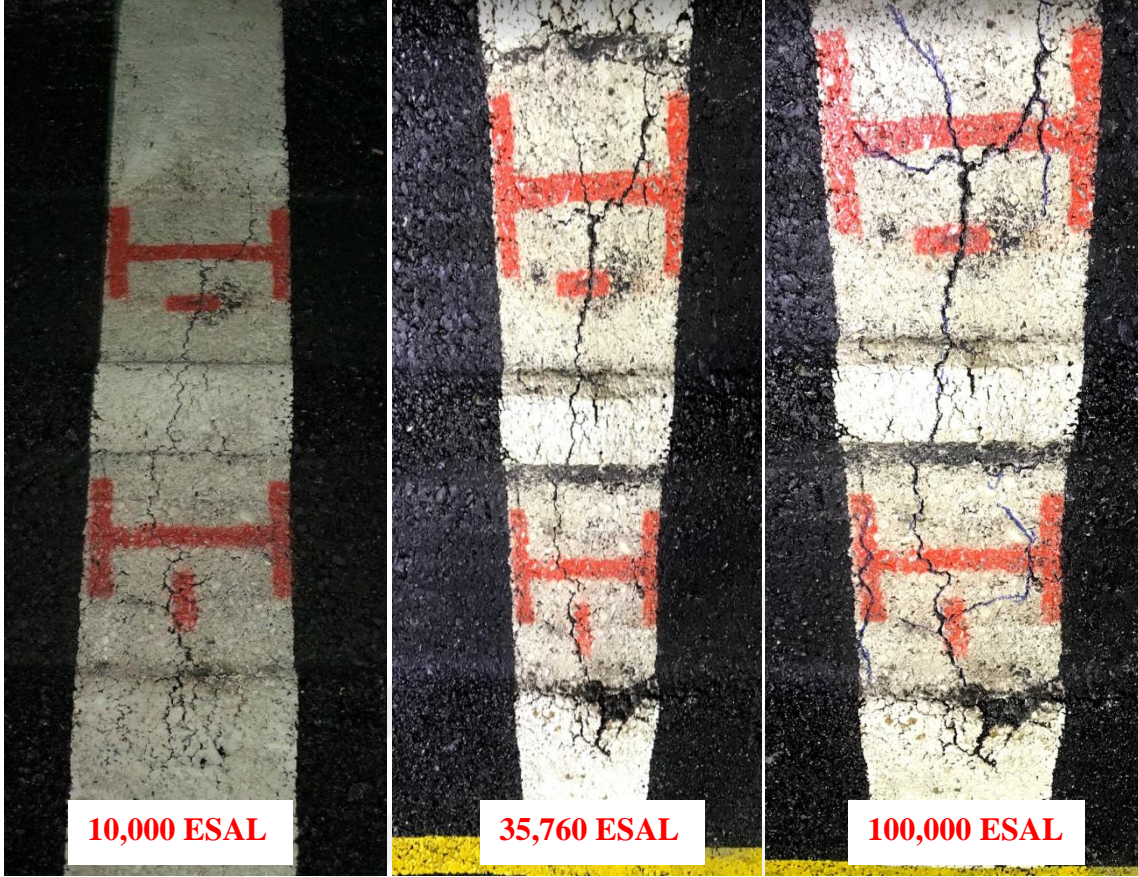


Şekil 3.44. Batı şeridi (RP) 2. derzde yansımaya çatlağı son hali

Şekil 3.45'te verilen 3. derz bölgesindeki BŞD verileri tekerlekler altına yerleştirilen BŞD ölçerlerden okunmuştur. 71,520 ESAL'e kadar iki BŞD ölçer verileri arasında önemli bir fark bulunmamaktadır. Ancak SP-1 ölçüm aleti bu geçiş sayısından sonra koptuğu için veri alınamamıştır. Bu derzde, ilk yansıma çatlakları 10,000 ESAL'e ulaşıldığında oluşmaya başlamıştır. Geçiş sayıları arttıkça ilerlemeye devam eden yansıma çatlakları 2. derzde olduğu gibi önce tekil olarak uzamış daha sonra paralelinde yeni bir çatlak daha oluşmuştur. Özellikle bu derzde yansıma çatlakları arasında oluşan çatlak açıklığı, 2. derze göre daha fazla olarak ortaya çıkmıştır. Çelik levha ile asfalt kaplama arasında iyi bir aderansın sağlanamaması hem erken çatlak oluşumuna hem de oluşan çatlakların daha uzun ve büyük açıklıklara sahip olmasına neden olmuştur. SP-2 ölçüm aleti yaklaşık olarak 834,400 ESAL'e kadar veri üretmişse de üzerindeki asfalt kaplamanın aşırı çatlamasından kaynaklı olarak elde edilen BŞD değerleri $1,960 \times 10^{-6}$ mertebesindedir. Çatlakların ilerleme aşamaları Şekil 3.46'da gösterilmektedir.



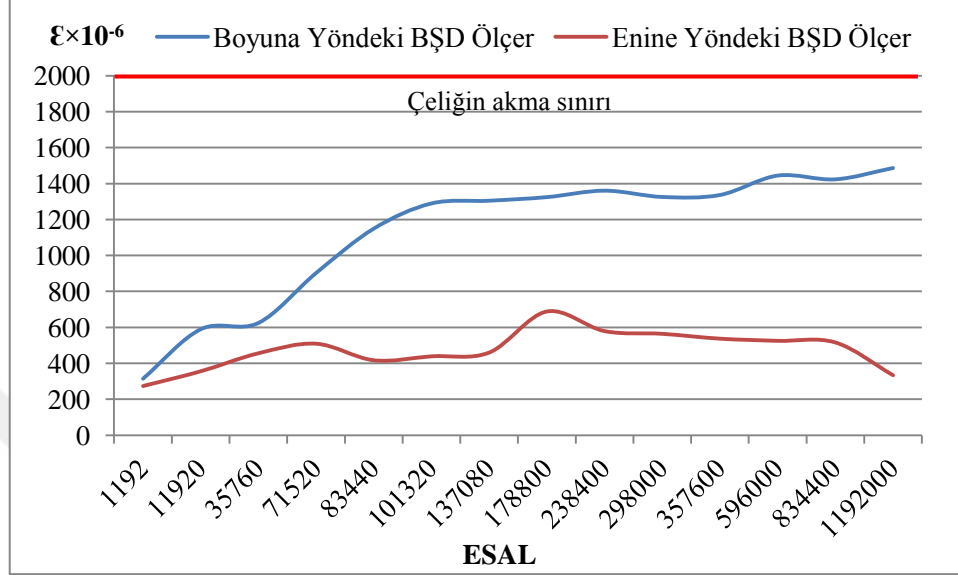
Şekil 3.45. Batı şeridi (SP) 3. derzde BŞD ölçümleri



Şekil 3.46. Batı şeridi (SP) 3. derzde yansıma çatlağı ilerlemesi

3. derz güçlendirmesinde kullanılan çelik levha (SP) üzerinde bulunan boyuna ve enine yöndeki BŞD ölçerler; ilk 50 geçişte boyuna yönde 125×10^{-6} değerinden başlayarak 347×10^{-6} mertebelerine kadar artmış, enine yönde ise 80×10^{-6} değerinden başlayarak 270×10^{-6} mertebelerine kadar ilerleme kaydetmiştir (Şekil 3.47). Birinci geçişle ellinci geçiş arasında oluşan BŞD değerleri arasındaki yaklaşık 3 katlık fark, asfalt kaplamanın ilk geçişler altında ve sıcaklık etkisiyle boşluk oranının azalmaya başladığının bir göstergesi olarak kabul edilebilir. Sıkışan asfalt, yüzeye uygulanan basıncı alt tabakalara daha iyi aktardığı zaman çelik levhada oluşan BŞD değerlerinin artması beklenen bir durumdur. Nitekim 100,000 geçiş sonrasında boyuna BŞD değerleri $1,486 \times 10^{-6}$ değerine, enine BŞD değerleri ise 315×10^{-6} mertebelerine ulaşmıştır. Her iki yönde oluşan BŞD değerleri çeliğin bilenen (%2 yani $2,000 \times 10^{-6}$) akma değerinin altında kalmıştır. Bu durumda, 100,000 geçiş sonunda dahi çelik levhanın akma sınırına ulaşmadan elastik bölgede kaldığı ve başlangıçta yerleştirilen durumunda olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bu durum, çelik levhaların asfalt kaplama ile beton kaplama arasında kullanılabilir bir malzeme olduğunu

gösterse de asfalt kaplamanın çelik ile tam bir aderans sağlayamamasından kaynaklı oluşan yansıma çatlakları açısından sakıncalı bir yöntemdir.



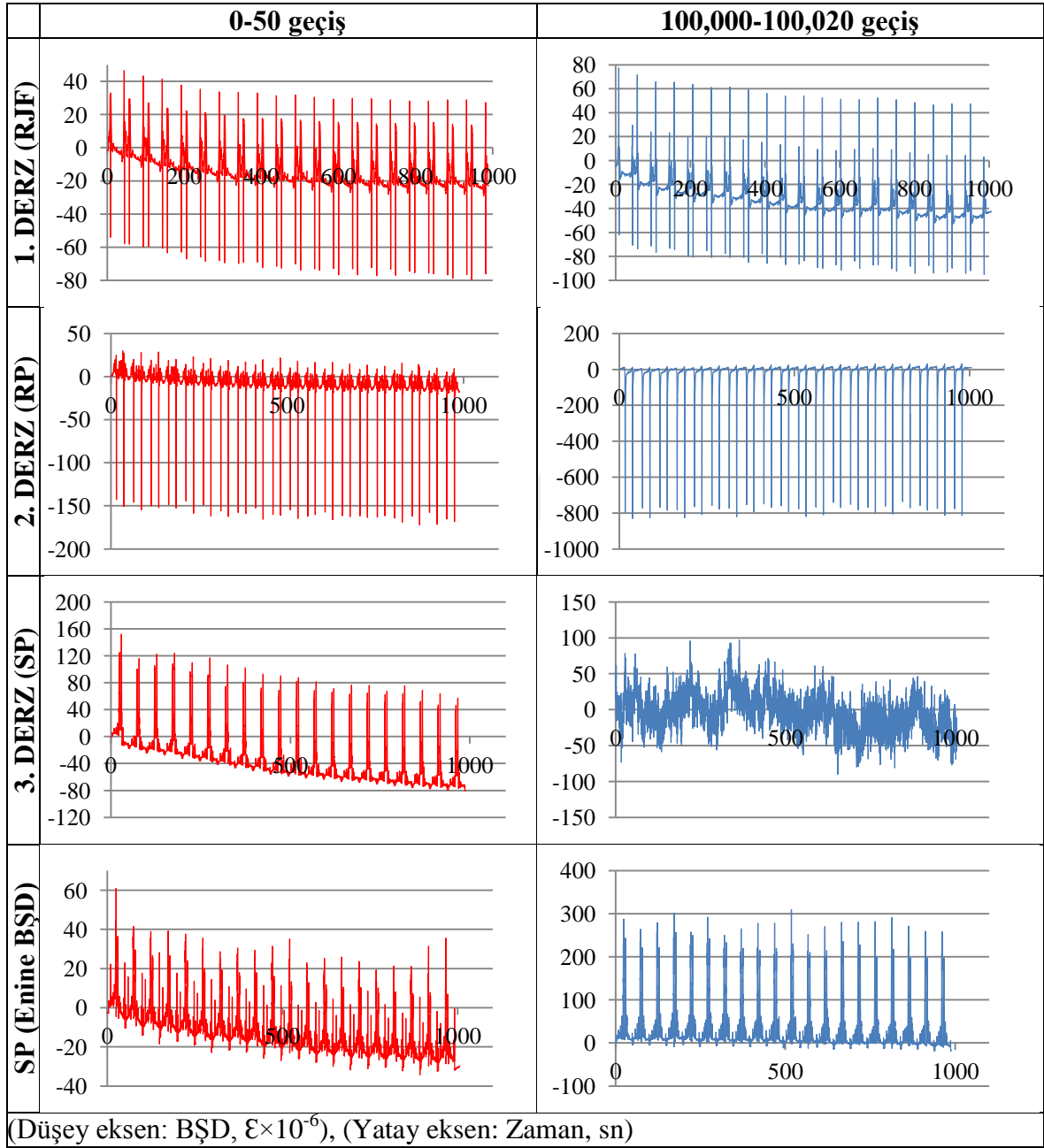
Şekil 3.47. Batı şeridi çelik levhadaki BŞD ölçümleri

Çelik levhanın boyuna BŞD değerleri (geçiş yönüne paralel), enine yöndeki (geçiş yönüne dik) değerlerden yaklaşık 2 kat daha fazladır. Çelik levha tekerlek geçişi sırasında altında kalan derz boşluğuna doğru boyuna doğrultuda eğilmekteyken, enine yönde sadece uzamaya çalışmaktadır. Arada oluşan farklılığın temel nedeni budur.

3.3.4.2. Doğu Şeridindeki BŞD Değerleri

Doğu şeridindeki derzlerden alınan başlangıç ve bitiş BŞD ölçümleri Tablo 3.11'de verilmiştir.

Tablo 3.11. Doğu şeridindeki başlangıç ve bitiş geçişlerinde alınan BŞD ölçümleri

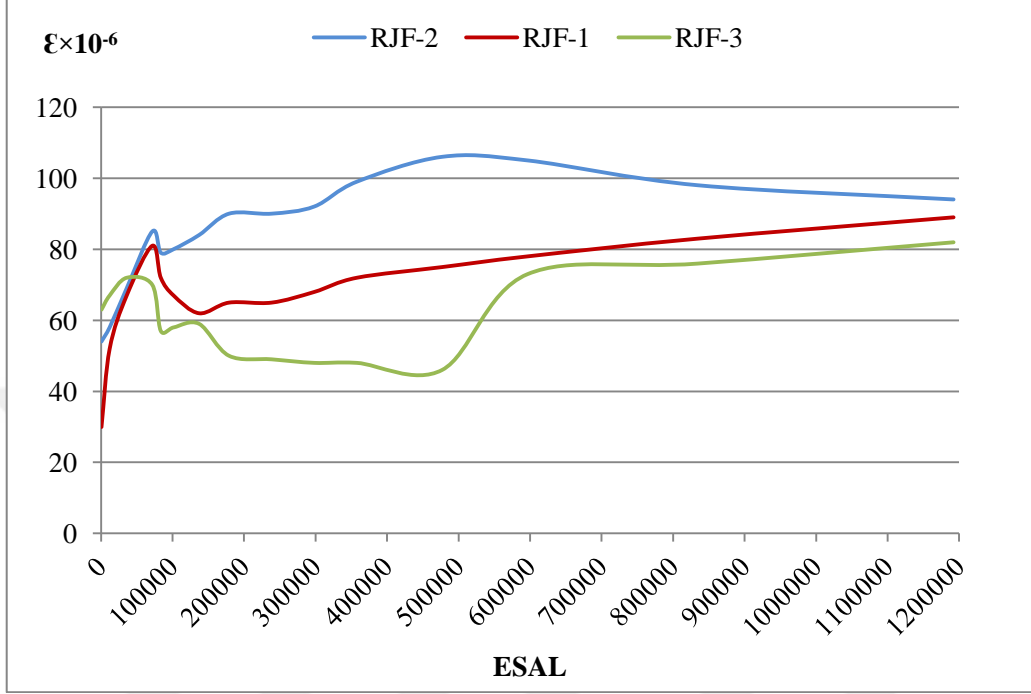


Tablo 3.11'deki grafikler incelendiğinde, doğu şeridi için başlangıç geçişlerinde 1. derzde oluşan BŞD değerinin 47×10^{-6} , 2. derzde 123×10^{-6} ve 3. derzde 110×10^{-6} mertebesinde olduğu, 100,000 geçiş (1,192,000 ESAL) sonrasında 1. derzde 61×10^{-6} , 2. derzde 800×10^{-6} mertebelerinde değerler oluştuğu anlaşılmıştır. 3. derz için yaklaşık 596,000 ESAL sonrasında 430×10^{-6} mertebelerinde değer okunduktan sonra okumaların kesintiye uğradığı görülmüştür. Başlangıç ve bitiş geçişleri arasındaki farklara göre 1. derzde yaklaşık %29 oranında bir artış olduğu, 2. ve 3. derzlerde yoğun çatlak

oluşumundan kaynaklı olarak BŞD mertebelerinin sırasıyla 6 ve 4 katına çıktığı görülmüştür. Doğu şeridinde yapılan ilk geçişlerde, BŞD ölçerlerin tasarım aşamasında yapılan deneylerdeki davranışa benzer hareket ettiği tespit edilmiştir. BŞD ölçerler, asfalt kaplamanın davranışı kararlı hale geçinceye kadar artık BŞD değerlerini ölçmeye devam etmiş buna rağmen Tablo 3.11'deki 1., 2. ve 3. derz verilerine bakılacak olursa toplam genliğin değişmediği görülmüştür. 100,000 geçiş sonunda ise 1. derz bölgesindeki tekerlek izi oluşumuyla asfalt kaplamadaki boşluk oranının iyice azaldığı ve her geçişte aynı değer okunmasından kararlı hale geldiği kanısına varılmıştır. Bu kararlı davranışın bir nedeni ise kaplamanın 1. derz bölgesinde çatlak oluşmadan testleri tamamlamasıdır. Aynı açıdan 2. ve 3. derz bölgelerindeki değişimlere bakacak olursak meydana gelen çatlakların 100,000 geçiş sonunda bu davranış biçimine müsaade etmediği anlaşılmıştır. Bu şeritte 2. ve 3. derz bölgelerinde 100,000 geçişe ulaşmadan yansıma çatlakları oluşmaya başlamış olup, çatlak oluşumundan kaynaklı BŞD değerlerindeki artış değerleri Şekil 3.50 ve 3.53'te gösterilmektedir.

Şekil 3.48'de doğu şeridi 1. derzde alınan BŞD ölçümlerinin ESAL'e bağlı değişimi verilmiştir. Derzde bulunan 3 farklı ölçüm cihazından ikisi (RJF-1 ve RJF-3) tekerlek altlarına gelecek şekilde sonuncusu (RJF-2) iki tekerlek ortasına gelecek şekilde yerleştirilmiştir. İki tekerlek arasında oluşan BŞD değerlerinin tek tekerlek altında oluşan değerlerden yüksek çıkması, yüzeye uygulanan basıncın iki teker arasında bileşke kuvvetinin açığa çıktığının bir göstergesidir (Çelik, 2019). Tekerlekler altındaki BŞD değerleri ilk 71,000 ESAL'e kadar artış göstermiş daha sonra 100,000 ESAL'e kadar asfalt kaplamanın kararlı halde bir davranış sergilemesiyle beraber düşüşe geçmiştir. Bu geçişlerden sonra 1,192,000 ESAL'e kadar olan geçişlerde, asfalt kaplamada silindirle sıkışma sonrasında kalan boşluklar kapanarak asfalt kaplamanın asıl davranışı ortaya çıkmıştır. Bu derzde çatlakların oluşmamasındaki en önemli etkenlerden biri, RJF güçlendirme uygulamasıyla beton plakların düşey deplasman hareketlerinin sınırlandırılmasındaki başarıdır. RJF güçlendirmesi ve 100 mm kalınlığındaki asfalt kaplama, beton kaplamada 1. ve 2. plak üzerine uygulandıktan sonra düşey deplasman mertebesi %82 oranında azalmıştır. 1. derz bölgesi, 1,192,000 ESAL boyunca gözlemsel olarak incelenmiş ve herhangi bir çatlak oluşumuna rastlanılmamıştır (Şekil 3.49). En yüksek BŞD değeri (RJF-2) bölgesinden 106×10^{-6} olarak okunmuş, bu değer literatürde asfalt kaplamalar için önerilen boyuna BŞD sınır değerinin (500×10^{-6}) yaklaşık 1/5'i kadar olduğu anlaşılmıştır (Von Quintus vd., 2009). Ayrıca bu değer, 50 mm kalınlığındaki asfalt

kaplamanın RJF bölgesinde oluşan 170×10^{-6} BŞD mertebesiyle kıyaslandığında, asfalt kalınlığının iki katına çıkmasının BŞD değerini %70 oranında azalttığını göstermektedir.



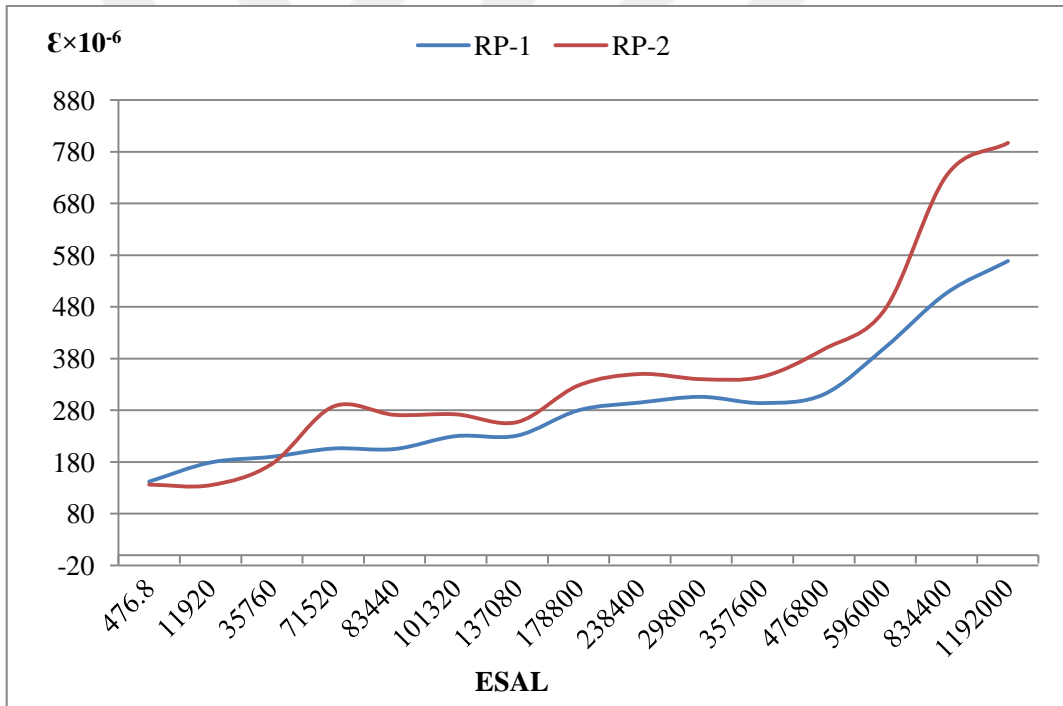
Şekil 3.48. Doğu şeridi (RJF) 1. derzde BŞD ölçümleri



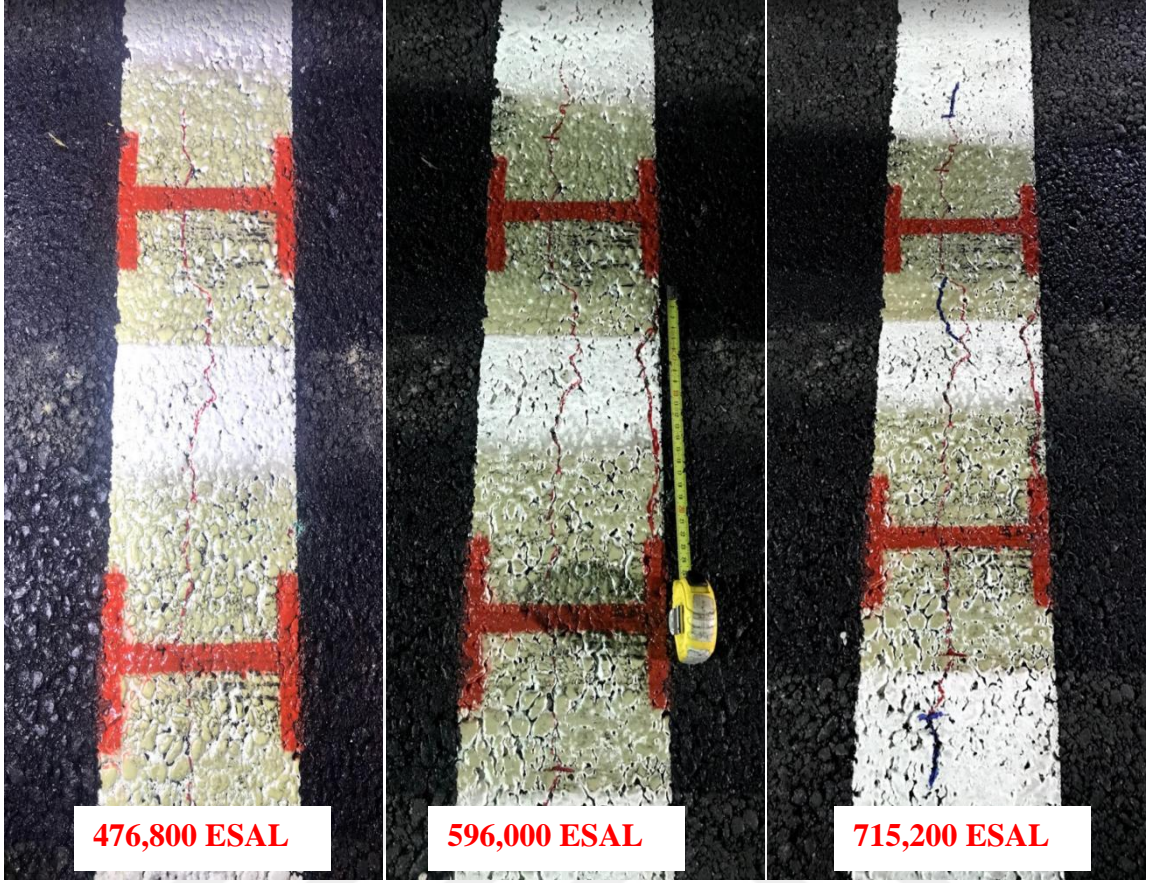
Şekil 3.49. Doğu şeridi (RJF) 1. derzde yansımaya çatlağı ilerlemesi

Şekil 3.50’de verilen 2. derz bölgesindeki BŞD verileri tekerlekler altına yerleştirilen BŞD ölçerlerden okunmuştur. İki BŞD ölçer verileri arasında en fazla %28’lik bir fark bulunmaktadır. Bu farklılığın en önemli sebeplerinden biri, BŞD ölçerlerin beton kaplama üzerine yerleştirilmesi sırasında altına serilen asfalt kaplama kalınlığıdır. BŞD ölçerlerin yerleştirilmesi sırasından azami derecede dikkat gösterilmiş olsa da, asfalt kaplama serimi sonrasında yüzeyden alınan profometre ölçümlerinde iki BŞD ölçerler arasında yaklaşık 5-10 mm arasında değişen kot farklılıkları saptanmıştır. Bu derzde, 476,800 ESAL’e geldiğinde kılcal olarak yaklaşık 570 mm uzunluğunda ilk yansımaya çatlakları belirmeye başlamıştır. Bu değer batı şeridi ile kıyaslandığında RP güçlendirmesi kullanılması durumunda asfalt kalınlığının iki katına çıkarılmasının yansımaya çatlağını oluşum süresini yaklaşık 7 kat artırdığı tespit edilmiştir. Tekil olarak büyümeye devam eden bu yansımaya çatlağına paralel şekilde 596,000 ESAL’dan sonra 220 mm uzunluğunda yeni bir çatlak

ortaya çıkmış, ilk çatlak toplam 140 mm uzunluğunda iki doğrultuda uzamıştır. Her iki çatlak yaklaşık olarak 715,200 ESAL'e kadar 60 mm uzunluğunda büyümüş ve iki çatlak ortasında 80 mm uzunluğunda yeni bir çatlak oluşmuştur. 858,240 ESAL'e ulaşıldığında, tüm çatlaklar yaklaşık 100 mm kadar uzayarak devam etmiş ve bu değerden sonra son halini almıştır. Çatlakların başlama dönemine denk gelen BŞD değer aralığı $350-400 \times 10^{-6}$ mertebesidir. Bu değer aralığı, asfalt kaplama kalınlığı değişse de tasarlanan BŞD ölçerlerin $350-400 \times 10^{-6}$ mertebelerinde değer okumasıyla, asfalt kaplamalarda çatlak oluşumunun başladığının habercisi olmuştur. RP-1 ve RP-2 ölçüm aletleri bu şeritteki testin sonuna kadar veri almaya devam etmiş ve en fazla 797×10^{-6} mertebesinde BŞD ölçümü okunmuştur. Çatlak ilerleme evreleri Şekil 3.51'de son hali Şekil 3.52'de gösterilmektedir.



Şekil 3.50. Doğu şeridi (RP) 2. derzde BŞD ölçümleri

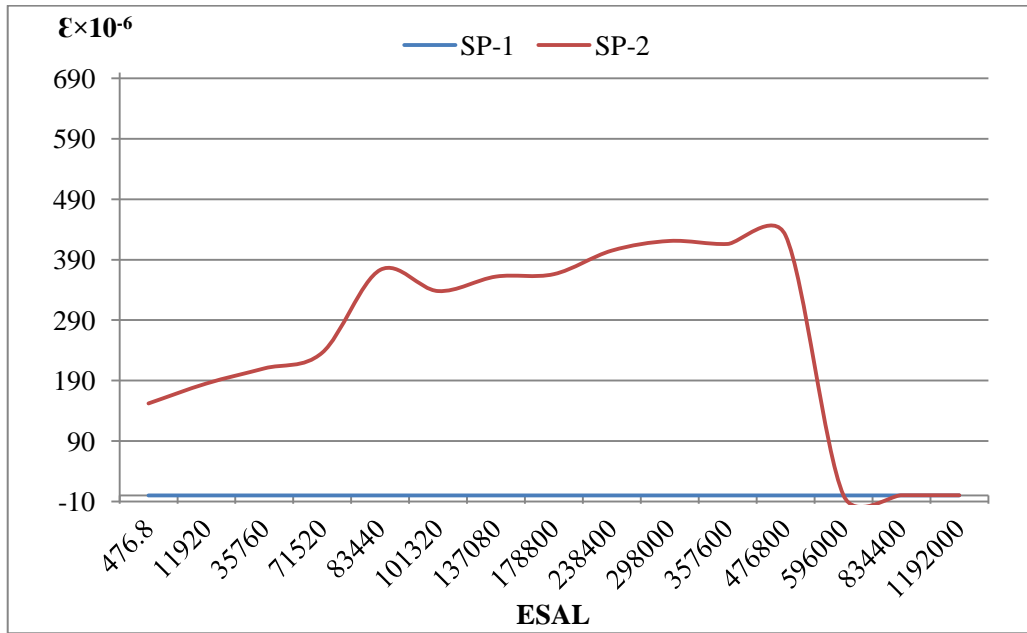


Şekil 3.51. Doğu şeridi (RP) 2. derzde yansımaya çatlağı ilerlemesi

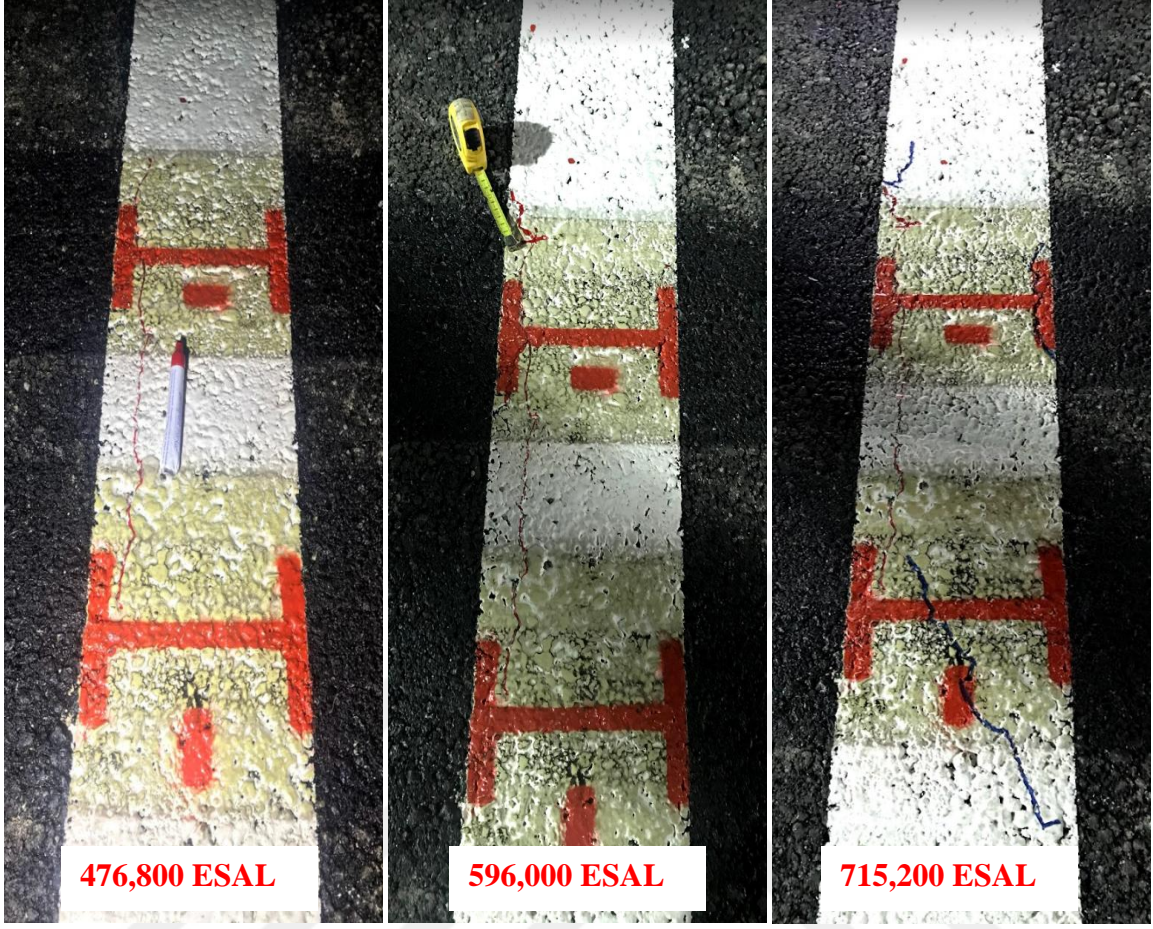


Şekil 3.52. Doğu şeridi (RP) 2. derzde yansımaya çatlağı son hali

Şekil 3.53'te verilen 3. derz bölgesindeki BŞD verileri tekerlekler altına yerleştirilen BŞD ölçerlerden okunmuştur. SP-1 ölçüm aleti yerleştirme sırasında koptuğundan ölçüm alınamamıştır. Bu derzde, 476,800 ESAL'e gelindiğinde kılcal olarak yaklaşık 460 mm uzunluğunda ilk yansıma çatlakları belirmeye başlamıştır. Bu değer batı şeridi ile kıyaslandığında SP güçlendirmesi kullanılması durumunda asfalt kalınlığının iki katına çıkarılmasının yansıma çatlaklarının oluşum süresini yaklaşık 7 kat artırdığı tespit edilmiştir. Tekil olarak büyümeye devam eden bu yansıma çatlakları 596,000 ESAL'den sonra 90 mm uzamıştır. 715,200 ESAL'e ulaşıldığında, ilk çatlakın 80 mm uzadığı görülmüş ve 250 mm uzunluğunda yeni bir çatlak dalı oluşmuştur. Ayrıca 160 mm uzunluğunda paralel yeni bir çatlak oluşmuştur. 858,240 ESAL'e ulaşıldığıdaysa paralel ikinci çatlak 60 mm daha uzamış ve bu değerden sonra son halini almıştır. Bu derzde oluşan yansıma çatlakları süresi batı şeridiyle (50 mm kalınlık) kıyaslandığında oluşum süresinin yaklaşık 48 katına çıktığı görülmüştür. Ayrıca batı şeridinde çelik levhanın güçlendirme elemanı olarak kullanılmasının sakıncaları görülmüşse de bu şeritte asfalt kaplama kalınlığının iki katına çıkarılmasıyla birlikte bu olumsuz etki yansıma çatlakları oluşum süresi göz önünde bulundurulduğunda 48 kat azaltılmıştır. 476,800 ESAL'e kadar okuma alınabilmiştir. Ancak bu geçiş sayısından sonra 416×10^{-6} mertebesinde son BŞD değeri okunmuş ve ölçüm aleti işlevini yitirmiştir. Çatlakların ilerleme aşamaları Şekil 3.54 ve 3.55'te gösterilmektedir.



Şekil 3.53. Doğu şeridi (SP) 3. derzde BŞD ölçümleri

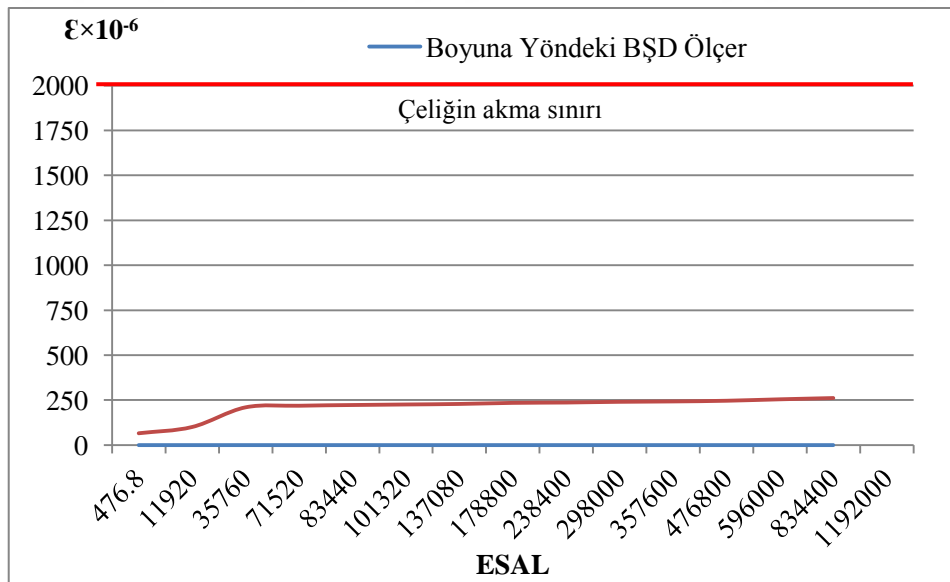


Şekil 3.54. Doğu şeridi (SP) 3. derzde yansımaya çatlağı ilerlemesi



Şekil 3.55. Doğu şeridi (SP) 3. derzde yansımaya çatlağı son hali

3. derz güçlendirmesinde kullanılan çelik levha (SP) üzerinde bulunan boyuna ve enine yöndeki BŞD ölçerlerden boyuna yöndeki BŞD ölçer yerleştirildikten bir süre sonra kopmuş ve ölçüm alınamamıştır. Enine yönde yerleştirilen BŞD ölçer ise 65×10^{-6} değerinden başlayarak 255×10^{-6} mertebelerine kadar ilerleme kaydetmiştir (Şekil 3.56). Birinci geçişle ellinci geçiş arasında oluşan BŞD değerleri arasındaki yaklaşık 4 katlık fark, asfalt kaplamanın ilk geçişler altında ve sıcaklık etkisiyle boşluk oranının azalmaya başladığının bir göstergesi olarak kabul edilebilir. Sıkışan asfalt, yüzeye uygulanan basıncı alt tabakalara daha iyi aktardığı zaman çelik levhada oluşan BŞD değerlerinin artması beklenen bir durumdur. Bu şeritte 1,192,000 ESAL sonrasında enine yöndeki BŞD değerleri 255×10^{-6} mertebelerindeyken batı şeridinde 315×10^{-6} mertebelerine ulaşmıştır. Çelik levhada oluşan BŞD değerleri açısından inceleme yapıldığında, asfalt kaplama kalınlığının iki katına çıkarılmasının BŞD değerlerini %20 oranında azalttığı anlaşılmıştır. Bu şeritte boyuna yöndeki BŞD değerleri ölçülemediği olsa da batı şeridinden elde edilen verilerden yola çıkılarak $1,000-1,200 \times 10^{-6}$ mertebelerinde oluşması beklenmektedir. Buradan hareketle, her iki yönde oluşan BŞD değerleri çeliğin bilinen (%2 yani $2,000 \times 10^{-6}$) akma değerinin altında kaldığı tespit edilmiştir.



Şekil 3.56. Doğu şeridi çelik levhadaki BŞD ölçümleri

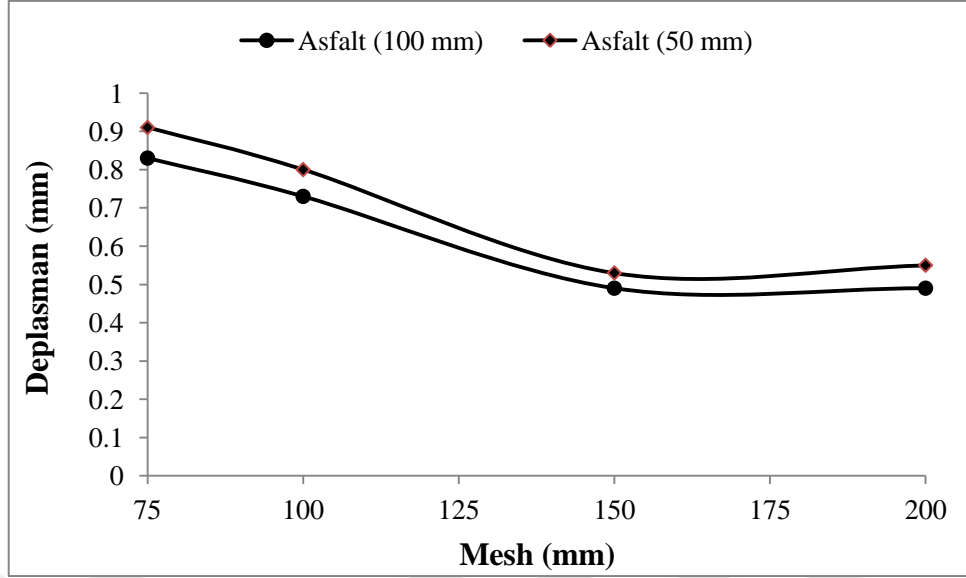
3.4. SE Analiz Bulguları

KTÜ HYT tesisinde tam ölçekli olarak testleri yapılan beton üstü asfalt kaplamalar, sonlu elemanlar yöntemiyle modellenerek ANSYS programında analiz edilmiştir. Bu kapsamda öncelikle beton kaplama ve zemin modelleri hazırlanmış ve HYT tesisindeki yüklemeye benzer olacak şekilde üzerinden hareketli yük geçirilmiştir. Daha sonra beton kaplamanın üzeri 50 ve 100 mm kalınlığındaki asfalt ile kaplanarak farklı modeller hazırlanmış ve üzerinden hareketli yük geçirilerek asfalt kaplama ile beton kaplama arasından BŞD ve gerilme değerleri okunmuş, beton kaplamanın düşey deplasman sonuçları alınmıştır. Analizlerde sırasında sonlu eleman boyutları 75, 100, 150 ve 200 mm olarak değiştirilmiş en uygun eleman boyutu seçilerek kullanılmaya başlanmıştır.

SE modellemelerinin yapılmasındaki ana hedeflerden biri, beton kaplama derz bölgelerine yerleştirilen güçlendirme elemanlarının genişliklerinin optimize edilmesidir. Bu bağlamda, Bölüm 2.3 Tablo 2.2’de de isimleri gösterilen tüm modeller hazırlanarak analiz edilmiştir. Son olarak analizlerden alınan SE sonuçları, HYT tesisinden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılarak modellerinin doğruluğu tartışılmıştır.

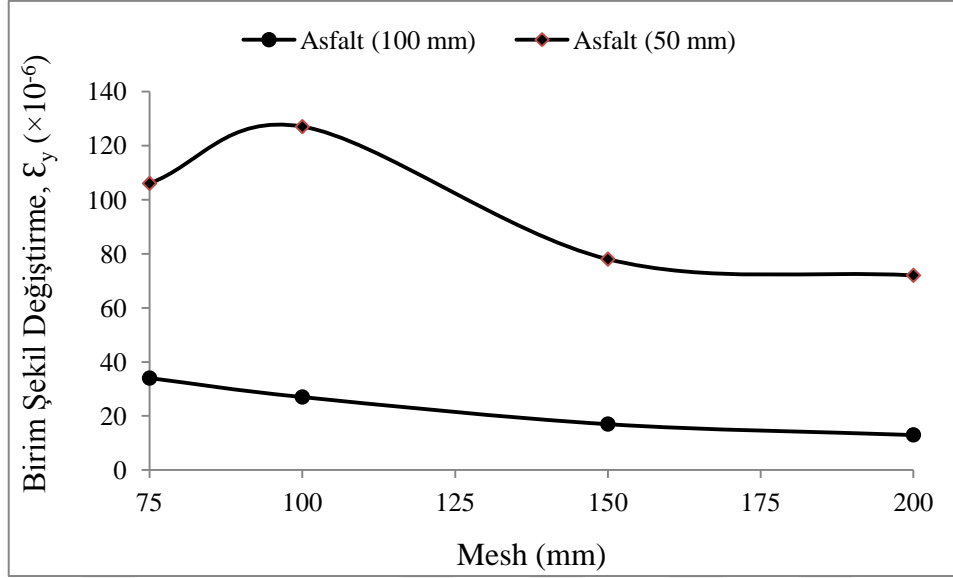
3.4.1. SE Modellerinin Boyut Analizi

SE analizlerinde, sonlu eleman boyutlarının küçülmesiyle daha hassas sonuçların alındığı bilinmektedir. Ancak eleman sayısı arttıkça çözülecek denklem sayısı ve analizin tamamlanması için gereken süre de artmaktadır. Bu sebeple, SE modelleri hazırlanırken 4 farklı boyut seçilerek sonuçlara etkisi irdelenmiştir. Farklı sonlu eleman boyutları kullanılarak, beton üstü asfalt kaplama modellerinde deplasman, gerilme ve BŞD değerleri alınmış ve en uygun SE boyutuna karar verilmiştir. Şekil 3.57’de görüldüğü gibi 150 ve 200 mm boyutları kullanıldığında elde edilen deplasman sonuçları birbirine oldukça yakınken 100 ve 75 mm’lik boyutların kullanılması durumunda deplasman değerleri yaklaşık %50’lik artış göstermiş ve bu iki boyut için birbirine yakın sonuçlar elde edilmiştir.

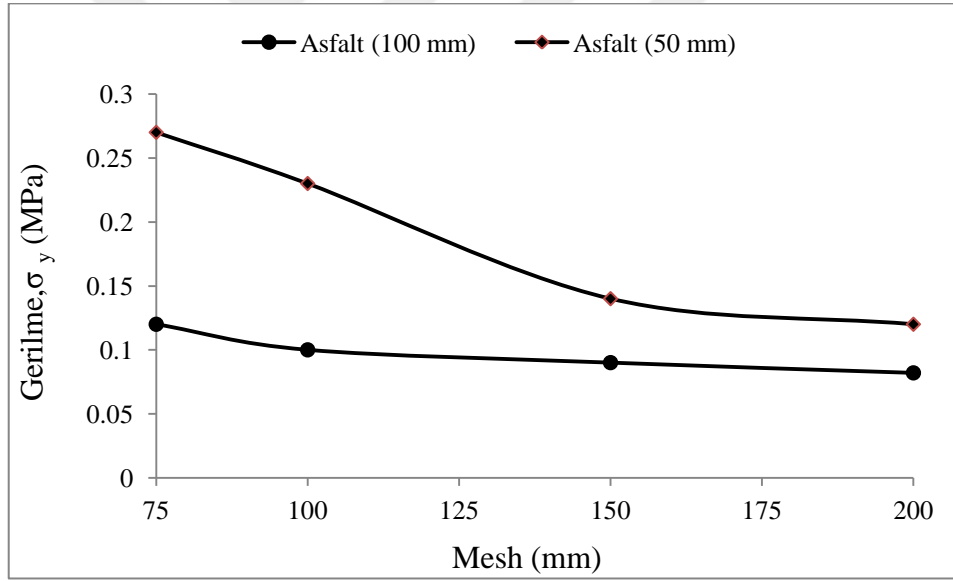


Şekil 3.57. Mesh boyutunun deplasman değişimine etkisi

Şekil 3.58’de mesh boyutunun BŞD değerlerine etkisi incelenmiş ve deplasman değişimindeki gibi bir değişim olduğu tespit edilmiştir. Ancak BŞD değerlerinde farklı olarak 50 mm kalınlığındaki asfalt tabakasının kullanılmasında 100 mm boyuttan 75 mm’lik boyuta geçilirken BŞD değerlerinde düşüş olduğu anlaşılmıştır. Mesh boyutunun küçülmesiyle sonuçların önemli bir değişiklik gösterdiği tespit edilmişse de belirli bir değerden sonra küçültülmesi BŞD örneğinde olduğu gibi maksimum elde edilen değerden uzaklaşılmasına neden olabilmektedir. Bu nedenle mesh boyutu ayarlanırken en küçük eleman boyutunun seçilmesinden ziyade en doğru eleman boyutunun seçilmesi daha önemlidir. Bu bağlamda, SE analizleri için mesh boyutu olarak 100 mm kullanılmasına karar verilmiştir. Ayrıca Şekil 3.59’daki gerilme değerleri incelendiğinde 75 mm ile 100 mm boyutları arasında önemli bir değişimin olmadığı görülmüş olup, veri depolama ve analiz süresi açısından 75 mm yerine 100 mm değerinin kullanılması daha doğru bulunmuştur.



Şekil 3.58. Mesh boyutunun BŞD değişimine etkisi

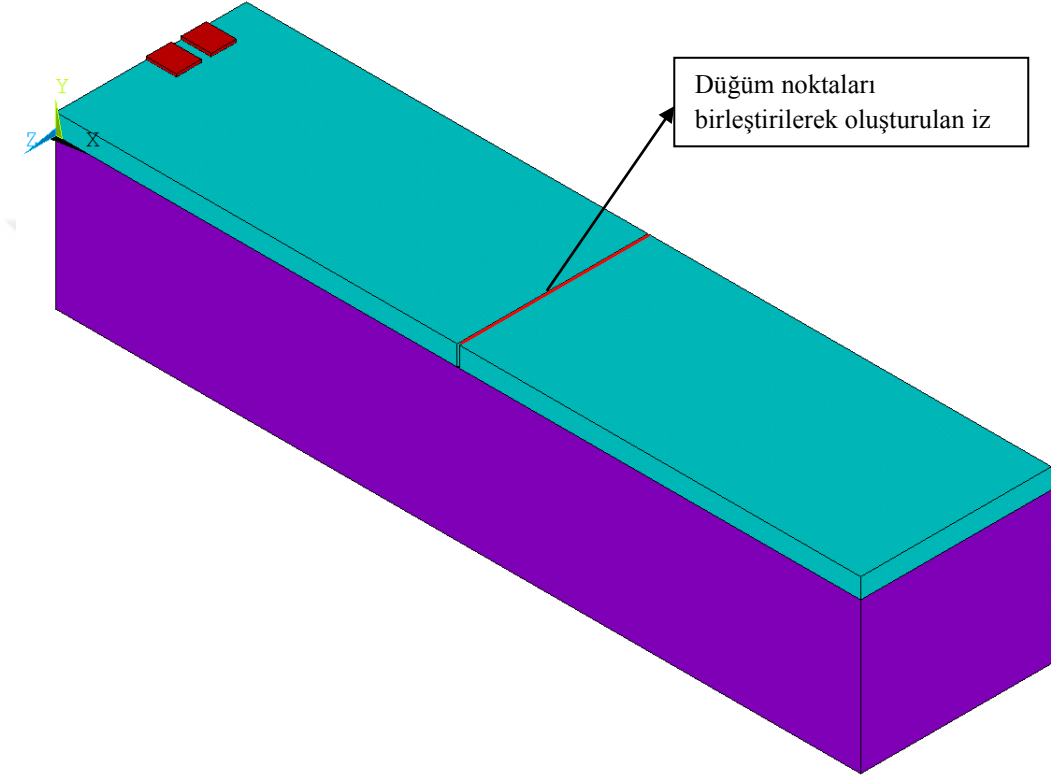


Şekil 3.59. Mesh boyutunun gerilme değişimine etkisi

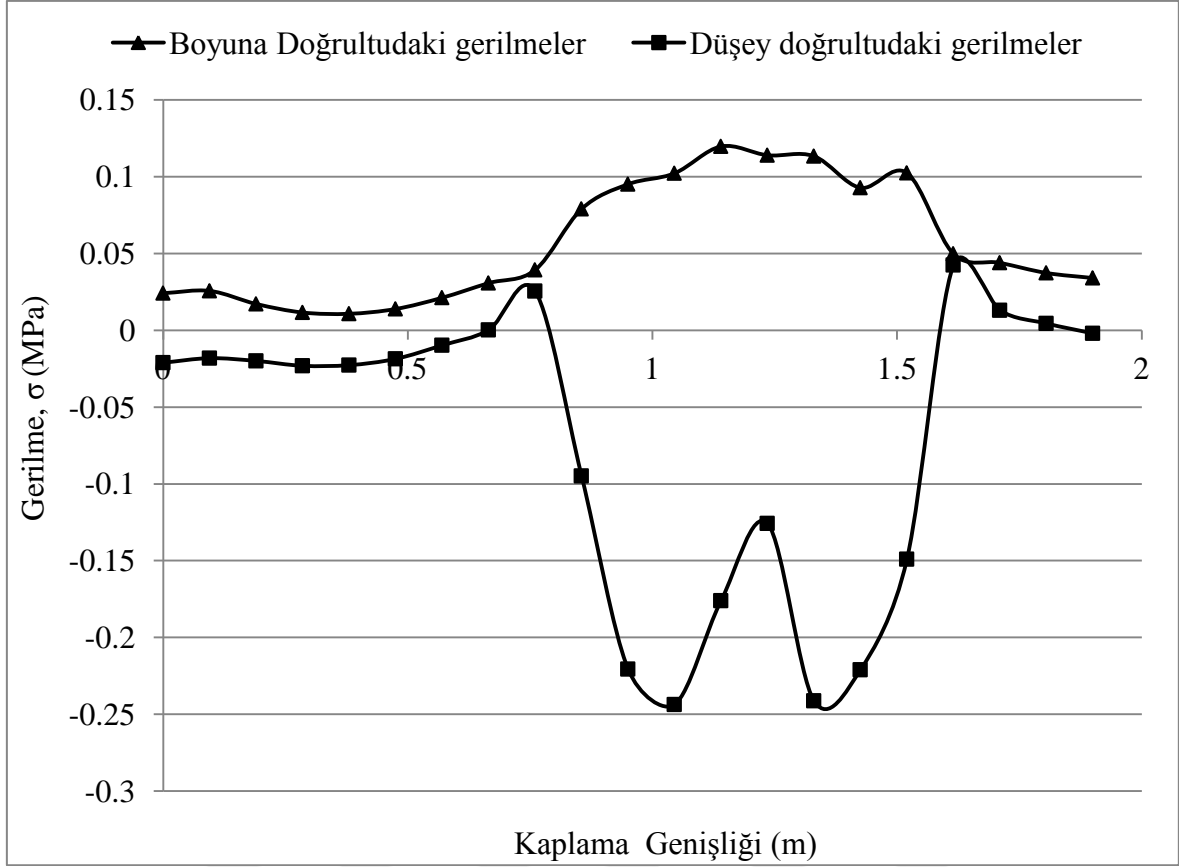
3.4.2. Beton Kaplama Modeli Sonuçları

SE yöntemiyle beton kaplama modeli hazırlandıktan sonra, HYT tesisindeki yüklemeyi temsil edecek şekilde hareketli yük uygulanmıştır. Tek bir geçiş sonucunda beton kaplamanın derz bölgesinde düşey ve boyuna doğrultudaki gerilmelerle ve düşey deplasman hareketliliği incelenmiştir. Sonuçların alındığı düğüm noktaları birleştirilerek bir iz belirlenmiş (Şekil 3.60) ve bu izden elde edilen gerilme sonuçları Şekil 3.61’de ve

düŖey deplasman hareketliliği Ŗekil 3.62’de gösterilmiŖtir. Hareketli yük tam olarak derz üstünden geçtiği anda sonuçlar alınmıŖtır. Bu uygulamanın sebebi, tekerlekler derz üzerinden geçerken beton kaplama düŖey deplasman hareketinin maksimum seviyede olmasıdır. Son olarak Ŗekil 3.64’te görüleceği üzere SE sonuçları ile HYT tesisinden elde edilen deplasman sonuçları karşılaŖtırılmıŖtır.

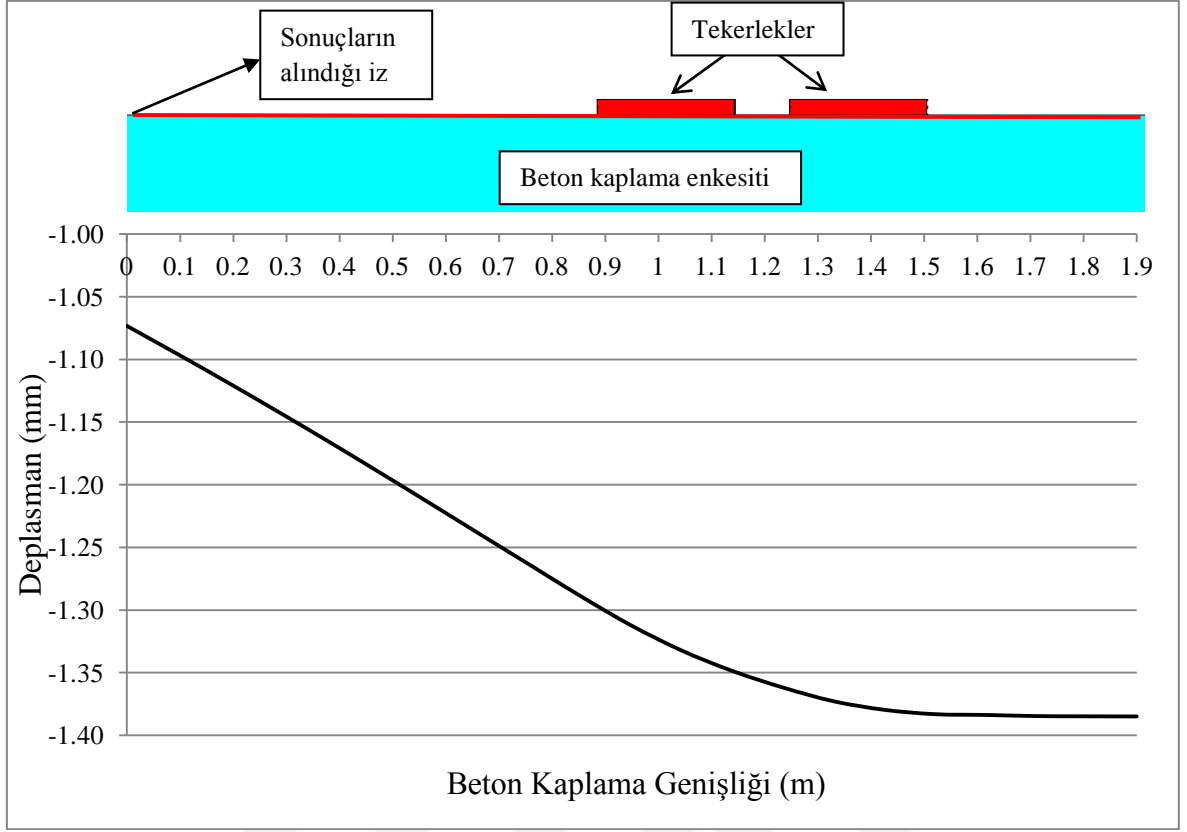


Ŗekil 3.60. Beton kaplama modelinde sonuçların alındığı iz

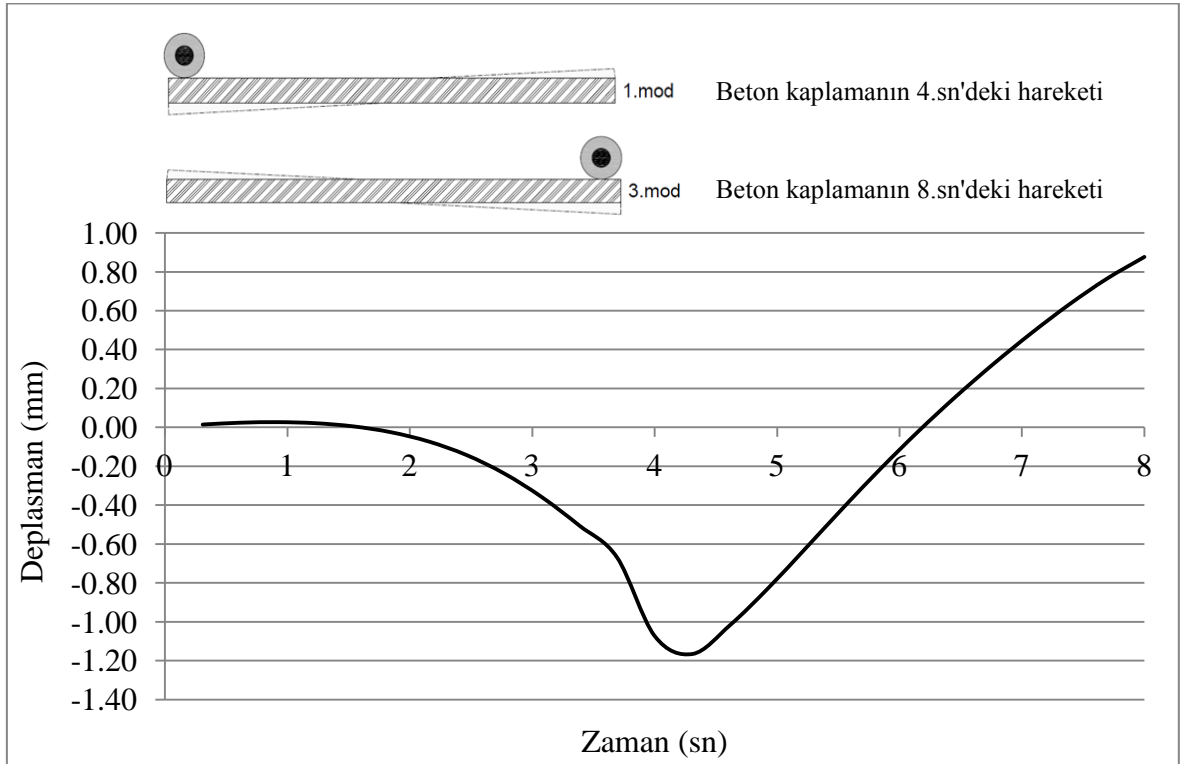


Şekil 3.61. Beton kaplama derz bölgesinde oluşan düşey ve boyuna yöndeki gerilmeler

Şekil 3.61’de beton kaplama derz bölgesinde oluşturulan iz boyunca oluşan düşey ve boyuna yöndeki gerilme dağılımı gösterilmiştir. Düşey doğrultuda tekerlekler altına en fazla 0.25 MPa basınç gerilmesi oluşurken, boyuna doğrultuda iki teker arasında 0.12 MPa çekme gerilmesi oluşmaktadır. Beton kaplamanın basınç dayanımı (25 MPa) göz önünde bulundurulduğunda derz bölgesinde oluşan basınç gerilmesinin betonun basınç dayanımının yaklaşık 1/100’i kadar olduğu anlaşılmaktadır. Derz bölgesinde oluşan gerilme değerleri beton kaplama için düşük seviyede olmasına rağmen üzeri asfalt ile kaplandıktan sonra yansıma çatlaklarının gelişim sürecinde önemli olacaktır. Beton kaplamada oluşan çekme gerilmeleri basınç gerilmelerine nazaran yaklaşık %50 mertebesindedir. Betonun çekme dayanımı açısından daha hassas olduğu bilinen bir gerçektir. Bu bağlamda, derz bölgelerinin güçlendirme uygulaması sonrasında boyuna doğrultuda oluşan çekme gerilmeleri de takip edilerek güçlendirme elemanlarının yansıma çatlak oluşum sürecindeki katkısı takip edilecektir.

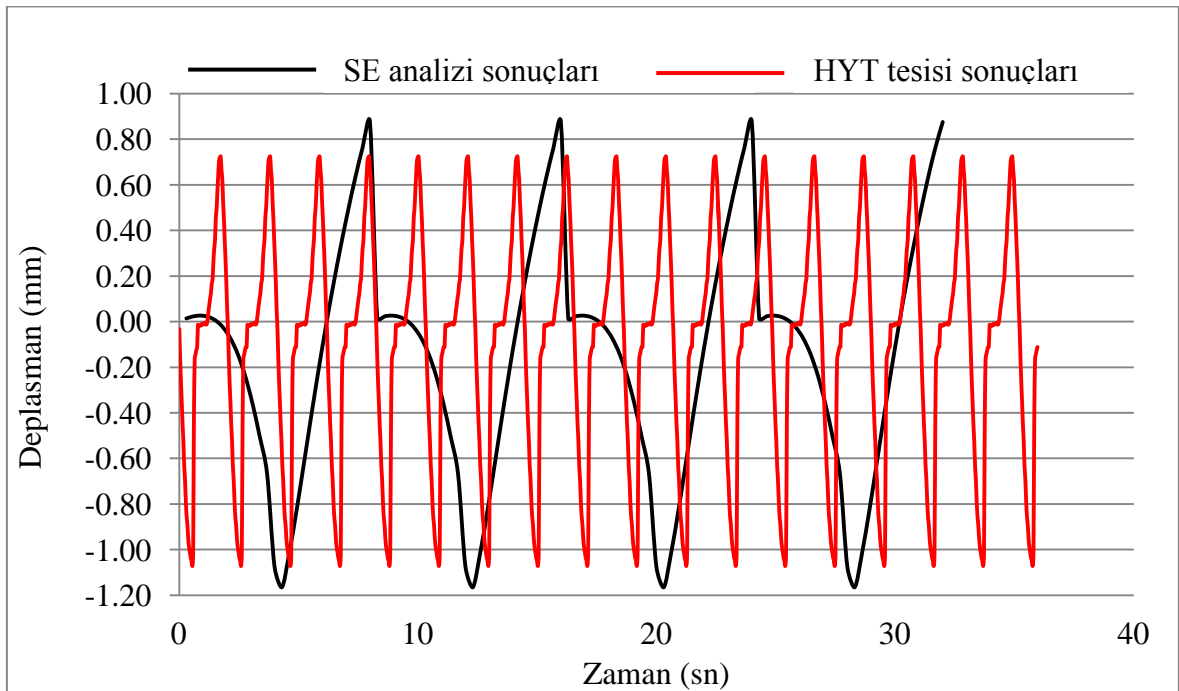


Şekil 3.62. Beton kaplama enkesiti boyunca düşey deplasman hareketi



Şekil 3.63. Beton kaplama derzinde zamana bağlı oluşan modlar ve deplasman mertebesi

Şekil 3.62 incelendiğinde, beton kaplamanın teker yüklemelerine yakın (doğu) kenarında en fazla 1.39 mm deplasman olurken, uzak (batı) kenarında 1.07 mm deplasman olduğu görülmektedir. HYT tesisinde yapılan ölçümler, kaplamanın batı kenarına yerleştirilen PLC ölçüm aletleriyle alınmıştır. Şekil 3.63 ise beton kaplama üzerinden yapılan tek bir geçiş sonunda kaplamanın hangi modlarda hareket ettiğini göstermektedir. Tek bir geçiş 8 sn olacak şekilde modellenmiş olup, tekerlekler derz bölgesine geldiğinde (4. sn'de) 1.07 mm çökme oluşurken, tekerlekler 8. sn'nin sonunda 3. moddaki gibi kaplamanın diğer ucuna ilerleyerek 0.88 mm'lik kabarmaya neden olmaktadır. Aynı hareket prensibine HYT tesisinde elde edilen ölçümlerde de karşılaşılmış olup, hem HYT tesisinde elde edilen sonuç hem de SE analizindeki sonuç Şekil 3.64'te gösterilmiştir. Şekil 3.64'te de görüleceği üzere beton kaplamanın derz bölgesindeki hareketliliği SE ve HYT tesisindeki sonuçlar bakımından oldukça birbirine yakındır. SE analizlerinde toplam deplasman genliği 2.05 mm iken, HYT tesisinde 1.79 mm civarında olup iki ölçüm sonucu arasında %12'lik bir fark bulunmaktadır. SE analizlerinde yapılan modellemelerin gerçek koşulları birebir yansıtmaması istenilmişse de temel tabakası ile beton kaplama arasındaki sürtünme yüzeyinin modelini çıkarmak oldukça karmaşık bir mühendislik problemidir. Buna rağmen sonuçlar arasındaki %12'lik farkın beklenenden daha iyi bir benzerliği yansıttığı düşünülmektedir.



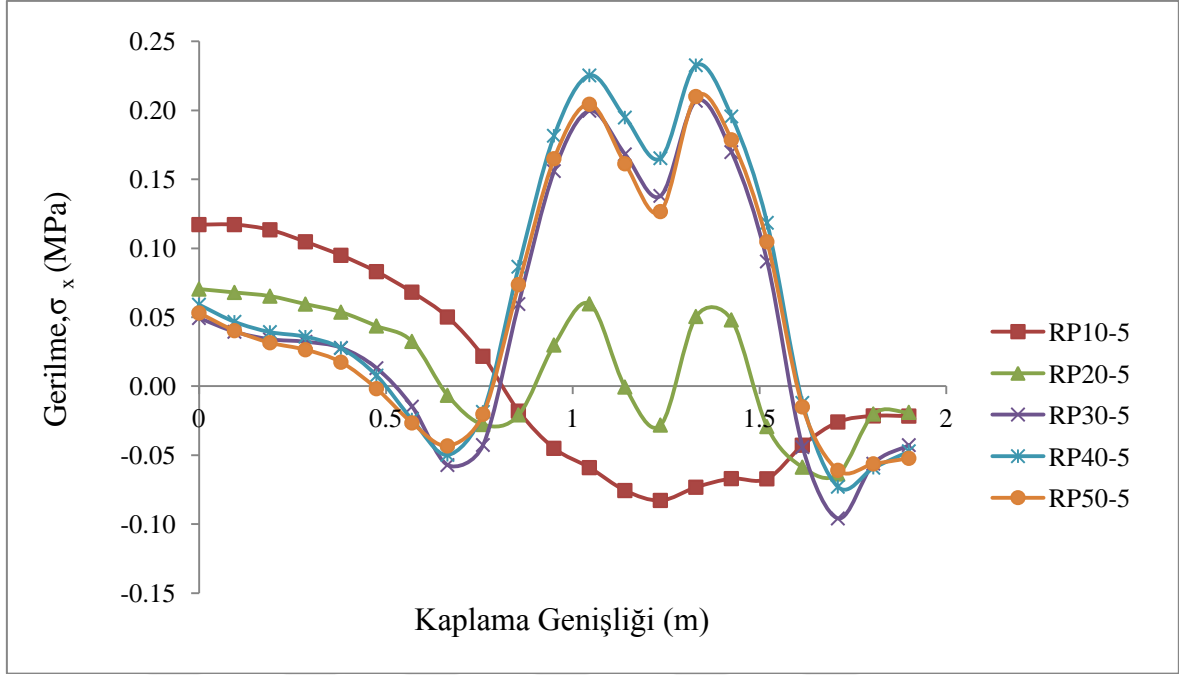
Şekil 3.64. Beton kaplama düşey deplasman hareketinin SE ve HYT tesisindeki sonuçları

3.4.3. Derz Güçlendirme Elemanlarının Boyut Analizi

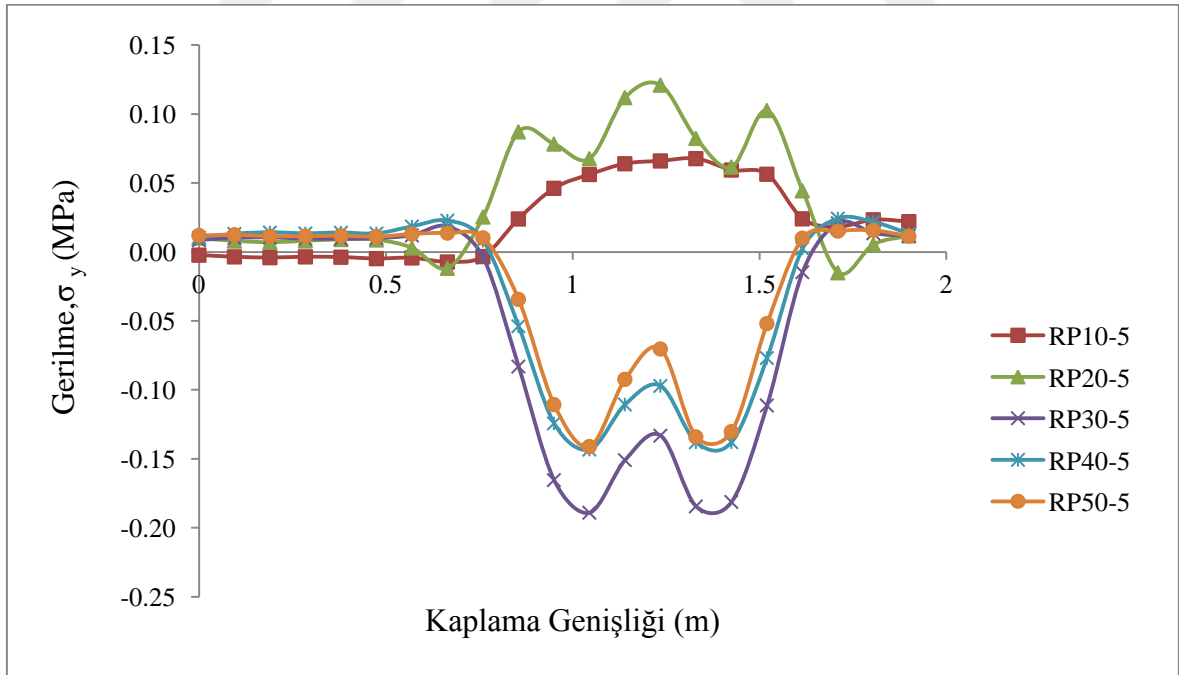
Beton kaplamalar üzerindeki testler tamamlandıktan sonra derz bölgeleri üç farklı türde (RJF, RP ve SP) malzeme kullanılarak güçlendirilmiştir. Derz güçlendirme malzemelerinden RJF, derz içine yerleştirildiğinden derzin tamamı bu malzeme ile doldurulmuş ve boyut problemi bulunmamaktadır. Ancak RP ve SP türündeki malzemeler, derz üstüne kaplanarak uygulanacağından hangi genişlikte uygulanacağına karar verebilmek için 100 mm'den 500 mm'ye kadar farklı genişlikler kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda, farklı boyutlardaki güçlendirme malzemeleri kullanılmasının asfalt ile beton kaplama arasında oluşan BŞD ve gerilme mertebelerine etkisi incelenerek en uygun boyutlara karar verilmiştir.

3.4.3.1. RP Boyut Analizi

Şekil 3.65 ve Şekil 3.66'da 50 mm kalınlığındaki asfalt kaplama ile beton kaplama arasında oluşan boyuna ve düşey doğrultudaki gerilme değerlerinin farklı RP genişlikleri kullanılması durumundaki değişimi gösterilmiştir. Boyuna doğrultudaki gerilme dağılımına göre en düşük değerler 200 mm genişliğindeki RP güçlendirmesinde elde edilirken, düşey doğrultuda en düşük gerilme değerleri 100 mm genişliğindeki RP güçlendirmesinde gözlemlenmiştir.



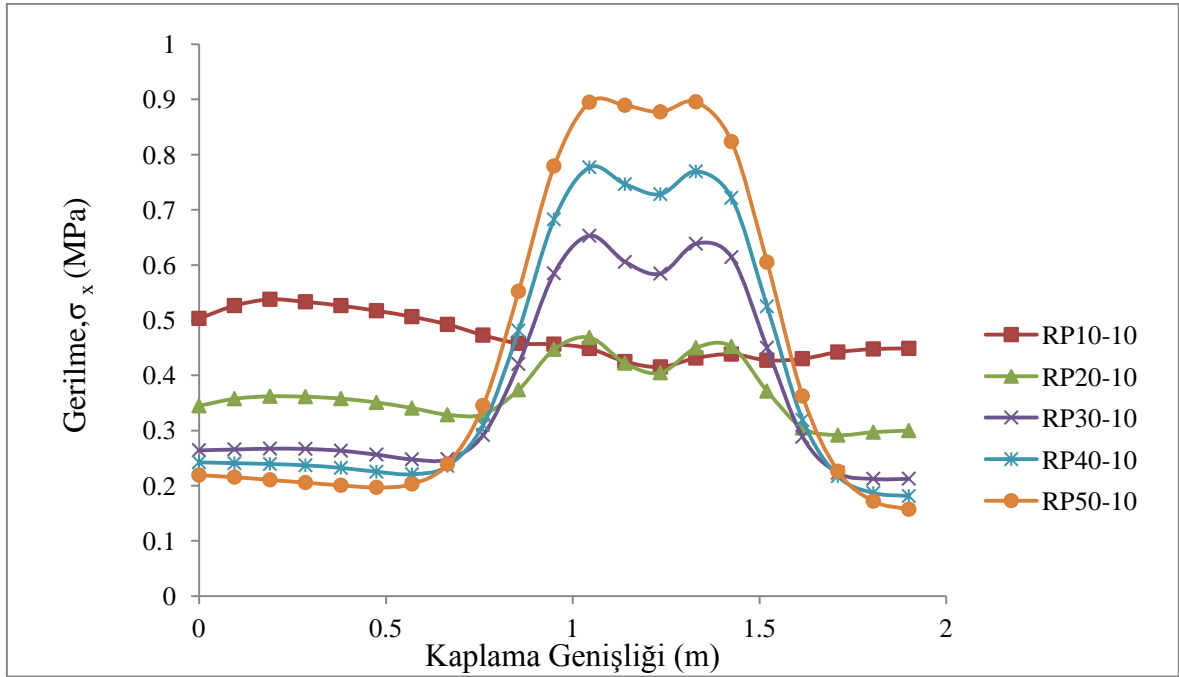
Şekil 3.65. Farklı genişliklerdeki RP güçlendirmesinin 50 mm kalınlığındaki asfalt kaplama altında oluşan boyuna doğrultudaki gerilme değişimine etkisi



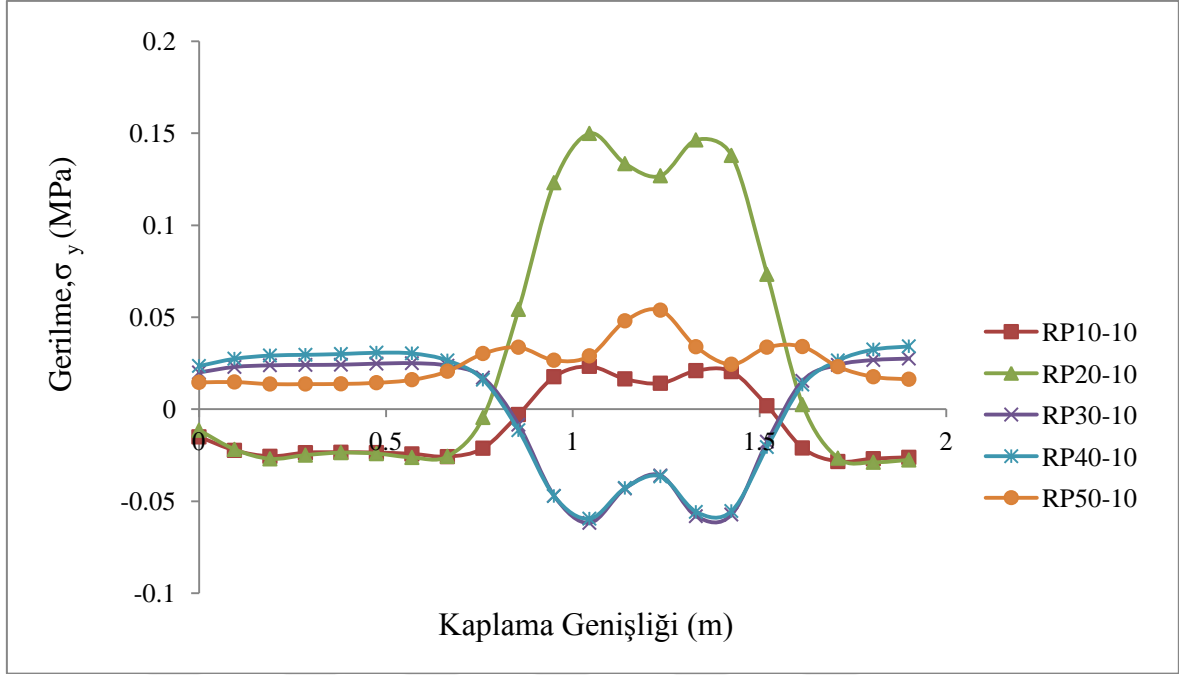
Şekil 3.66. Farklı genişliklerdeki RP güçlendirmesinin 50 mm kalınlığındaki asfalt kaplama altında oluşan düşey doğrultudaki gerilme değişimine etkisi

Şekil 3.67 ve Şekil 3.68'de 100 mm kalınlığındaki asfalt kaplama ile beton kaplama arasında oluşan boyuna ve düşey doğrultudaki gerilme değerlerinin farklı RP genişlikleri

kullanılması durumundaki değişimi gösterilmiştir. Boyuna doğrultudaki gerilme dağılımına göre en düşük değerler birbirine yakın olarak 100 ve 200 mm genişliğindeki RP güçlendirmelerinde elde edilirken, düşey doğrultuda en düşük gerilme değerleri 100 genişliğindeki RP güçlendirmesinde gözlemlenmiştir. Gerilme değerlerinden elde edilen bu sonuçlar RP güçlendirme malzemesinde 100 veya 200 mm genişliği kullanılmasının faydalı olacağını göstermektedir.

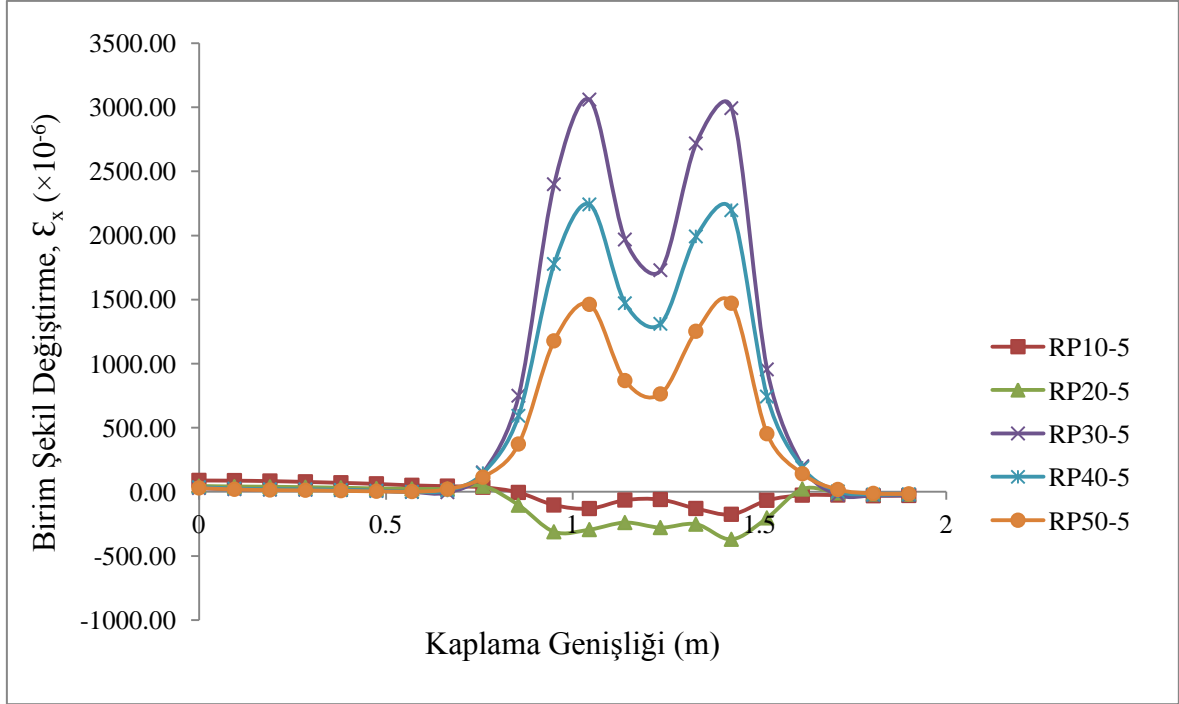


Şekil 3.67. Farklı genişliklerdeki RP güçlendirmesinin 100 mm kalınlığındaki asfalt kaplama altında oluşan boyuna doğrultudaki gerilme değişimine etkisi

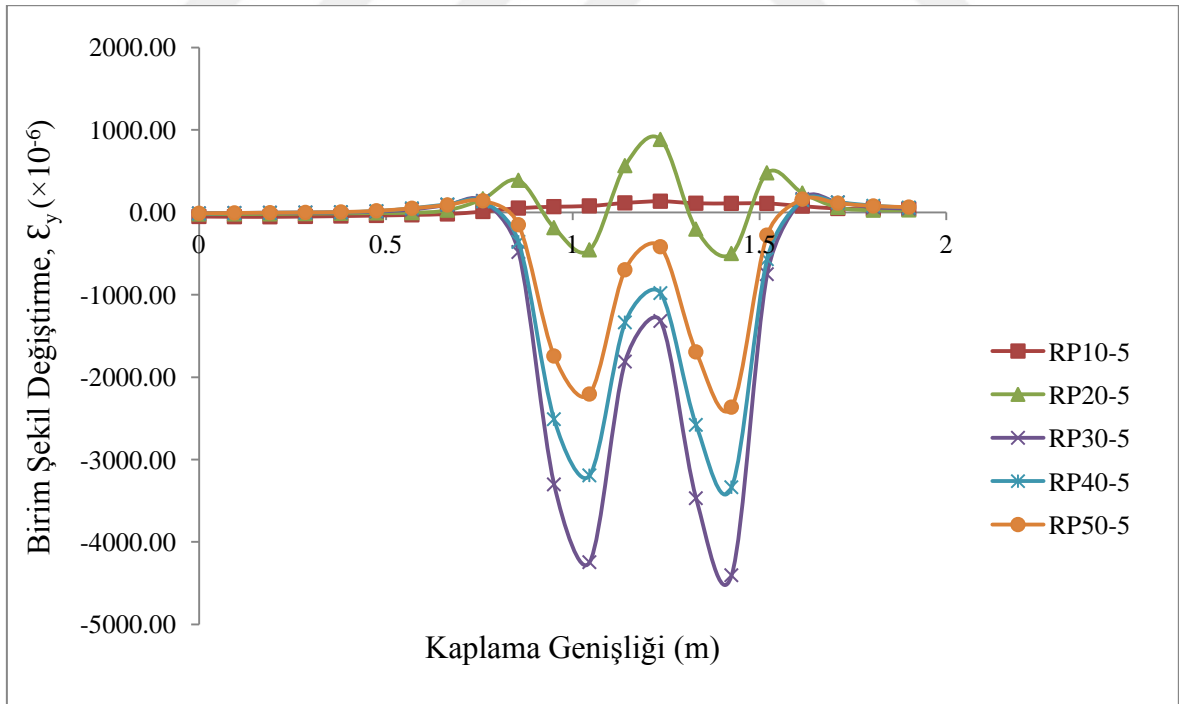


Şekil 3.68. Farklı genişliklerdeki RP güçlendirilmesinin 100 mm kalınlığındaki asfalt kaplama altında oluşan düşey doğrultudaki gerilme değişimine etkisi

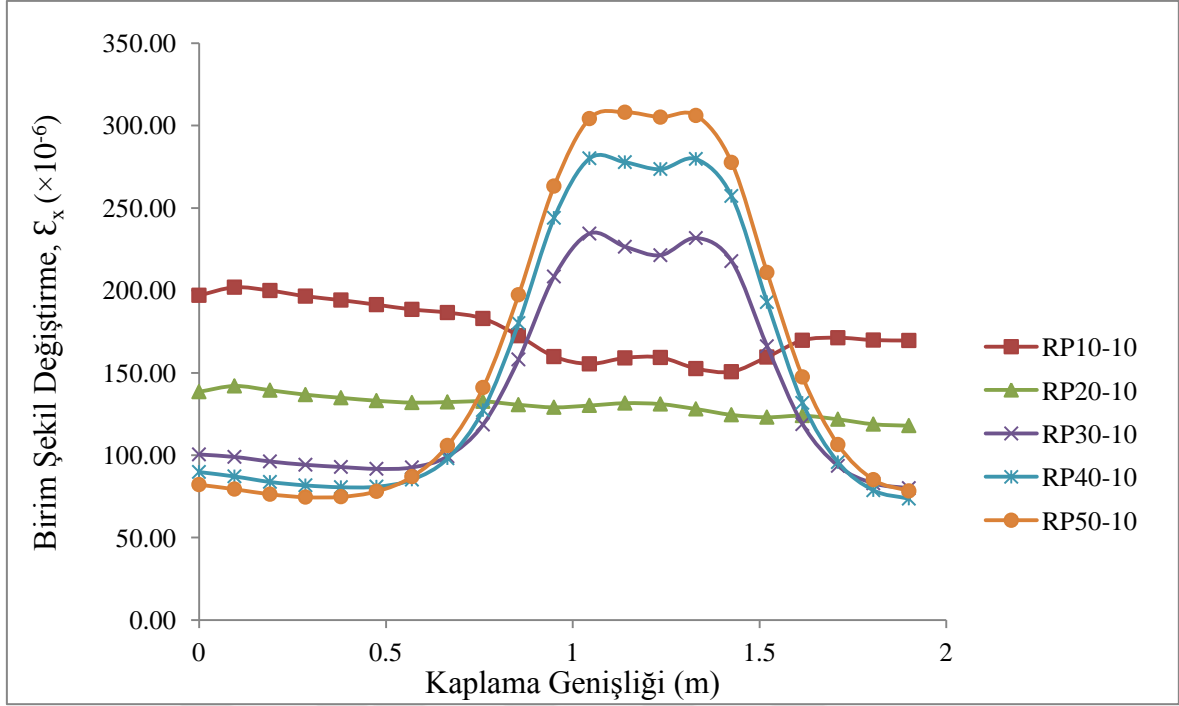
Şekil 3.69-3.72’de 50 mm kalınlığındaki asfalt kaplama ile beton kaplama arasında oluşan boyuna ve düşey doğrultudaki BŞD değerlerinin farklı RP genişlikleri kullanılması durumundaki değişimi gösterilmektedir. Hem boyuna hem de düşey doğrultudaki BŞD değerleri açısından bakıldığında en düşük BŞD değerleri 100 ve 200 mm genişliğinde RP kullanılması durumunda elde edildiği görülmüştür. Aynı durum 100 mm kalınlığındaki asfalt kaplama altında oluşan BŞD değerlerine (Şekil 3.71 ve Şekil 3.72) bakıldığında da tespit edilmiştir. Bütün bu gerilme ve BŞD değerleri bakımından inceleme yapıldığında, 100 mm genişliğindeki RP güçlendirilmesi kullanılmasının en ideal koşulları oluşturduğu ve asfalt kaplamanın zarar görmemesi için gereken minimum gerilme ve BŞD değerlerini verdiği anlaşılmıştır. Ancak HYT tesisinde ve ileride arazide de uygulama kolaylığı açısından minimum 200 mm kullanılmasının uygun olacağı kanaatine varılmıştır.



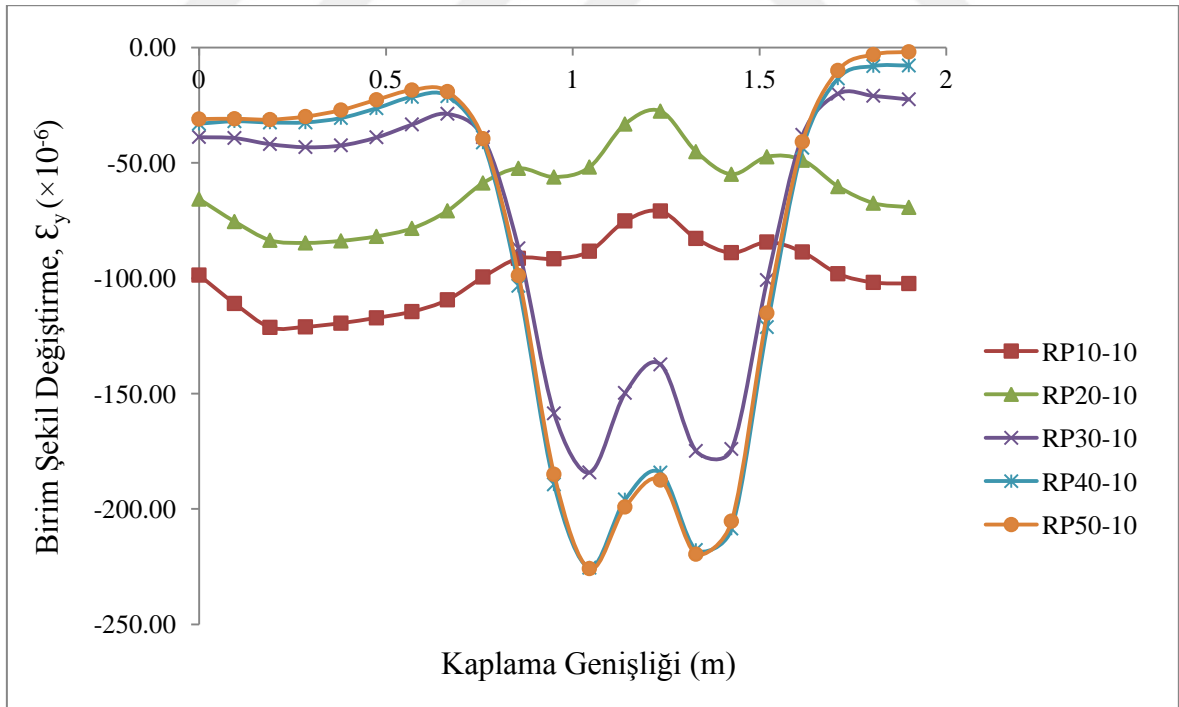
Şekil 3.69. Farklı genişliklerdeki RP güçlendirmesinin 50 mm kalınlığındaki asfalt kaplama altında oluşan boyuna doğrultudaki BŞD değişimine etkisi



Şekil 3.70. Farklı genişliklerdeki RP güçlendirmesinin 50 mm kalınlığındaki asfalt kaplama altında oluşan düşey doğrultudaki BŞD değişimine etkisi



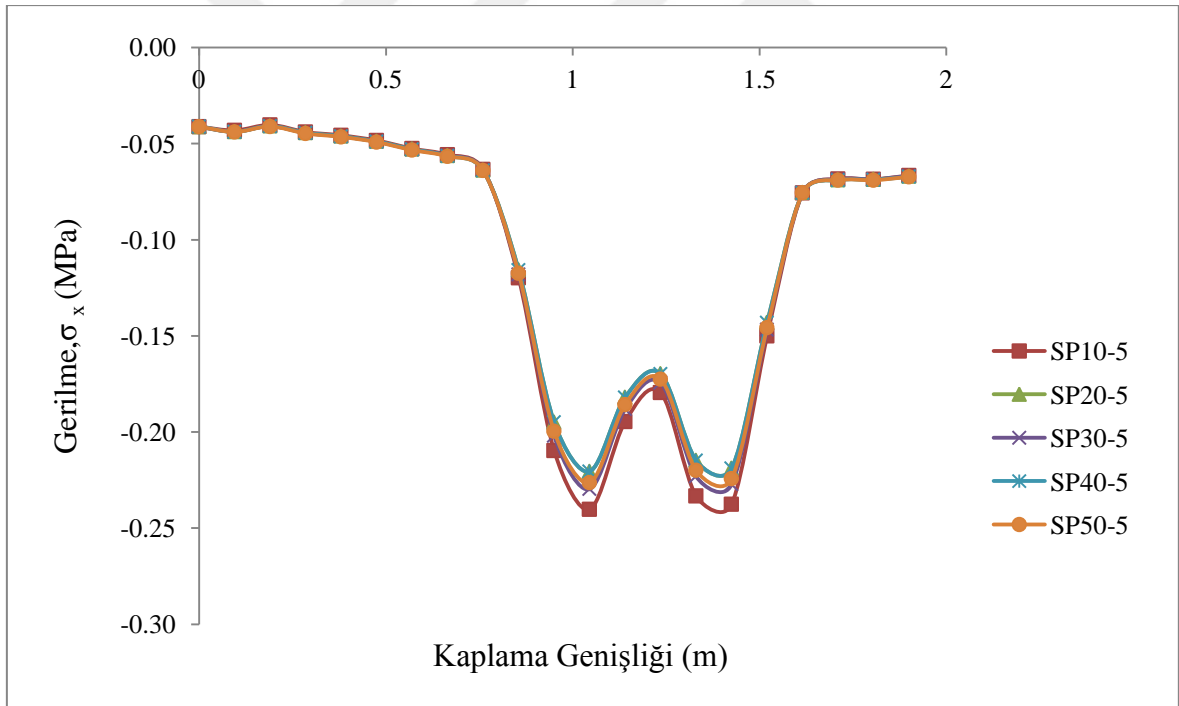
Şekil 3.71. Farklı genişliklerdeki RP güçlendirmesinin 100 mm kalınlığındaki asfalt kaplama altında oluşan boyuna doğrultudaki BŞD değişimine etkisi



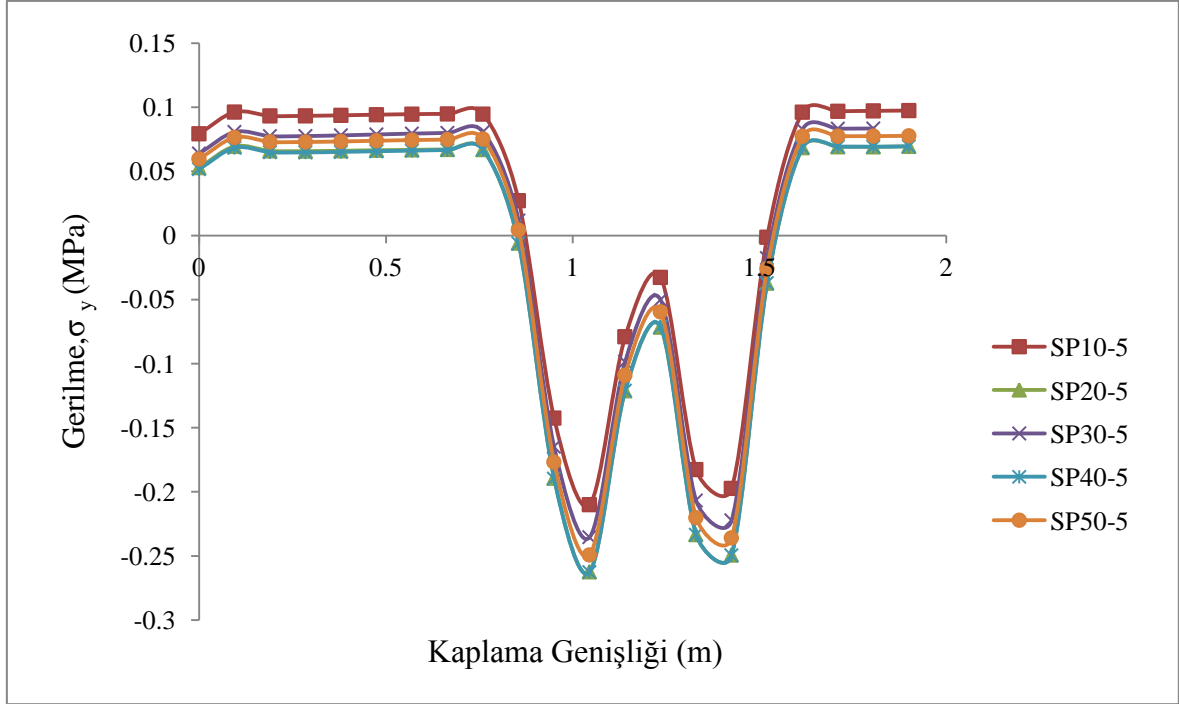
Şekil 3.72. Farklı genişliklerdeki RP güçlendirmesinin 100 mm kalınlığındaki asfalt kaplama altında oluşan düşey doğrultudaki BŞD değişimine etkisi

3.4.3.2. SP Boyut Analizi

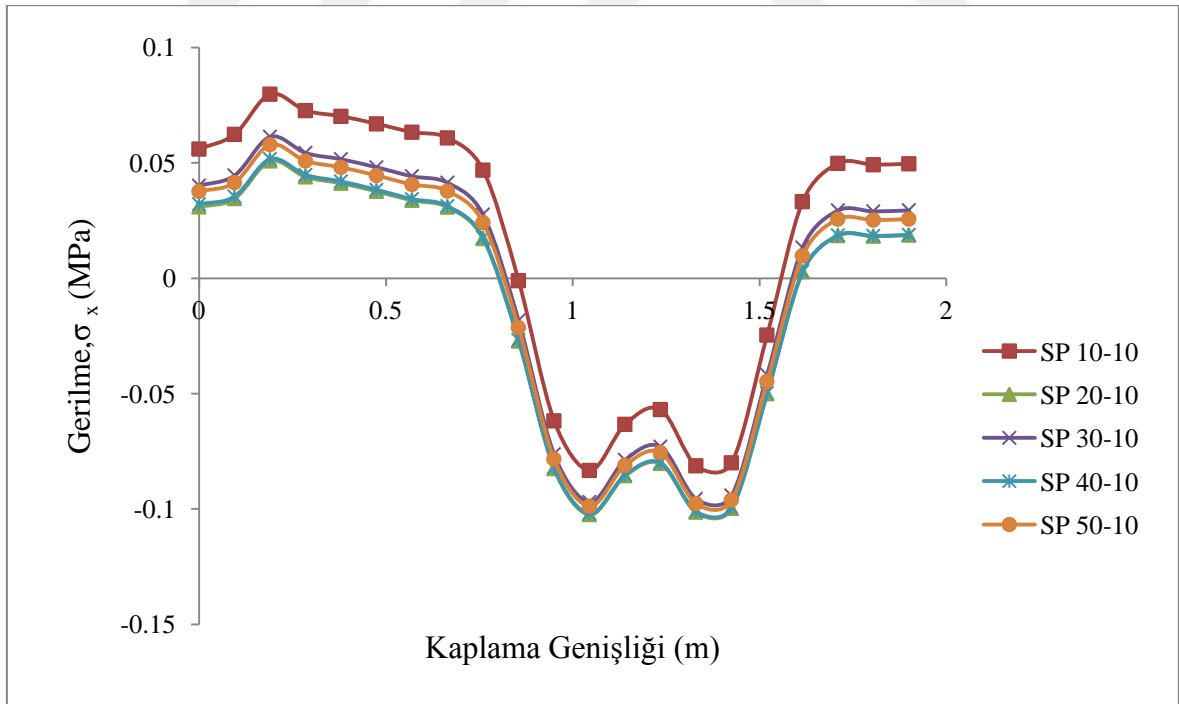
Şekil 3.73-3.76'da, SP genişliğinin asfalt kaplama ile beton kaplama arasında oluşan gerilme değerlerine etkisi gösterilmektedir. Tüm grafikler bir arada değerlendirildiğinde, SP genişlik değişiminin gerilmeler açısından önemli bir farklılık oluşturmadığı anlaşılmıştır. SP genişliğinin gerilmeler açısından önemli bir değişikliğe neden olmayışı, asfalt kaplama altında oluşturulan rijit bir ara yüzeyin beton kaplama gibi davranış gösterdiği sonucuna varılmasını sağlamıştır. Ayrıca boyuna gerilme değerleri incelendiğinde, asfalt kalınlığının iki katına çıkması durumunda gerilmelerin yaklaşık %50 oranında azaldığı anlaşılmıştır. Düşey gerilmeler ise asfalt kalınlığının iki katına çıkması durumunda 2.5 kat azalmıştır. Bu veriler ışığında, asfalt kaplama kalınlığının artmasının alt yüzeyinde oluşan gerilmeleri önemli ölçüde azalttığı söylenebilmektedir.



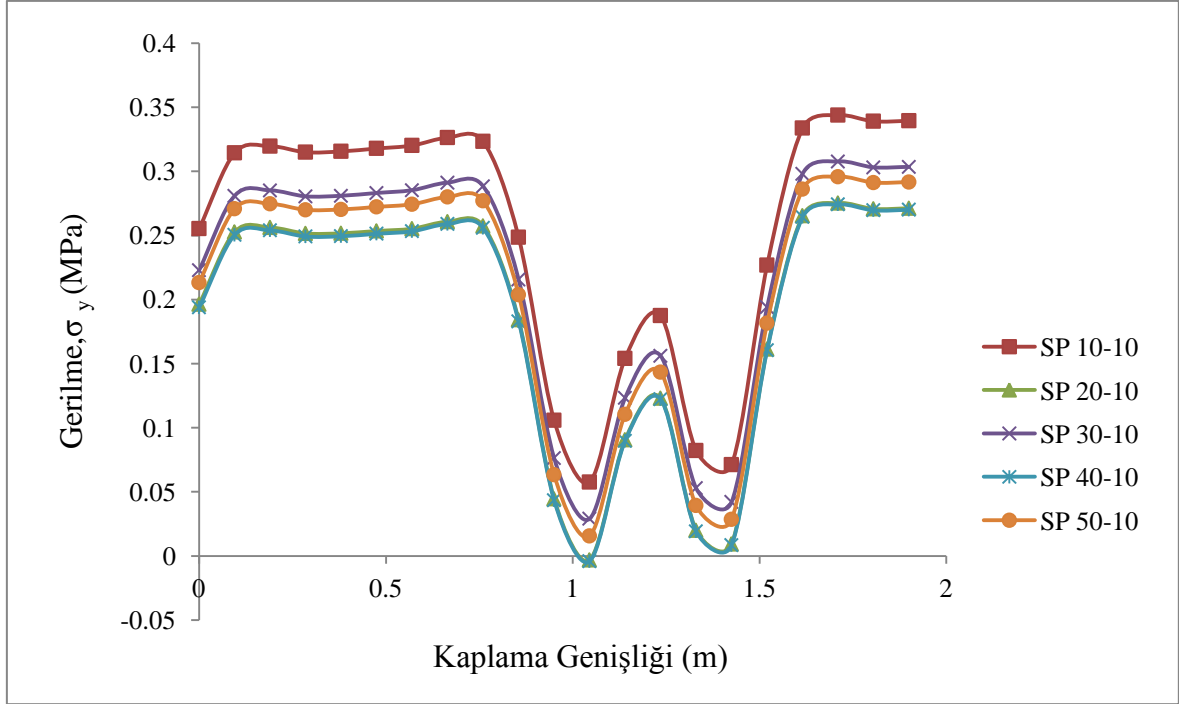
Şekil 3.73. Farklı genişliklerdeki SP güçlendirmesinin 50 mm kalınlığındaki asfalt kaplama altında oluşan boyuna doğrultudaki gerilme değişimine etkisi



şekil 3.74. Farklı genişliklerdeki SP güçlendirmesinin 50 mm kalınlığındaki asfalt kaplama altında oluşan düşey doğrultudaki gerilme değişimine etkisi

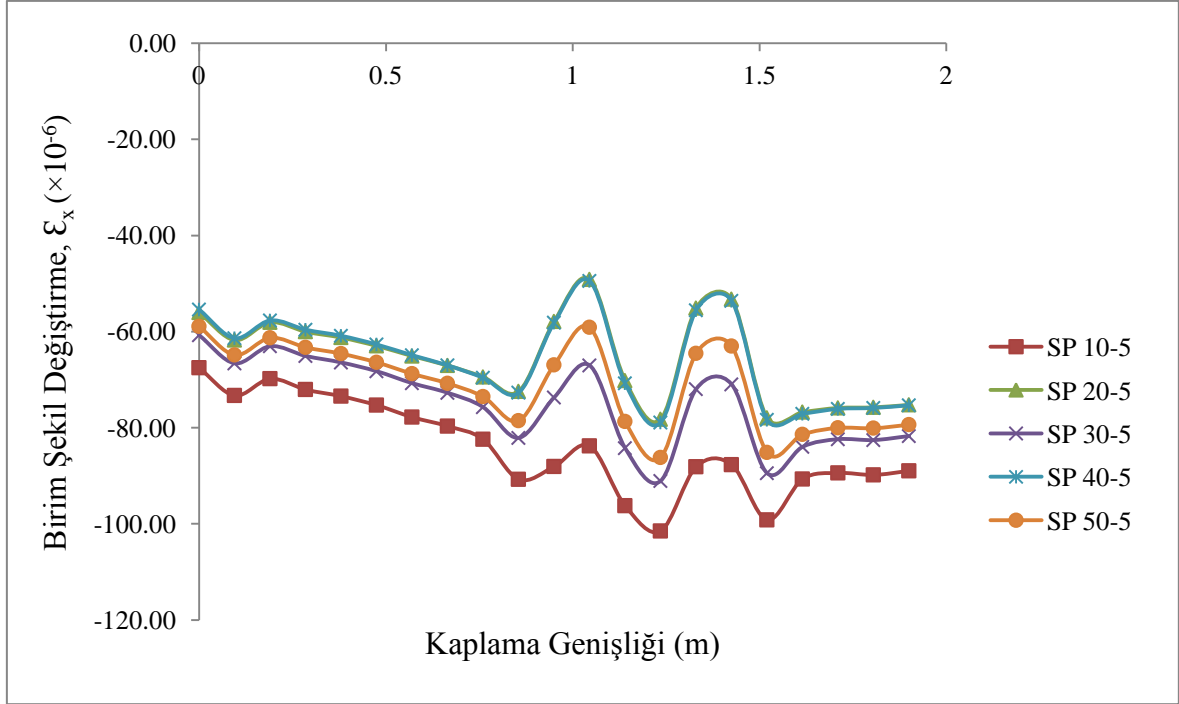


şekil 3.75. Farklı genişliklerdeki SP güçlendirmesinin 100 mm kalınlığındaki asfalt kaplama altında oluşan boyuna doğrultudaki gerilme değişimine etkisi

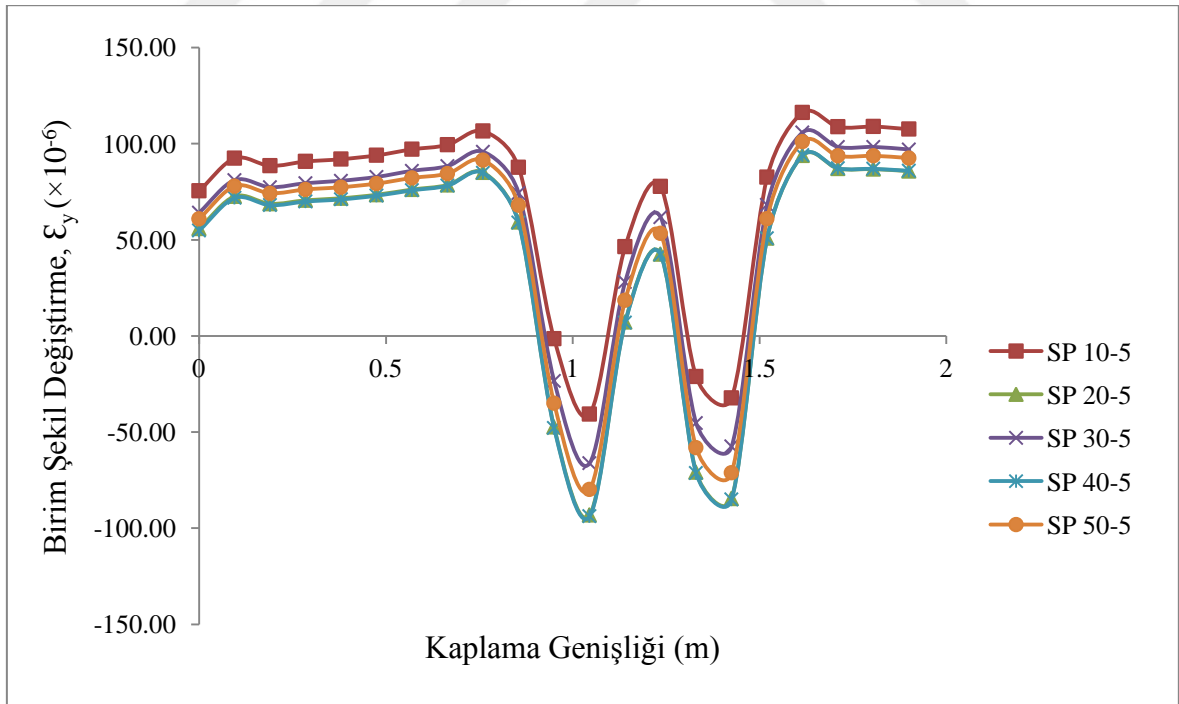


şekil 3.76. Farklı genişliklerdeki SP güçlendirmesinin 100 mm kalınlığındaki asfalt kaplama altında oluşan düşey doğrultudaki gerilme değişimine etkisi

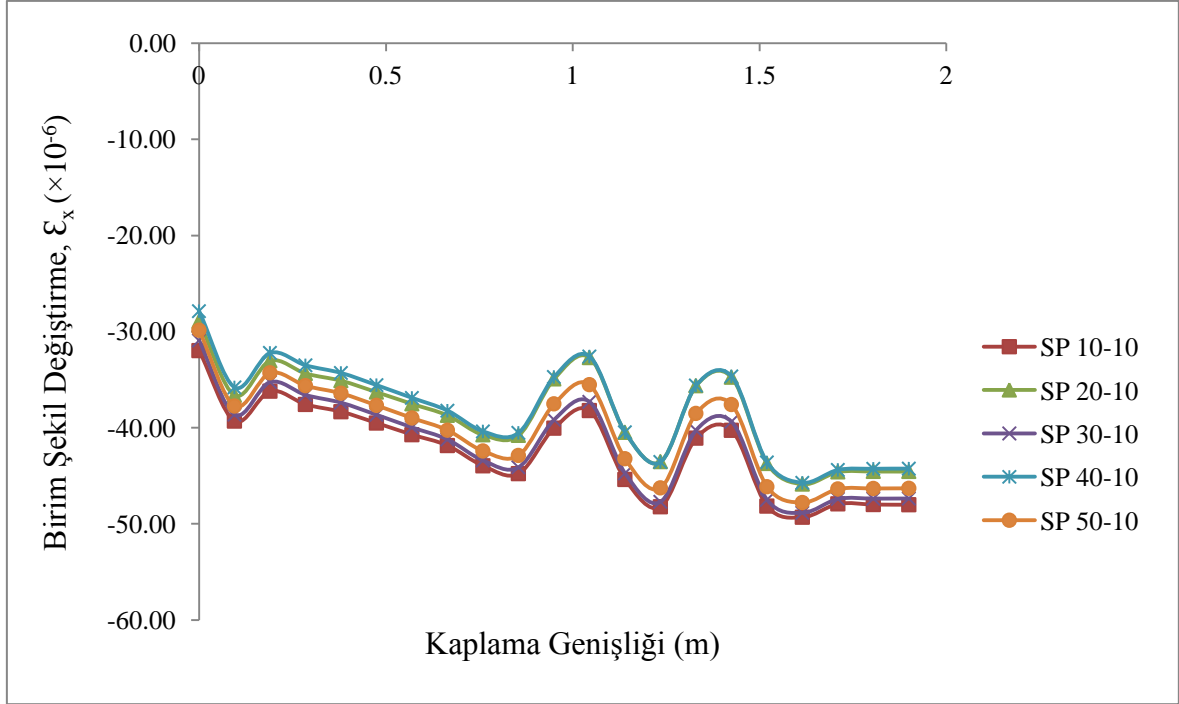
şekil 3.77-3.80'de 50 mm kalınlığındaki asfalt kaplama ile beton kaplama arasında oluşan boyuna ve düşey doğrultudaki BşD değerlerinin farklı SP genişlikleri kullanılması durumundaki değişimi gösterilmektedir. Boyuna düşey doğrultudaki BşD değerleri açısından BşD değerleri incelendiğinde, 200 mm genişliğinde güçlendirme yapılmasının en az BşD değerini oluşturduğu tespit edilmiştir. Gerilmeler açısından belirgin bir farklılık tespit edilmese de BşD değerleri açısından 200 mm genişliğinde SP güçlendirmesinin kullanılması minimum değerleri oluşturmuştur.



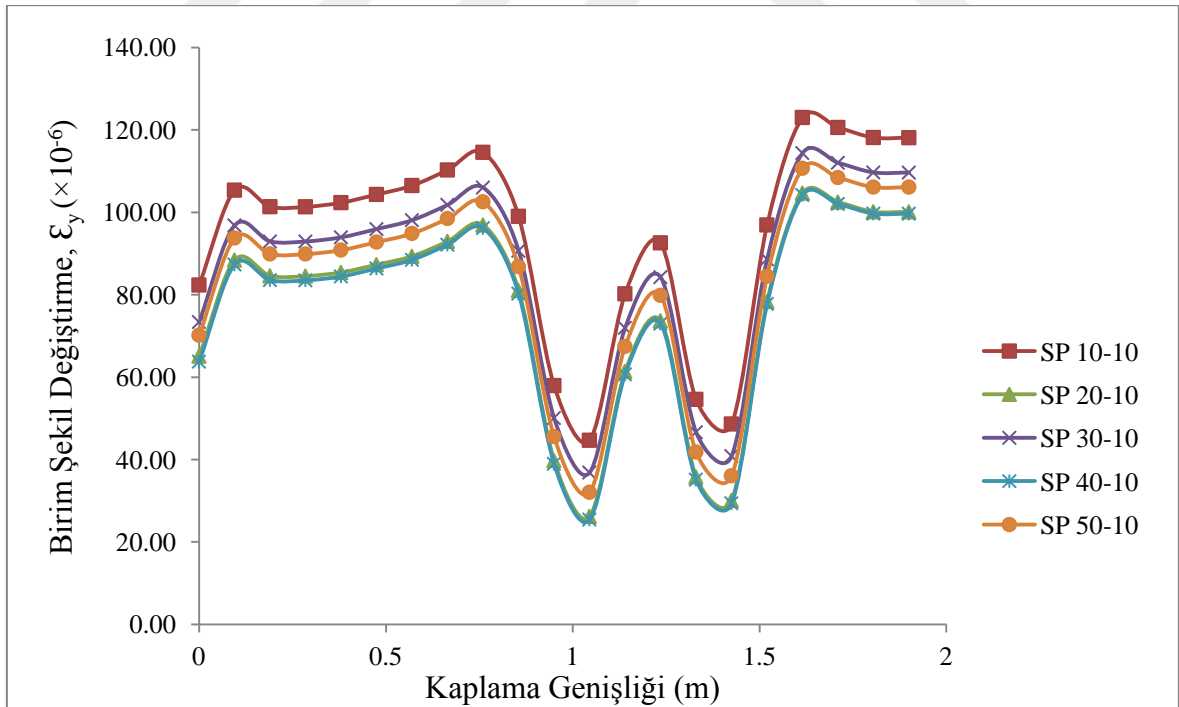
Şekil 3.77. Farklı genişliklerdeki SP güçlendirmesinin 50 mm kalınlığındaki asfalt kaplama altında oluşan boyuna doğrultudaki BŞD değişimine etkisi



Şekil 3.78. Farklı genişliklerdeki SP güçlendirmesinin 50 mm kalınlığındaki asfalt kaplama altında oluşan düşey doğrultudaki BŞD değişimine etkisi



Şekil 3.79. Farklı genişliklerdeki SP güçlendirmesinin 100 mm kalınlığındaki asfalt kaplama altında oluşan boyuna doğrultudaki BŞD değişimine etkisi



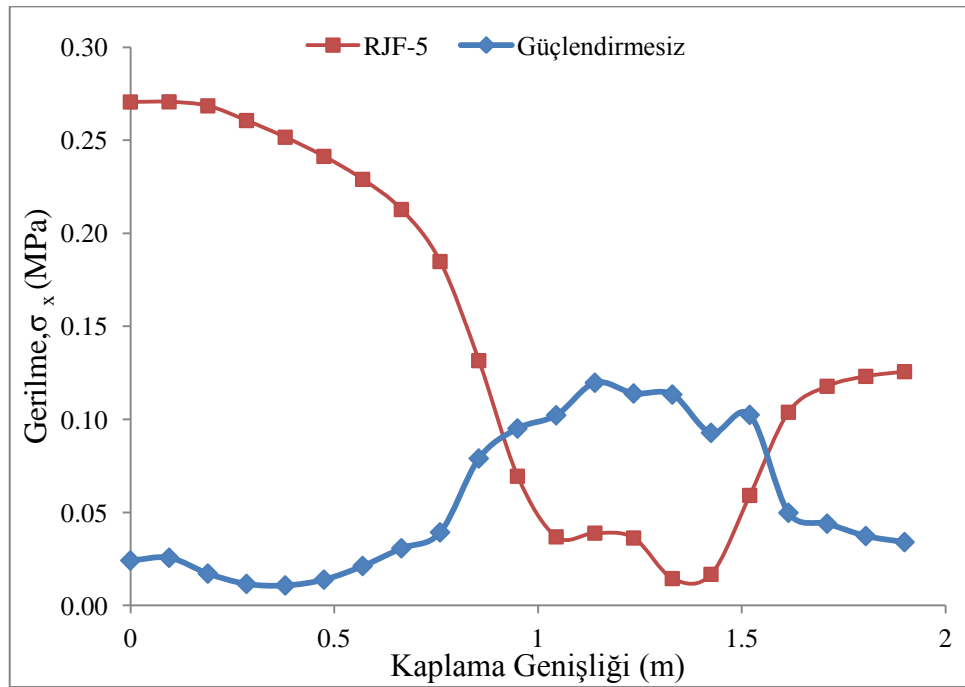
Şekil 3.80. Farklı genişliklerdeki SP güçlendirmesinin 100 mm kalınlığındaki asfalt kaplama altında oluşan düşey doğrultudaki BŞD değişimine etkisi

3.4.4. Derz Güçlendirme Elemanlarının Beton Kaplama Derz Bölgesinde Oluşan Gerilmeler Üzerindeki Etkisi

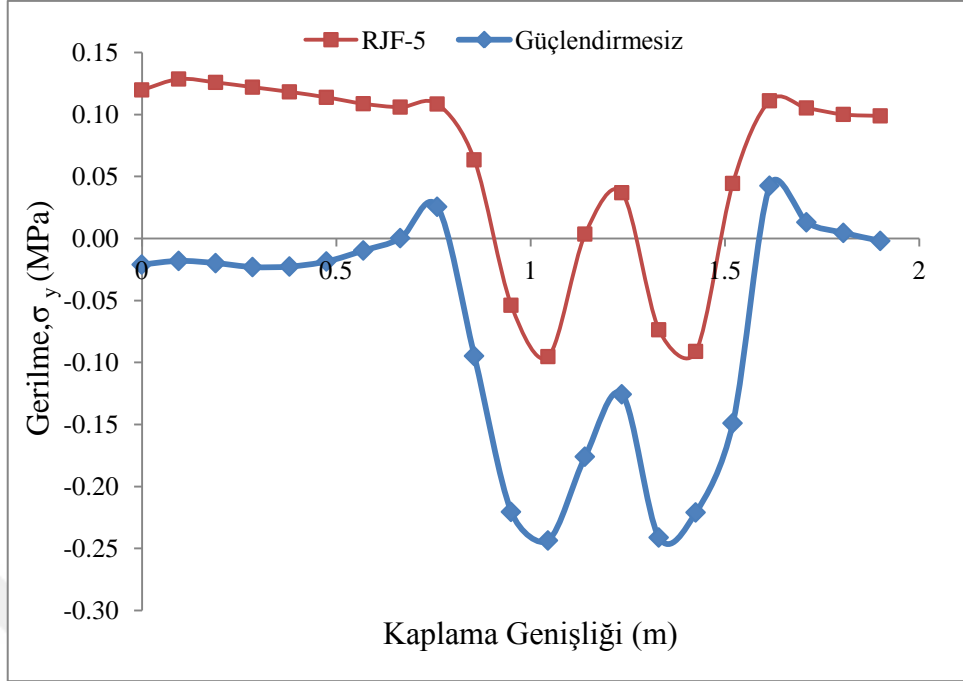
Bölüm 3.4.2 Şekil 3.61’de, betonun asfalt ile kaplanmadan önce yapılan analizlerinde derz köşe bölgesindeki iz boyunca oluşan boyuna ve düşey doğrultudaki gerilmeler verilmişti. Bu bölümde, beton kaplama asfalt ile kaplanıp farklı güçlendirme elemanlarıyla güçlendirildikten sonra beton kaplama derz bölgesinde oluşan gerilmeler incelenecektir. Bu sayede, asfalt kaplama kalınlığının ve derz güçlendirme yöntemlerinin derz köşe bölgelerinde oluşan gerilmeleri hangi oranda azalttığı belirlenmiş olacaktır.

3.4.4.1. RJF Güçlendirme Türünün Etkisi

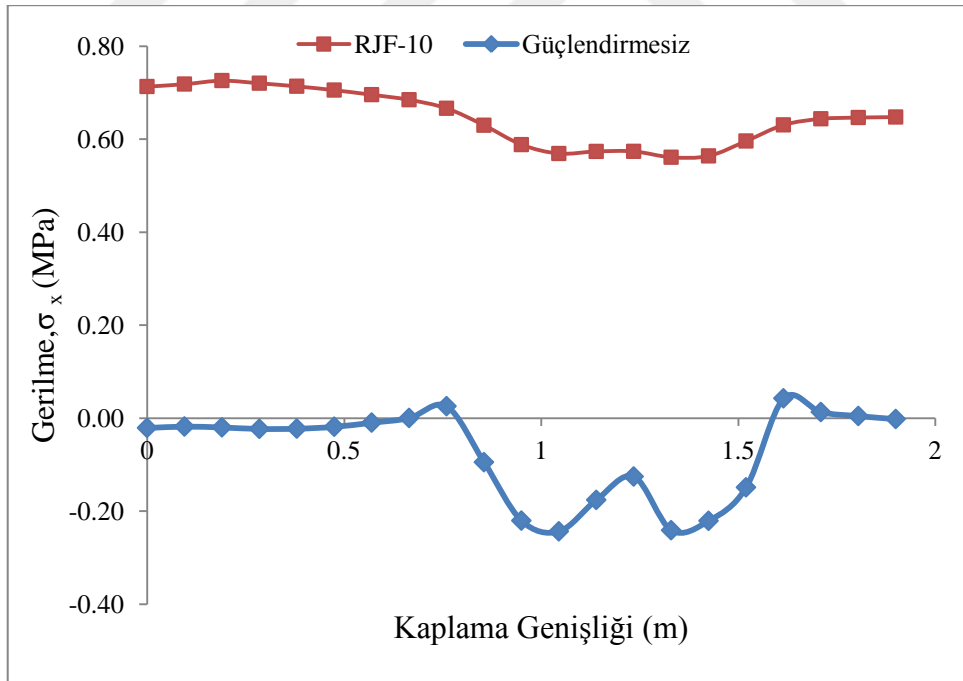
RJF güçlendirme türü beton kaplama derzine yerleştirildikten sonra üzeri 50 mm ve 100 mm kalınlığında asfalt ile kaplandıktan sonra hareketli teker yükü etki ettirilerek analiz edilmiştir. Derz bölgesinde oluşan boyuna ve düşey doğrultudaki gerilmelerin dağılımı Şekil 3.81-3.84’te gösterilmektedir.



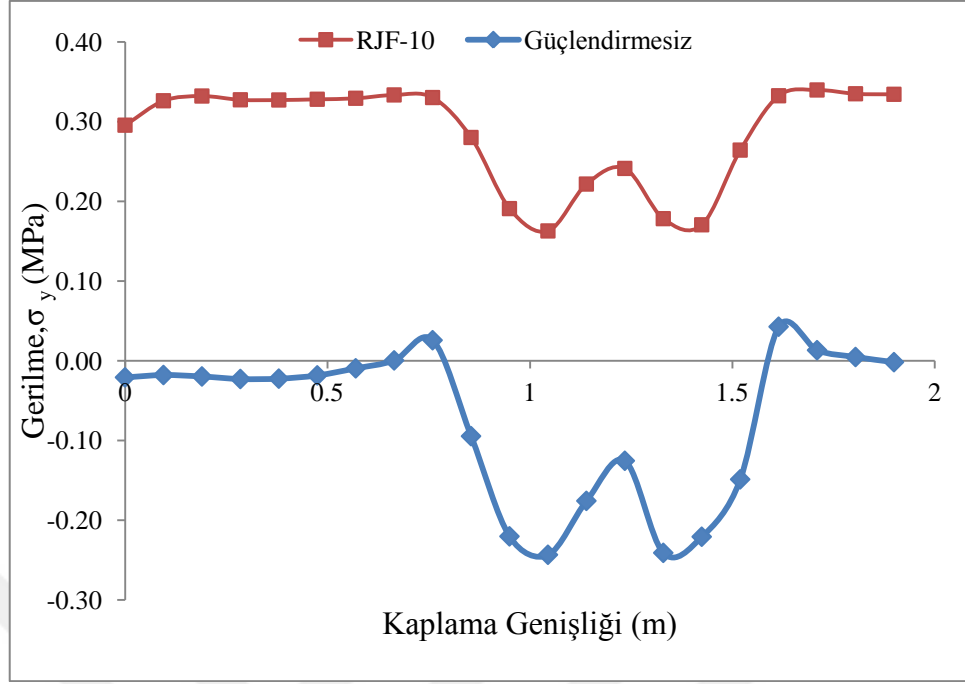
Şekil 3.81. RJF güçlendirmesi ve 50 mm kalınlığındaki asfalt kaplamanın derz bölgesinde boyuna doğrultudaki gerilmelere etkisi



şekil 3.82. R/F güçlendirmesi ve 50 mm kalınlığındaki asfalt kaplamanın derz bölgesinde düşey doğrułudaki gerilmelere etkisi



şekil 3.83. R/F güçlendirmesi ve 100 mm kalınlığındaki asfalt kaplamanın derz bölgesinde boyuna doğrułudaki gerilmelere etkisi



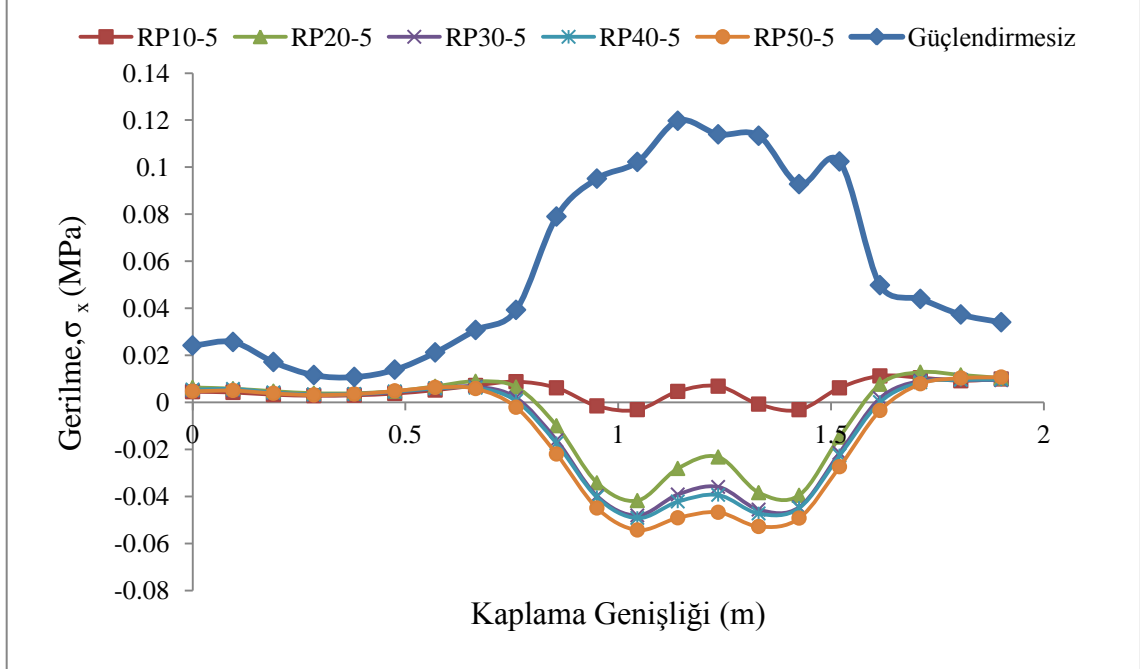
Şekil 3.84. R/F güçlendirmesi ve 100 mm kalınlığındaki asfalt kaplamanın derz bölgesinde düşey doğrultudaki gerilmelere etkisi

50 mm kalınlığında asfalt kaplama ile R/F güçlendirmesinin bir arada kullanılması sonucu derz bölgesindeki boyuna ve düşey yöndeki gerilmelerde yarı yarıya düşüş meydana gelirken 100 mm asfalt kaplama uygulamasında beton kaplama derz bölgesindeki gerilmelerde artış gözlemlenmektedir. Asfalt kaplama serilmeden önce beton kaplamada oluşan bu gerilmeler basınç gerilmesi olarak ortaya çıkmışsa da güçlendirme sonrasında çekme bölgesinde gerilmelerle karşılaşılmıştır. İlerleyen bölümlerde R/F güçlendirme malzemesinin asfalt kaplama tabanında oluşan BŞD değişimine olan etkisi de incelenecek ve bu güçlendirme yönteminin yansımaya çatlağı oluşum sürecindeki davranışı daha kapsamlı bir biçimde tartışılacaktır.

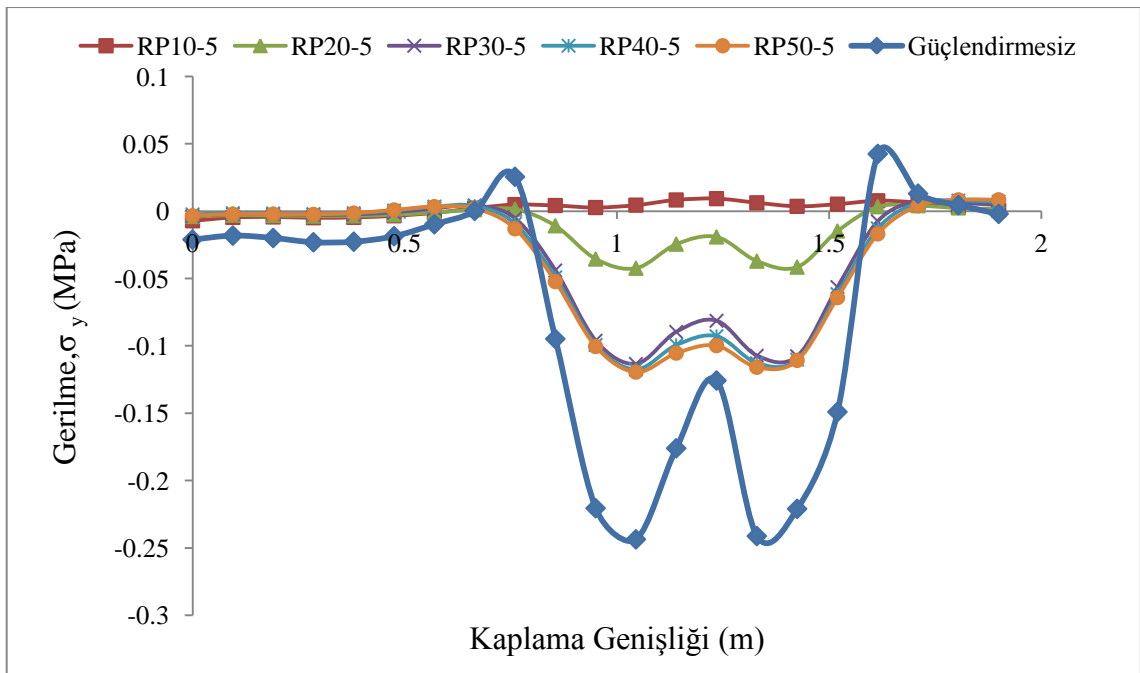
3.4.4.2. RP Güçlendirme Türünün Etkisi

RP güçlendirme malzemesi farklı genişliklerde modellenerek asfalt kaplama tabanında oluşan gerilme ve BŞD değerlerine olan etkisi Bölüm 3.4.3'te incelenmiş ve 200 mm genişliğinde uygulanmasının uygun olduğuna karar verilmiştir. Bu bölümde ise beton kaplama derz bölgesinde oluşan gerilmelerin asfalt kaplama ve RP güçlendirmesiyle birlikte nasıl değiştiği incelenecektir. Şekil 3.85-3.88'de farklı asfalt kaplama kalınlıkları

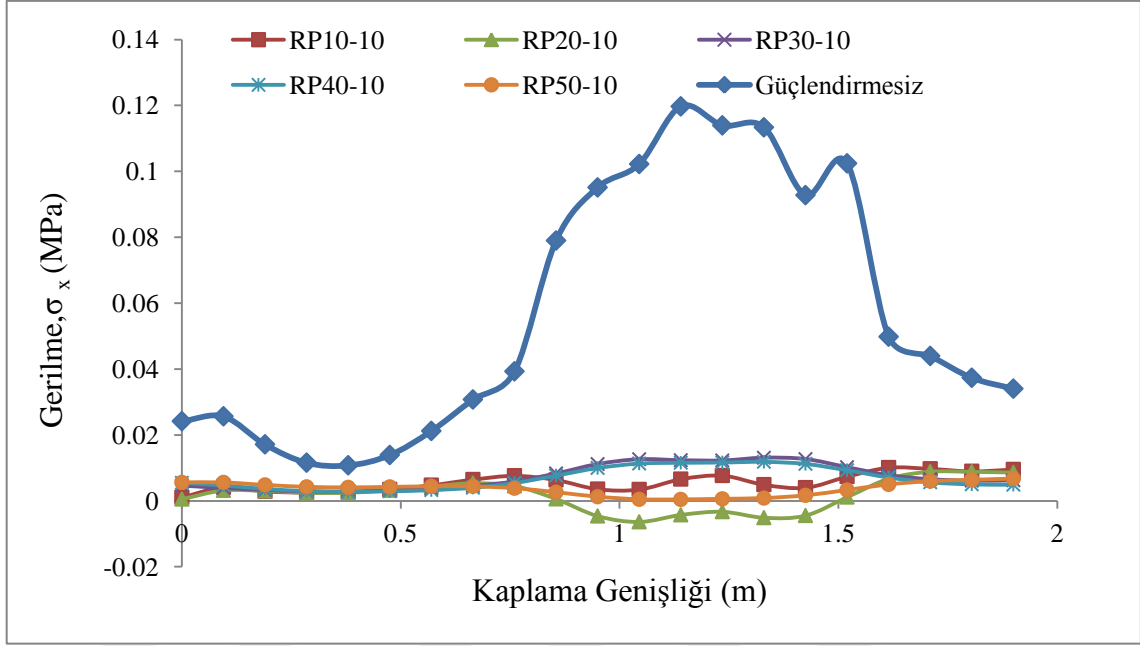
için beton kaplama derz bölgesindeki boyuna ve düşey doğrultudaki gerilmelerin değişimleri gösterilmektedir.



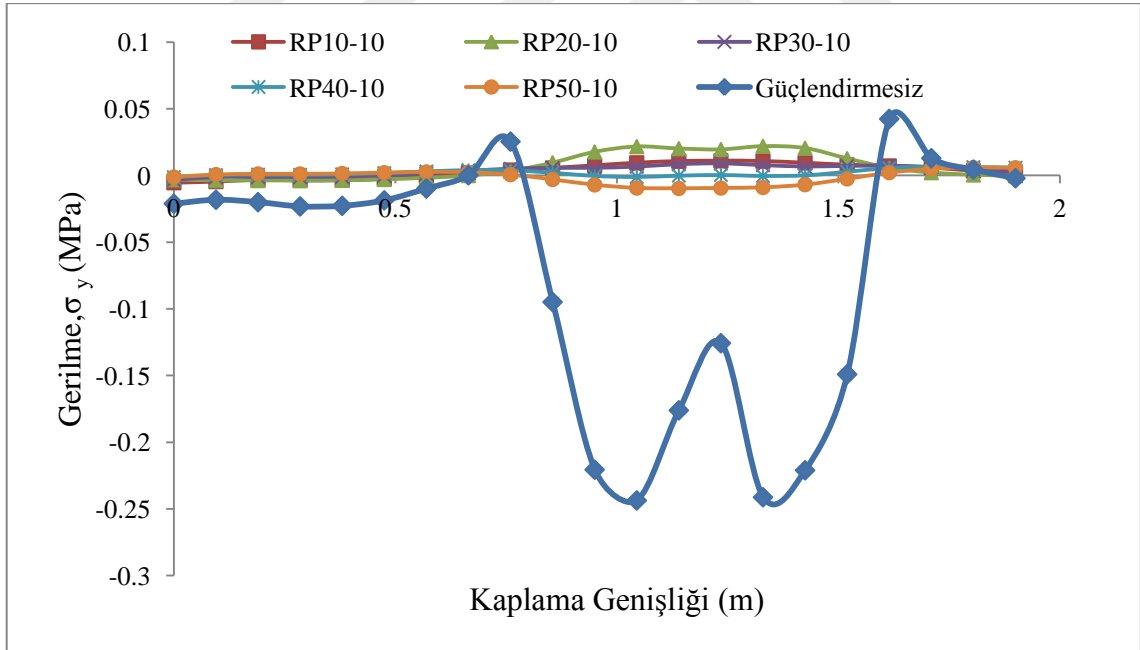
Şekil 3.85. RP güçlendirmesi ve 50 mm kalınlığındaki asfalt kaplamanın derz bölgesinde boyuna doğrultudaki gerilmelere etkisi



Şekil 3.86. RP güçlendirmesi ve 50 mm kalınlığındaki asfalt kaplamanın derz bölgesinde düşey doğrultudaki gerilmelere etkisi



Şekil 3.87. RP güçlendirmesi ve 100 mm kalınlığındaki asfalt kaplamanın derz bölgesinde boyuna doğrultudaki gerilmelere etkisi



Şekil 3.88. RP güçlendirmesi ve 100 mm kalınlığındaki asfalt kaplamanın derz bölgesinde düşey doğrultudaki gerilmelere etkisi

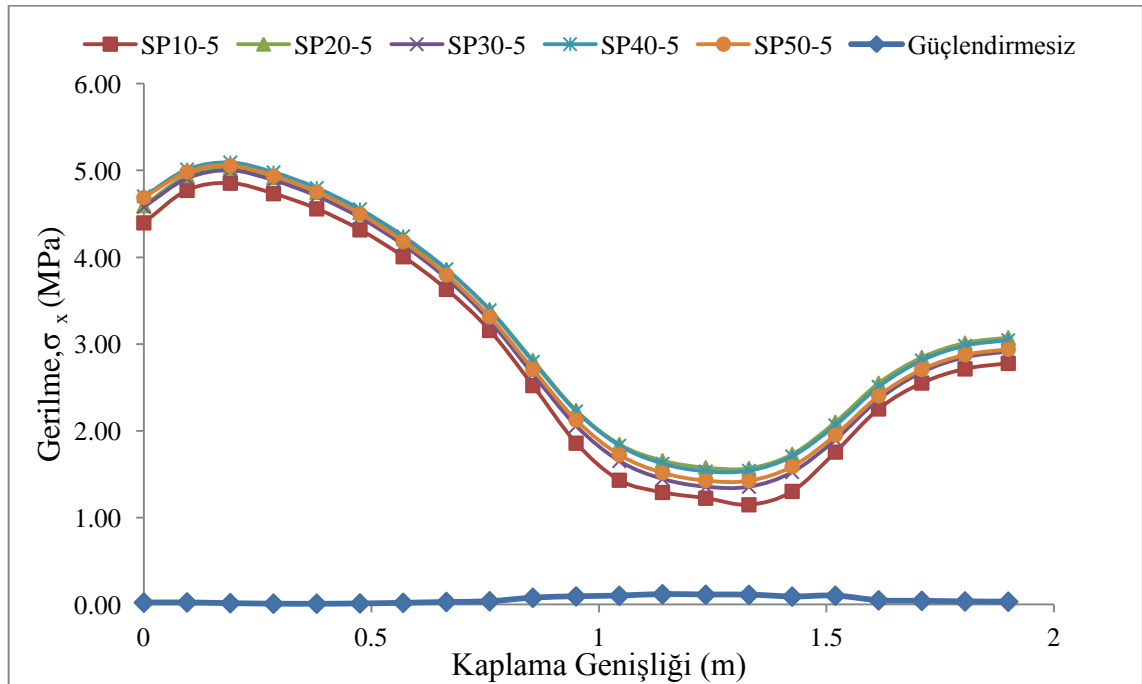
RP güçlendirme malzemesinin kullanılması, derz bölgesindeki gerilmelerin belirgin bir biçimde azalmasına neden olmuştur. Özellikle 100 ve 200 mm genişliğindeki RP malzemesi, 50 mm kalınlığındaki asfalt kaplama ile birlikte uygulanınca boyuna ve düşey

doğrultudaki gerilmeler yaklaşık 5 kat azalmıştır. 100 mm kalınlığındaki asfalt kaplama uygulamasında ise bu farklılık 7-8 kata kadar çıkmaktadır. Ayrıca RP genişlik analizi bir de bu açıdan incelenmiş ve yine 100 veya 200 mm genişliklerin kullanılması gerekliliği ön plana çıktığı görülmüştür.

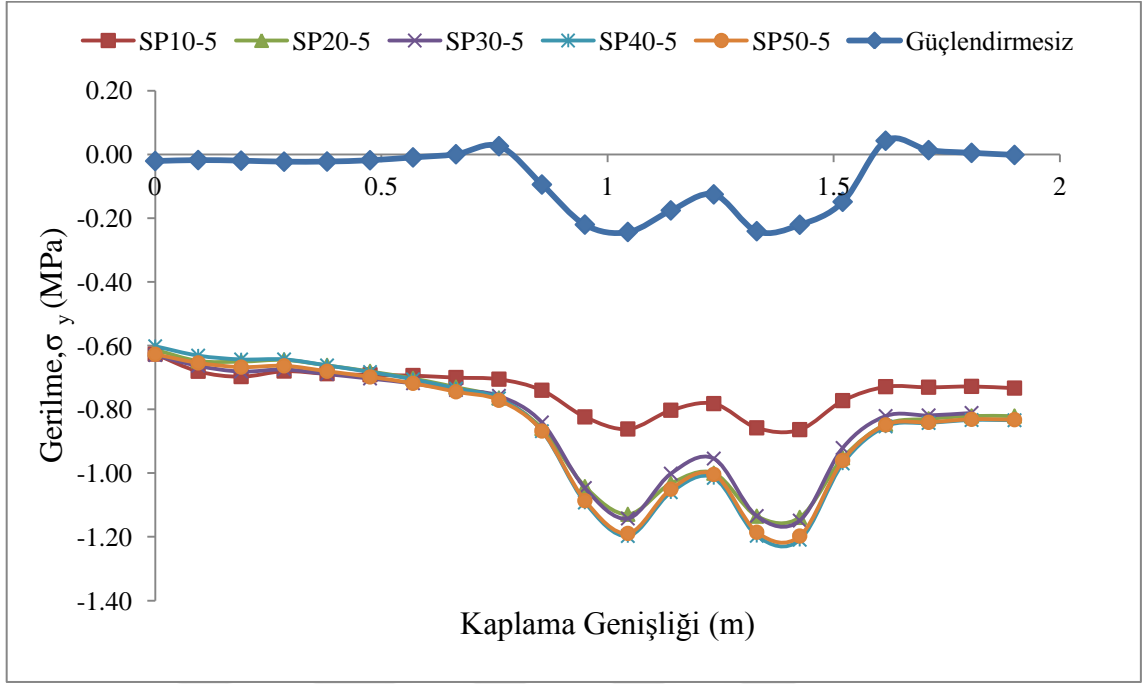
RP güçlendirme malzemesi RJF malzemesine göre beton kaplama derz bölgesindeki gerilmelerin azaltılmasında daha etkin olmuştur. İki güçlendirme türü arasında ki temel farklılardan birisi de RP güçlendirme türünün beton kaplama derz bölgesinin üzerini örtecek şekilde uygulanmasıdır. Bu sayede derz köşesinde oluşan bu gerilmeler RP güçlendirme uygulamasıyla RJF'ye nispeten daha fazla azaltılmıştır.

3.4.4.3. SP Güçlendirme Türünün Etkisi

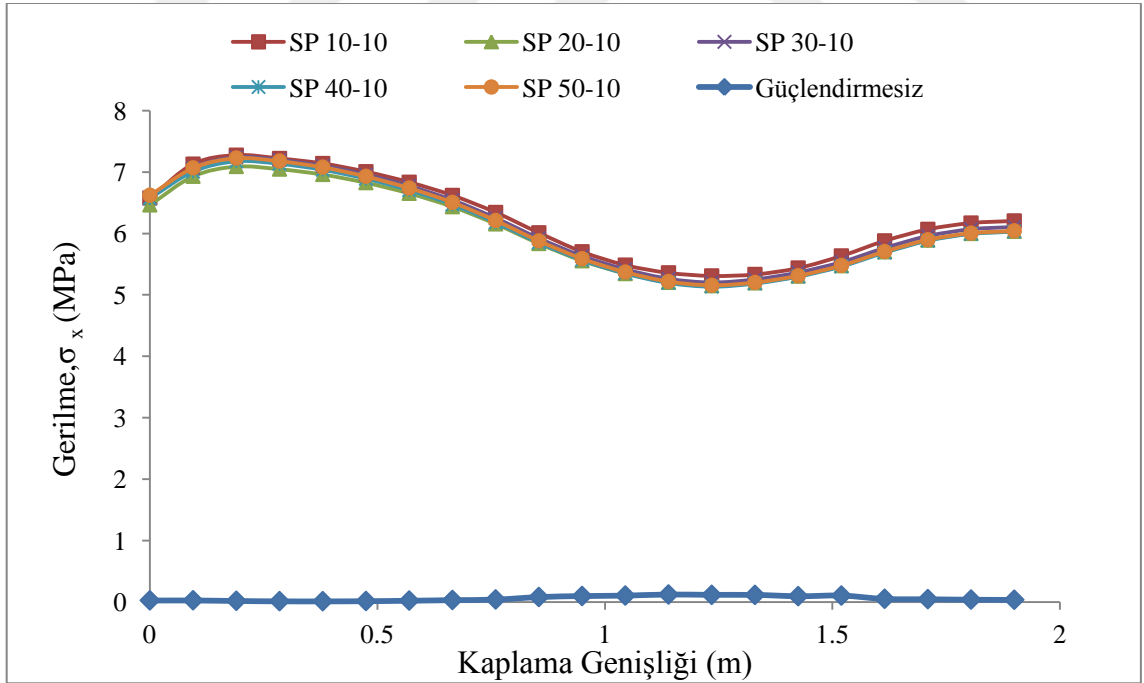
SP güçlendirme malzemesi beton kaplama derz bölgesine yerleştirildikten sonra 50 ve 100 mm kalınlıklarında asfalt ile kaplanılarak analizler yapılmış ve derz bölgesindeki beton gerilmeleri incelenmiştir. Şekil 3.89-3.92'de 50 ve 100 mm kalınlıklarındaki asfalt kaplama uygulanması için derz bölgesindeki betonda boyuna ve düşey doğrultudaki gerilmeler incelenmiştir.



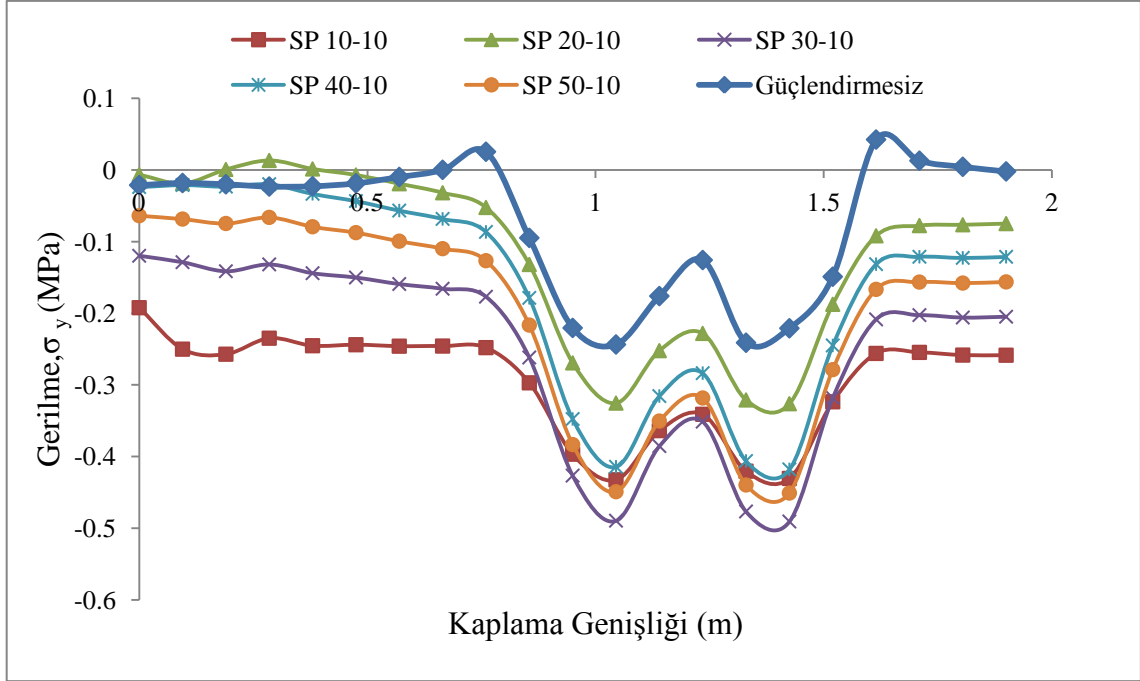
Şekil 3.89. SP güçlendirmesi ve 50 mm kalınlığındaki asfalt kaplamanın derz bölgesinde boyuna doğrultudaki gerilmelere etkisi



Şekil 3.90. SP güçlendirmesi ve 50 mm kalınlığındaki asfalt kaplamanın derz bölgesinde düşey doğrultudaki gerilmelere etkisi



Şekil 3.91. SP güçlendirmesi ve 100 mm kalınlığındaki asfalt kaplamanın derz bölgesinde boyuna doğrultudaki gerilmelere etkisi



Şekil 3.92. SP güçlendirmesi ve 100 mm kalınlığındaki asfalt kaplamanın derz bölgesinde düşey doğrultudaki gerilmelere etkisi

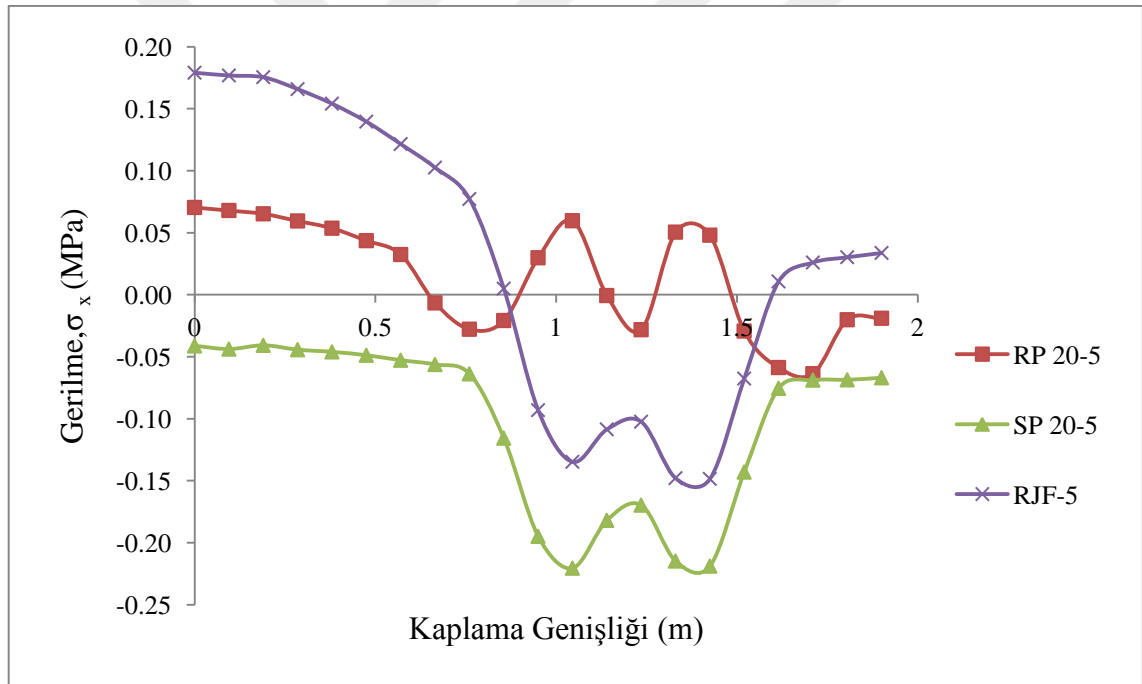
50 mm kalınlığındaki asfalt kaplama ile SP güçlendirmesinin bir arada kullanılması sonucunda beton kaplama derz bölgesindeki boyuna doğrultudaki gerilmeler yaklaşık 10 katına çıkarken, düşey doğrultudaki gerilmeler ise yaklaşık 6 katına çıkmıştır. 100 mm kalınlığındaki asfalt kaplama uygulamasında da durum pek farklı değildir. Her iki kaplama kalınlığının uygulanmasında da SP güçlendirme elemanının, beton kaplama derz bölgesindeki basınç gerilmelerini betonun basınç dayanımı sınırını aşmayacak şekilde artırdığı görülmüştür. Ancak boyuna doğrultudaki çekme gerilmelerinin betonun çekme dayanımını aştığı anlaşılmıştır. Bu koşullar altında SP güçlendirme elemanının tekrarlı yüklemeler altında beton kaplamada ciddi bozulmalar oluşturacağı düşünölmektedir.

3.4.5. Derz Güçlendirme Elemanlarının Karşılaştırması

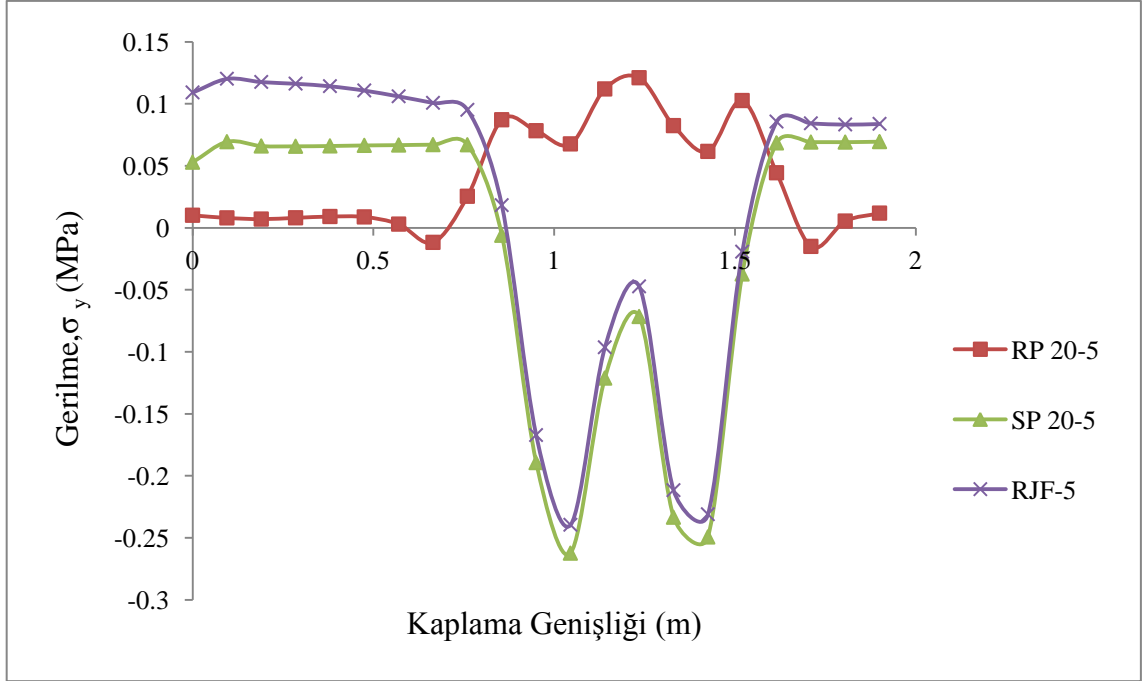
Beton kaplama SE modeli hazırlanıp analizleri tamamlandıktan sonra RJF, RP ve SP güçlendirme elemanlarıyla derz bölgesi güçlendirilmiştir. Daha sonra beton kaplamanın üzeri 50 ve 100 mm kalınlığındaki asfalt ile kaplanmıştır. Derz güçlendirme elemanlarında RP ve SP derz üzerine yerleştirildiği için 100 mm'den 500 mm'ye kadar farklı genişlikler kullanılarak toplamda 22 asfalt kaplamalı ve güçlendirme elemanına sahip model

hazırlanmıştır. Bölüm 3.4.3'te en uygun RP ve SP genişliğinin 200 mm olması gerektiği anlatılmıştır. Bu bölümde, 200 mm genişliğindeki RP ve SP modeliyle RJF modelinden elde edilen gerilme, BŞD ve deplasman değerleri karşılaştırılarak HYT tesisindeki gibi üç farklı güçlendirme modelinden en uygun olanı belirlenmeye çalışılacaktır.

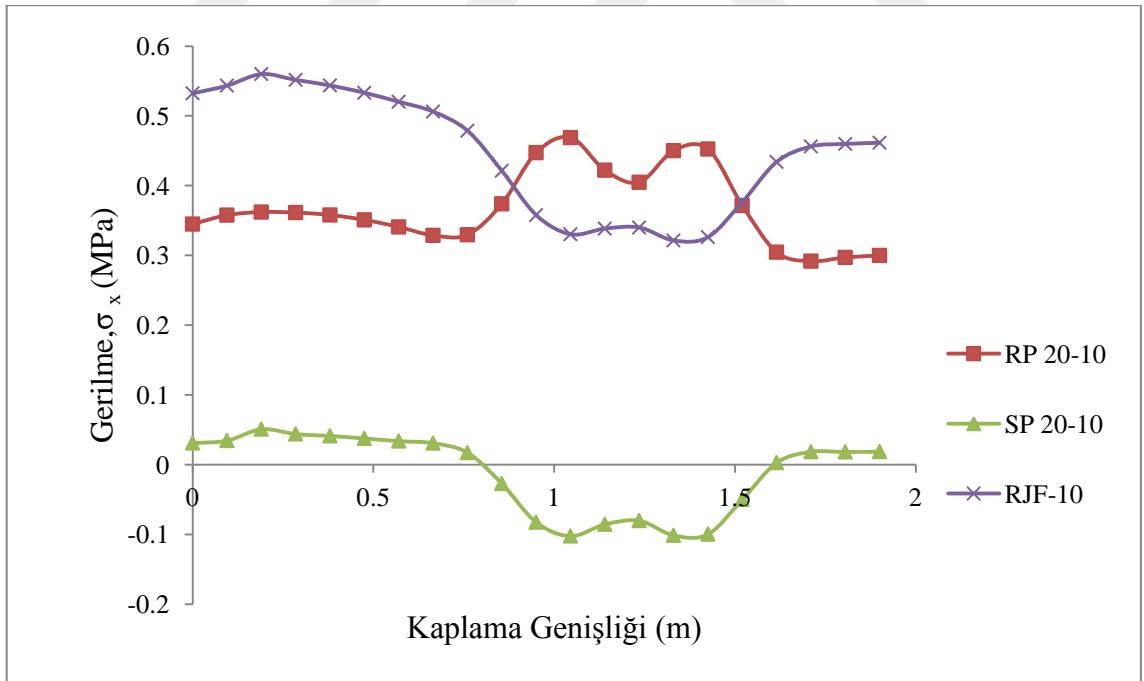
Derz güçlendirme modelleri hazırlanıp analiz edildikten sonra gerilme ve BŞD sonuçları, derz bölgesi üzerindeki asfalt kaplama tabanına 10 mm mesafeden alınmıştır. Sonuçların bu bölgeden alınmasının nedeni HYT tesisinde BŞD ölçerlerin yaklaşık olarak bu bölgeye yerleştirilmiş olmasıdır. Bu sayede HYT'den elde edilen BŞD değerleriyle SE analizinden elde edilen BŞD sonuçları karşılaştırılabilecektir. Şekil 3.93-3.96'da 50 ve 100 mm asfalt kaplama altında üç farklı derz güçlendirme elemanının kullanılması durumunda ortaya çıkan boyuna ve düşey doğrultudaki gerilme değerleri gösterilmektedir.



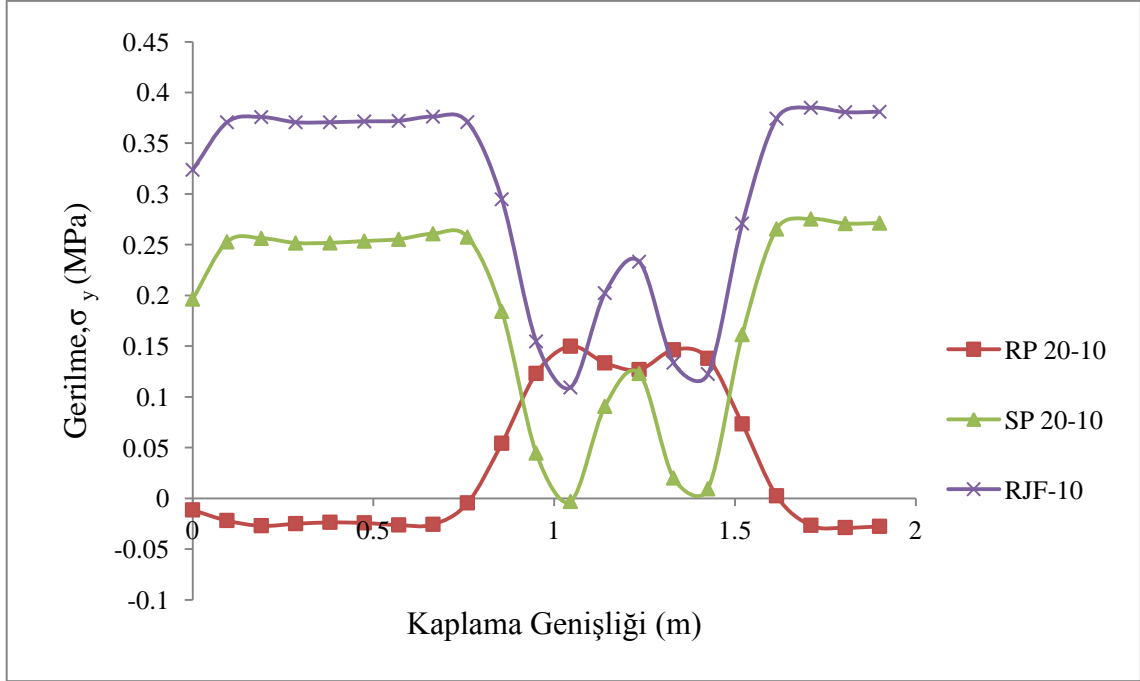
Şekil 3.93. 50 mm kalınlığında asfalt kaplama altında farklı güçlendirme modellerinin kullanılması durumunda ortaya çıkan boyuna doğrultudaki gerilmeler



Şekil 3.94. 50 mm kalınlığında asfalt kaplama altında farklı güçlendirme modellerinin kullanılması durumunda ortaya çıkan düşey doğrultudaki gerilmeler



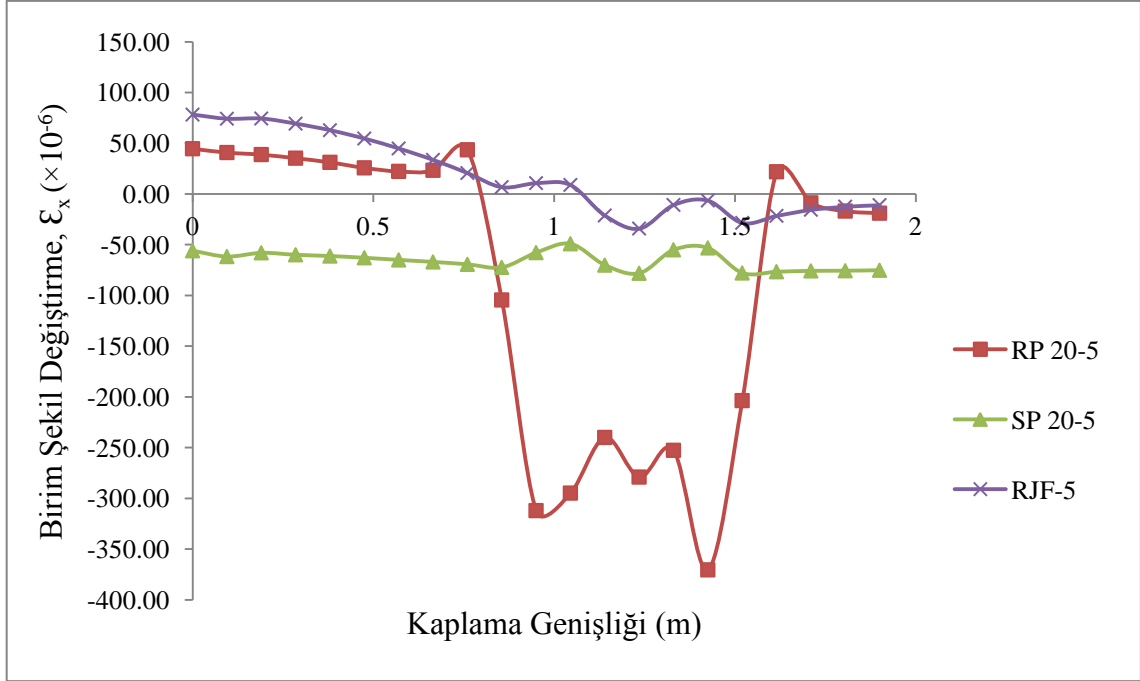
Şekil 3.95. 100 mm kalınlığında asfalt kaplama altında farklı güçlendirme modellerinin kullanılması durumunda ortaya çıkan boyuna doğrultudaki gerilmeler



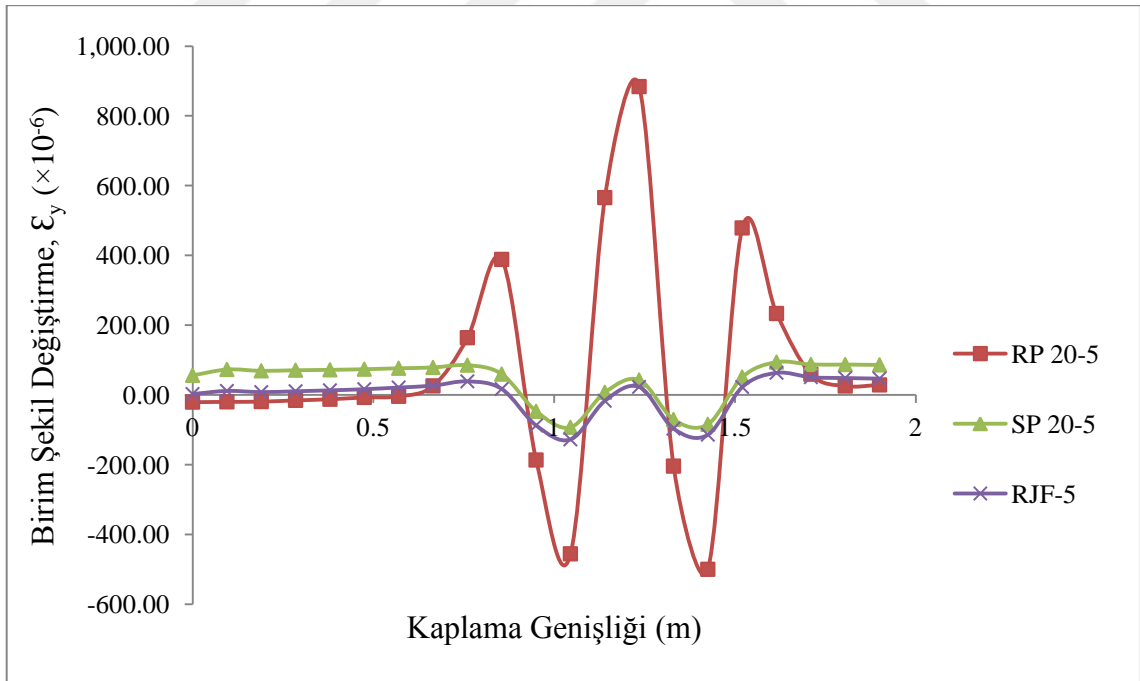
Şekil 3.96. 100 mm kalınlığında asfalt kaplama altında farklı güçlendirme modellerinin kullanılması durumunda ortaya çıkan düşey doğrultudaki gerilmeler

50 mm kalınlığındaki asfalt kaplama altında oluşan gerilmeler incelendiğinde, RP güçlendirme malzemesi diğer güçlendirme türlerine göre en az gerilmelerin oluşumuna neden olurken 100 mm asfalt kaplama kalınlığı altında en az gerilmeler SP güçlendirme malzemesi uygulandığında oluşmuştur. 50 mm kalınlığındaki asfalt tabanında rijit bir ortam oluşturan RJF ve SP güçlendirmeleri basınç gerilmelerine neden olurken RP güçlendirme elemanının esneyebilen yapısı aynı asfalt kaplama tabanından çekme gerilmelerine neden olmaktadır. Ancak 100 mm asfalt kalınlığı tabanında durum farklıdır. Asfalt kaplama yüzeyine yapılan yüklemeler 100 mm kalınlığın taban bölgesine yaptığı etki ağırlıklı olarak çekme gerilmelerine neden olmaktadır. Bu durum güçlendirme malzemelerinin etkisinden çok asfalt kaplama kalınlığının artmasıyla ilişkilendirilmiştir.

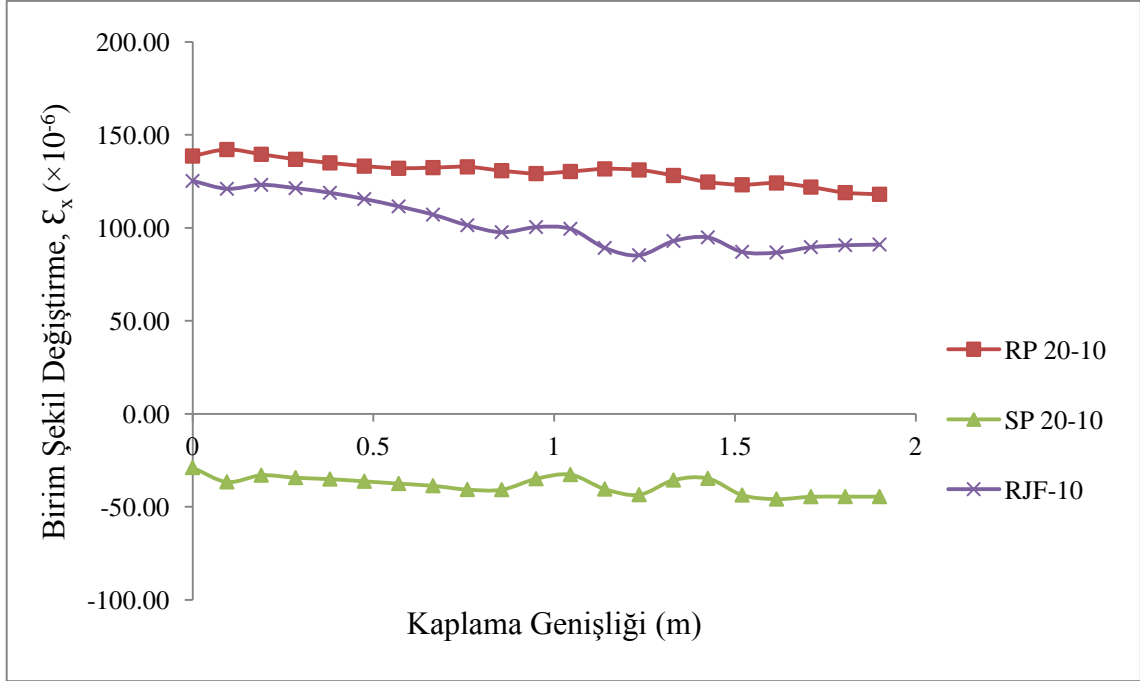
Şekil 3.97-3.100'de 50 ve 100 mm asfalt kaplama altında üç farklı derz güçlendirme elemanının kullanılması durumunda ortaya çıkan boyuna ve düşey doğrultudaki BŞD değerleri gösterilmektedir.



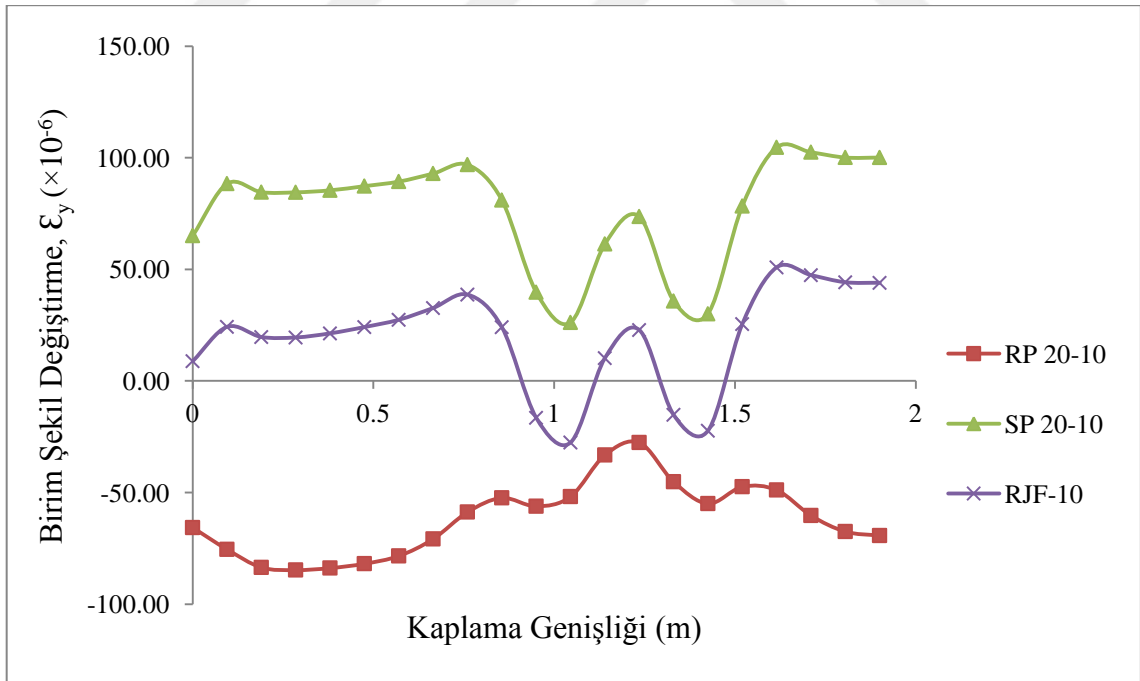
Şekil 3.97. 50 mm kalınlığında asfalt kaplama altında farklı güçlendirme modellerinin kullanılması durumunda ortaya çıkan boyuna doğrultudaki BŞD değerleri



Şekil 3.98. 50 mm kalınlığında asfalt kaplama altında farklı güçlendirme modellerinin kullanılması durumunda ortaya çıkan düşey doğrultudaki BŞD değerleri



Şekil 3.99. 100 mm kalınlığında asfalt kaplama altında farklı güçlendirme modellerinin kullanılması durumunda ortaya çıkan boyuna doğrultudaki BŞD değerleri

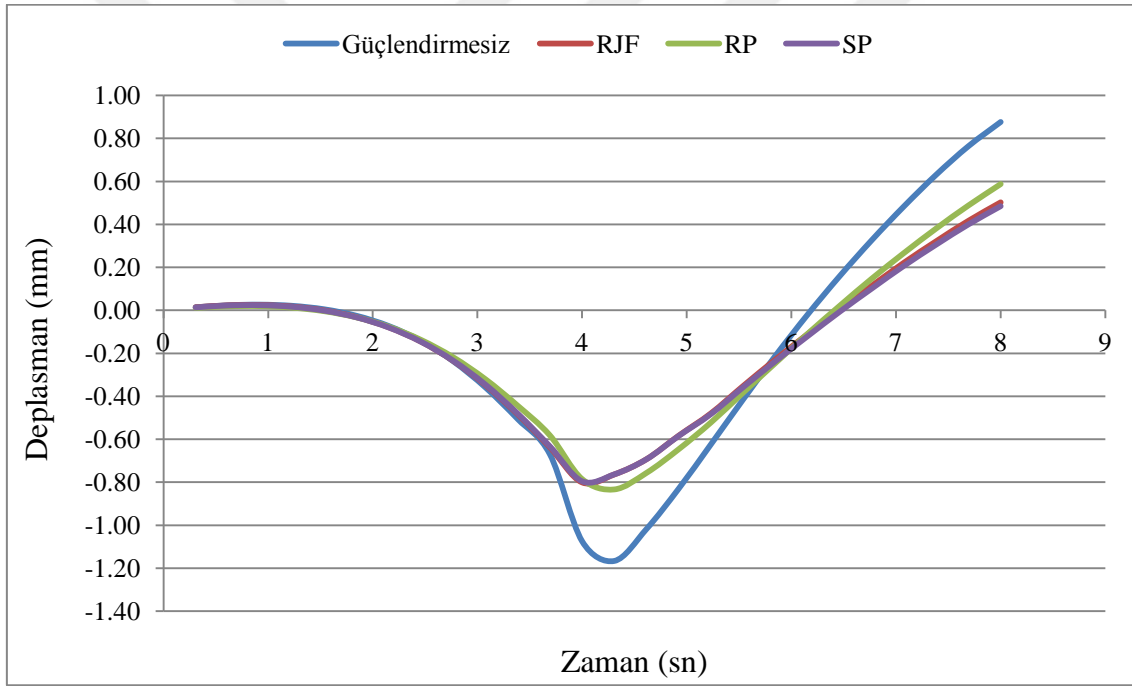


Şekil 3.100. 100 mm kalınlığında asfalt kaplama altında farklı güçlendirme modellerinin kullanılması durumunda ortaya çıkan düşey doğrultudaki BŞD değerleri

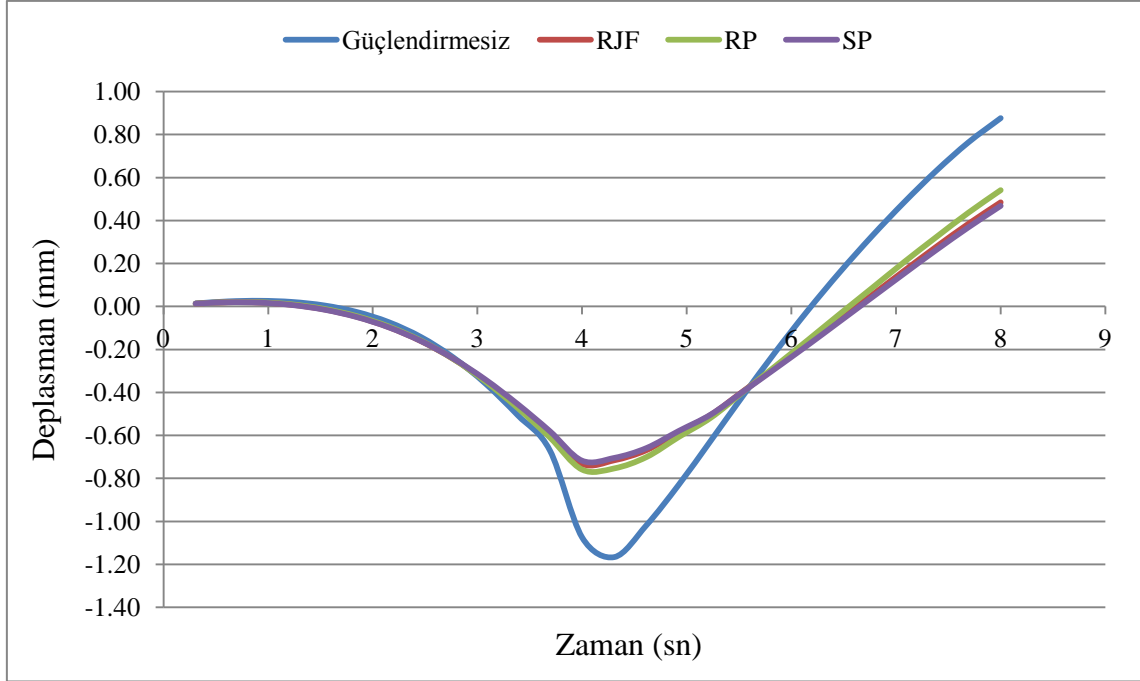
Yansıma çatlağı oluşum sürecinde, asfalt kaplama altında oluşan çekme BŞD değerleri kritik olarak kabul edilmektedir. 50 mm kalınlığındaki asfalt kaplama altında

oluşan boyuna doğrultudaki çekme BŞD değerleri açısından RP güçlendirme malzemesi RJF ve SP malzemesine göre daha kritik sonuçlar vermiştir. En iyi performans RJF malzemesinde gözlemlenmiştir. 100 mm kalınlığındaki asfalt kaplama altında ise SP malzemesi daha kritik değerler verirken RP güçlendirmesi bu kaplama kalınlığı için en iyi performansı göstermiştir. Düşey doğrultudaki BŞD değerlerine bakıldığında hem 50 hem de 100 mm kalınlığındaki asfalt kaplama için en iyi performansı gösteren güçlendirme yönteminin RJF olduğu tespit edilmiştir.

Şekil 3.101 ve 3.102’de 50 ve 100 mm asfalt kaplama altında üç farklı derz güçlendirme elemanının kullanılması durumunda beton kaplamanın düşey deplasman hareketliliği gösterilmektedir.



Şekil 3.101. 50 mm kalınlığında asfalt kaplama altında farklı güçlendirme modellerinin kullanılması durumunda beton kaplama deplasman hareketliliği



Şekil 3.102. 100 mm kalınlığında asfalt kaplama altında farklı güçlendirme modellerinin kullanılması durumunda beton kaplama deplasman hareketliliği

Beton kaplama deplasman hareketliliği incelendiğinde, derz güçlendirme yapılmadan ve asfalt kaplama serilmeden önce en fazla 1.17 mm civarında düşey deplasman olduğu görülmektedir. RJF, RP ve SP güçlendirmeleri yapıp 50 mm kalınlığında asfalt kaplama serildikten sonra beton kaplama çökme miktarı azalmış hem de 8. sn sonunda gerçekleşen kabarma miktarları azalmıştır. Güçlendirme yöntemleri arasında deplasman hareketini en az düşüren RP ve SP güçlendirmeleri olmuştur. Beton hareketliliğinin kısıtlanması adına en iyi performans RJF güçlendirme yönteminden elde edilmiştir. Aynı güçlendirme şartları altında sadece asfalt kaplama kalınlığının 50 mm'den 100 mm'ye çıkarılması durumunda ise yaklaşık %9 oranında bir azalma daha gerçekleşmiştir. Deplasman hareketinde gözlemlenen değişimler, BŞD ve gerilme değerlerinde oluşan hareketlilikle oldukça benzerdir. RJF güçlendirme yöntemi gerilmeler ve BŞD oluşumu açısından bakıldığında kullanılacak en iyi alternatif olduğu gibi deplasman mertebeleri açısından da tercih edilebilir olduğunu göstermiştir.

3.5. HYT Tesisi ve SE Analizinden Elde Edilen Bulguların Karşılaştırılması

HYT tesisindeki beton kaplamalar, asfalt ile kaplanmadan önce 25,000 geçiş uygulanmış ve derz bölgelerindeki düşey deplasman hareketliliği ölçülmüştür. SE yöntemiyle yapılan analizlerde de hareketli yük ile beton kaplama modeli üzerinden geçiş yapılmış ve tek bir geçiş için beton kaplamanın düşey deplasman hareketi ölçülmüştür. SE analizlerinde toplam deplasman genliği 2.05 mm iken, HYT tesisinde 1.79 mm civarında olup iki ölçüm sonucu arasında %12'lik bir fark bulunmaktadır.

HYT tesisinde beton kaplama derz güçlendirmeleri yapıp asfalt kaplama serildikten sonra yapılan beton kaplama deplasman ölçümleri, SE analiz sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. SE yönteminde asfalt kaplama kalınlığının 50 mm'den 100 mm'ye çıkarılması durumunda yaklaşık %9 oranında bir deplasman azalması gerçekleşmiştir. Ancak HYT tesisinde 50 mm kalınlığında asfalt kaplama serilmesi durumunda 1. derzde (RJF) toplam deplasman genliği %34 azalırken, 100 mm kalınlığındaki asfalt altında yaklaşık %82 azalmıştır. 50 mm asfalt altında 2. derzde (RP) %25 azalırken, 100 mm asfalt altında %34 azalmıştır. Son olarak 50 mm asfalt altında 3. derzde (SP) %21 artarken, 100 mm asfalt altında %78 azalmıştır.

HYT tesisinde ölçülen BŞD değerleriyle SE analizindeki sonuçlar karşılaştırılmış ve Tablo 3.12'de gösterilmiştir. HYT tesisinde RJF güçlendirmesi yapılan derz üstündeki 50 mm asfalt kaplama tabanında ilk geçişlerde yaklaşık 152×10^{-6} mertebesinde BŞD ölçümü okunmuşken SE analizlerinde bu değer yaklaşık 40×10^{-6} mertebesindedir. RP güçlendirmesi yapılan derzde, HYT sonuçları yaklaşık 230×10^{-6} mertebesindeyken SE analizinde 300×10^{-6} mertebesindedir. SP güçlendirmesi yapılan derzde, HYT sonuçları yaklaşık 329×10^{-6} mertebesindeyken SE analizinde 80×10^{-6} mertebesindedir.

HYT tesisinde RJF güçlendirmesi yapılan derz üstündeki 100 mm asfalt kaplama tabanında ilk geçişlerde yaklaşık 47×10^{-6} mertebesinde BŞD ölçümü okunmuşken SE analizlerinde bu değer yaklaşık 85×10^{-6} mertebesindedir. RP güçlendirmesi yapılan derzde, HYT sonuçları yaklaşık 123×10^{-6} mertebesindeyken SE analizinde 130×10^{-6} mertebesindedir. SP güçlendirmesi yapılan derzde, HYT sonuçları yaklaşık 110×10^{-6} mertebesindeyken SE analizinde 50×10^{-6} mertebesindedir.

Tablo 3.12. HYT tesisi ve SE analizinden elde edilen BŞD değerleri

Asfalt Kaplama Kalınlığı (mm)	RJF ($\epsilon \times 10^{-6}$)			RP ($\epsilon \times 10^{-6}$)			SP ($\epsilon \times 10^{-6}$)		
	HYT	SE	Fark (%)	HYT	SE	Fark (%)	HYT	SE	Fark (%)
50	152	40	-74	230	300	30	329	80	-76
100	47	85	80	123	130	6	110	50	-55

Tablo 3.12’de gösterilen BŞD farklarına bakıldığında HYT tesisiyle SE analizi sonuçları arasında %6’dan başlayıp %80’e kadar farklılık bulunduğu görülmektedir. Ancak BŞD değerlerinin mikrostrain mertebesinde olduğu göz önünde bulundurulduğunda önemli bir fark bulunmadığı anlaşılmıştır. Ayrıca HYT tesisinde alınan ölçümlerde sıcaklık etkisi, BŞD ölçer üzerine denk gelen agrega yoğunluğu, net asfalt kaplama kalınlığında olabilecek değişkenlik vb. gibi etmenler, alınan ölçümlerde az da olsa değişiklik göstermesi beklenmektedir. Bunun yanı sıra SE analizinde yukarıda anlatılan koşullar ideal şartlarda modellenmiş olup, BŞD değerlerinde oluşan bu farklılık mertebesi doğal kabul edilmiştir.

3.6. Elde Edilen Sonuçların Literatürle Karşılaştırılması

Araştırmacılar, trafik yönüne göre boyuna BŞD değerinin daha yüksek ve kritik olmasını göz önünde bulundurarak çalışmalarında, boyuna BŞD değer ölçümleri yapmışlardır (Williamson, 2015; Perez vd., 2006; Al-Qadi vd., 2009 ve Perez vd., 2006). Bu çalışmada da, boyuna BŞD değerleri enine BŞD değerlerinden yaklaşık altı kat fazla olarak belirlenmiştir.

Asfalt kaplama kalınlığının artırılmasının yansıma çatlaklarına neden olan gerilme ve BŞD değerlerini azalttığına dair literatürde yapılmış birçok çalışma bulunmaktadır (Hu vd., 2010; Wu vd., 2012; Perez vd., 2012). Yapılan deneyler sonucunda asfalt kalınlığının 50 mm’den 100 mm’ye artırılmasının düşey gerilmeleri %20 oranında azalttığı, ısı iletim kapasitesini yaklaşık 3-5 kat arasında azalttığı, yansıma çatlağı oluşum süresini 7 kat artırdığı, yansıma çatlağı türleri bakımından kalınlığın 50 mm olması durumunda birbirine paralel yansıma çatlağı oluşumuna rastlanırken, kalınlığın 100 mm’ye çıkarılması durumunda yansıma çatlakları daha çok tek bir doğrultuda ancak çatallanmalar şeklinde

olduğu, deneylerde en düşük BŞD mertebesinin olduğu RJF güçlendirme yönteminde asfalt kalınlığının iki katına çıkmasının BŞD değerini %70 oranında azalttığı görülmüştür.

Yansıma çatlaklarının engellenmesi ya da geciktirilmesine yönelik yapılan çalışmalarda, derz güçlendirme elemanı kullanılarak yapılan güçlendirme yöntemlerinden malzeme türü ve boyutlarına göre farklı derecelerde katkı sağlayan çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmalarda, yansıma çatlağını engelleyen/geciktiren bazı derz güçlendirme malzemelerinin maliyeti veya tekerlek izi oluşumunu artırdığı da tespit edilmiştir (Button ve Lytton, 1987; Van Deuren ve Esnouf, 1996; Buttlar vd., 2000; Steen, 2004; Button ve Lytton, 2007; Buttlar vd., 1999; Greene vd., 2010; Blankenship, 2012). Bu alışma kapsamında, beton üstü asfalt kaplamada oluşan gerilmeler ve BŞD ölçümleri açısından en iyi derz güçlendirme yönteminin RJF olduğu tespit edilmiştir. Tam derz bölgelerinde yansıma çatlağı oluşumunun engellenmesi için 100 mm asfalt kalınlığının daha uygun olduğu, RP ve SP güçlendirme yöntemlerinin yansıma çatlağı oluşumunu engelleyemedikleri belirlenmiştir. Ayrıca RJF güçlendirme yönteminin 1,192,000 ESAL yükleme yapılmasına rağmen beton üstü 50 ve 100 mm kalınlığındaki asfalt kaplamalarda yansıma çatlağı oluşmadan deneylerin tamamlandığı sonucuna ulaşılmıştır.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında, tam derz kullanılarak inşa edilen beton kaplamaların ince asfalt kaplamayla yenilenmesi sonrasında trafik yükü, sıcaklık vb. etkilerle ortaya çıkan yansıma çatlakları üzerine laboratuvar deneyleri, HYT tesisi ve SE yöntemi kullanılarak araştırmalar yapılmıştır. Çalışmanın amacı, derz bölgelerinde beton ile asfalt kaplama arasında kauçuk-seal (RJF), kauçuk levha (RP) ve çelik levha (SP) güçlendirme yöntemleri kullanılarak yansıma çatlakları oluşumunun mümkünse engellenmesi değilse geciktirilmesidir. Bu amaç doğrultusunda laboratuvar koşullarında üretilen BŞD ölçerlerden, HYT tesisinde oluşturulan yol platformunda yapılan deneylerden ve SE yöntemiyle yapılan analizlerden elde edilen başlıca sonuçlar ve öneriler aşağıda verilmektedir.

1) BŞD ölçer tasarımı yapılırken en az 8 mm kalınlığında çelik dişli çubuk eleman kullanılması, çubuk elemanın dairesel enkesite sahip olması, başlıkların en az 15 mm yüksekliğinde olması, SG pulunun en az 20 mm uzunluğunda olması, SG pulunun çubuk elemana yapıştırılması sürecinde azami derecede özen gösterilmesi, SG pulunun yapıştırılacağı yüzeyin pürüzsüz olması, SG pulundan veri toplayıcıya uzanan kablonun asfalt sıcaklığına ve maruz kalacağı trafik yüklerine dayanabilecek türdeki kablolardan seçilmesi gerekmektedir.

2) BŞD ölçerlerin tasarım sürecinde, aynı yük mertebesi altında asfalt kaplamanın yerleştirildiği düzlemin sürekli ya da süreksiz olması arasında asfalt kaplama tabanında yaklaşık dört kat BŞD farkı olduğu gözlemlenmiştir.

3) Çelik bandajlı silindirler kullanılarak sıkıştırılan asfalt kaplamaların içerisine yerleştirilen BŞD ölçerler zarar görmeden veri üretebilmiştir.

4) Arazi deneylerinde, aynı yük mertebesi altında trafik yönüne paralel olarak (boyuna doğrultuda) ölçülen BŞD değerlerinin, trafik yönüne dik olarak (enine doğrultuda) ölçülen BŞD değerlerinden yaklaşık altı kat fazla olduğu belirlenmiştir.

5) Birim zamanda BŞD ölçerler üzerinden geçen araç sayısı arttıkça artık BŞD değerlerinin yığılmalar oluşturarak parabolik bir artışa neden olduğu tespit edilmiştir.

6) HYT tesisinde bulunan beton kaplamalar üzerinden 25,000 geçiş yapıldıktan sonra kaplama altındaki zemin, plakların derz bölgelerinde gittikçe oyularak toplam deplasman genliğinin artmasına neden olmuştur. Bu artış, tekrarlı trafik yükleri altında beton kaplamalardaki faylanma hareketine neden olmaktadır.

7) Beton kaplamaların başlangıç ve bitiş deneyleri arasında (25,000 geçiş sonrası) toplam düşey deplasman genliğinin, batı şeridinde %14-%36 arasında, doğu şeridinde %11-%92 arasında arttığı tespit edilmiş, aradaki farklılığın temel nedeninin taban zeminindeki su içeriğinin farklı olmasından kaynaklandığı anlaşılmıştır.

8) Asfalt kaplamalarda oluşan gerilme dağılımı incelendiğinde, basınç ölçerler üzerindeki net asfalt kaplama kalınlığının, yüzeye uygulanan basıncın dağılmasında önemli bir etkisinin olduğu, asfalt kaplama kalınlığının 50 mm'den 100 mm'ye çıkarılmasının 100,000 geçiş sonunda düşey gerilmeleri %20 oranında azalttığı sonucuna ulaşılmıştır.

9) 50 mm kalınlığında asfalt kaplamada kullanılan derz güçlendirme malzemelerinden RJF'nin, 1. ve 2. beton plağı birbirine iyice bağlayarak yük aktarım verimliliğini artırdığı tespit edilmiştir. RP güçlendirme malzemesi de plaklar arasındaki yük aktarım verimliliğine katkı sağlamış ancak SP güçlendirme malzemesi, katkı sağlamadığı gibi üzerindeki asfalt kaplamanın betona yapışmasını da engelleyerek yük aktarma verimliliğini azaltmıştır.

10) 100 mm kalınlığında asfalt kaplamada kullanılan derz güçlendirme malzemelerinden RJF, toplam düşey deplasman genliği 2.45 mm'den 0.425 mm'ye düşerek yaklaşık %82 azaltmış ve 50 mm kalınlığa göre daha belirgin bir oranda etki etmiştir. Diğer güçlendirme türleri de azalma sağlamış ancak bu azalmaya asıl katkıyı sağlayan asfalt kaplama kalınlığının 2 katına çıkarılması olmuştur.

11) HYT tesisindeki ortam sıcaklığı, 50 mm kalınlığında asfalt kaplama tabanındaki sıcaklıklardan 0.1°C ile 0.4°C arasında farklılık göstermesine rağmen kaplama kalınlığının 100 mm'ye çıkması durumunda bu farklılık 0.3°C ile 2°C arasında değişmektedir. Kaplama kalınlığının iki katına çıkarılmasının ısı iletim kapasitesini yaklaşık 3-5 kat arasında azalttığı tespit edilmiştir.

12) 50 mm kalınlığındaki asfalt kaplamada oluşan tekerlek izleri ilk 25,000 geçişe (298,000 ESAL) kadar her üç derzde de belirli bir forma ulaşmış ve 100,000 geçişe (1,192,000 ESAL) kadar önemli bir değişikliğe uğramamıştır. 25,000 geçişle 100,000 geçiş arasındaki en belirgin fark 3 mm'lik artışla 1. derzde oluşmuştur. Bu sonuçlara göre, 1. derzde (RJF) asfalt kaplama altında doğrudan beton kaplamanın bulunmasının tekerlek izi nihai oluşumunu zamana yaydığı tespit edilmiştir. Diğer 2. (RP) ve 3. (SP) derzler üzerindeki asfalt kaplamanın, toplam geçiş sayısının %25'ine (25,000 geçişe) ulaştığında hemen hemen nihai tekerlek izinin oluştuğu tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, asfalt kaplama

ile beton kaplama arasında farklı malzeme özelliklerine sahip herhangi bir malzemenin kullanılmasının tekerlek izi oluşum sürecinde olumsuz etki bıraktığını göstermiştir.

13) 50 mm kalınlığındaki asfalt kaplamada oluşan tekerlek izleri, tekerlek altında çökme ve tekerlek yanlarında kabarma olarak değerlendirildiğinde, çökme bölgelerinde en fazla derinlik RP güçlendirmeli derzde oluşurken, kabarma bölgelerinde en fazla yükseklik SP güçlendirmeli derzde oluşmuştur.

14) Doğu şeridi (100 mm asfalt) üzerinden yapılan geçişlerde sıcaklık ortalaması yaklaşık 10°C iken doğu şeridi (50 mm asfalt) için 20°C civarındadır. Bu sıcaklık farkı tekerlek izi oluşum sürecinde etkisini göstermiş ve en fazla tekerlek izinin olduğu SP derzinde batı şeridi için %60 oranındaki değişim doğu şeridi için %4 civarında gerçekleşmiştir.

15) Karayolları standartlarında 0-15 mm arasında oluşacak tekerlek izine karşı önlem alınmasına gerek duyulmadığı göz önünde bulundurulduğunda, 100 mm asfalt kalınlığının kullanılmasının 50 mm kalınlığına göre daha uygun olduğu kanaatine varılmıştır.

16) Ağır taşıt trafiğine maruz beton üstü asfalt kaplamaların banket genişliklerinin artırılmasının tekerlek izi kenarlarındaki kabarma oluşumunu artıracığı, asfalt kaplama ile beton kaplama arasında asfalt kaplamadan daha yumuşak bir malzemenin kullanılmasının tekerlek izi derinliğini artıracığı, tekerlek izi oluşumuna karşı en iyi direncin RJF güçlendirme türünün uygulandığı derzde olduğu sonucuna varılmıştır.

17) Doğu ve batı şeridindeki asfalt kaplamanın BHA değerlerinin birbirine oldukça yakın olduğu, ancak boşluk oranları açısından farklı olduğu tespit edilmiştir. 50 mm kalınlığındaki asfalt kaplamanın boşluk oranı, 100 mm kalınlığındaki asfalt kaplamaya göre %50 daha fazladır. Alınan veriler sonucunda, kaplamalardaki boşluk oranının tekerlek izi oluşumuna belirgin bir biçimde etki ettiği görülmüştür.

18) HYT deneyleri boyunca BŞD ölçerlerden veri alabilme başarısı %88.8 mertebesindedir.

19) Batı şeridindeki asfalt kaplama için başlangıç ve bitiş geçişleri arasındaki BŞD mertebesindeki farklara göre 1. derzde (RJF) yaklaşık %50 oranında bir artış olurken, 2 (RP) ve 3. (SP) derzlerde yoğun çatlak oluşumundan kaynaklı olarak BŞD mertebesinin yaklaşık 25 katına çıktığı görülmüştür.

20) Batı şeridinde, RJF derz bölgesi için yaklaşık 240,000 ESAL'e ulaşıldığında silindirle sıkışma sonrasında asfalt kaplamada kalan boşluklar kapanarak asfalt kaplamanın asıl davranışı ortaya çıkmıştır.

21) Batı şeridinde, RJF derz bölgesi 1,192,000 ESAL boyunca gözlemsel olarak incelenmiş ve herhangi bir çatlak oluşumuna rastlanılmamıştır. Bu derzde çatlakların oluşmamasındaki en önemli etkenlerden biri, RJF güçlendirme uygulamasıyla beton plakların düşey deplasman hareketlerinin sınırlandırılmasındaki başarıdır.

22) Batı şeridi RP derz bölgesinde 71,520 ESAL'e gelindiğinde ilk yansıma çatlakları belirlemeye başlamıştır. Tekil olarak büyümeye devam eden bu yansıma çatlağına paralel şekilde 137,080 ESAL'den sonra yeni bir çatlak ortaya çıkmıştır. Her iki çatlak yaklaşık olarak 834,400 ESAL'e kadar uzayarak devam etmiş ve son halini almıştır. Çatlakların başlama dönemine denk gelen BŞD değer aralığı $350-400 \times 10^{-6}$ mertebesidir.

23) Batı şeridi SP derz bölgesinde ilk yansıma çatlakları 10,000 ESAL'e ulaşıldığında oluşmaya başlamıştır. Geçiş sayıları arttıkça ilerlemeye devam eden yansıma çatlakları RP derz güçlendirmesinde olduğu gibi önce tekil olarak uzamış daha sonra paralelinde yeni bir çatlak daha oluşmuştur. Özellikle bu derzde yansıma çatlakları arasında oluşan çatlak açıklığı, 2.derze göre daha uzun olarak ortaya çıkmıştır. Çelik levha ile asfalt kaplama arasında iyi bir aderansın sağlanamaması hem erken çatlak oluşumuna hem de oluşan çatlakların daha uzun ve büyük açıklıklara sahip olmasına neden olmuştur.

24) SP derz güçlendirmesinde kullanılan çelik levha (SP) üzerinde bulunan boyuna ve enine yöndeki BŞD ölçerler; ilk 50 geçişte boyuna yönde 125×10^{-6} değerinden başlayarak 347×10^{-6} mertebelerine kadar artmış, enine yönde ise 80×10^{-6} değerinden başlayarak 270×10^{-6} mertebelerine kadar ilerleme kaydetmiştir. Birinci geçişle ellinci geçiş arasında oluşan BŞD değerleri arasındaki yaklaşık 3 katlık fark, asfalt kaplamanın ilk geçişler altında ve sıcaklık etkisiyle boşluk oranının azalmaya başladığının bir göstergesi olarak kabul edilebilir.

25) Doğu şeridindeki asfalt kaplama için başlangıç ve bitiş geçişleri arasındaki BŞD mertebesindeki farklara göre 1. derzde (RJF) yaklaşık %29 oranında bir artış olduğu, 2 (RP) ve 3. (SP) derzlerde yoğun çatlak oluşumundan kaynaklı olarak BŞD mertebelerinin sırasıyla 6 ve 4 katına çıktığı görülmüştür.

26) Doğu şeridinde, RJF derz bölgesi için yaklaşık 100,000 ESAL'e ulaşıldığında silindirle sıkışma sonrasında asfalt kaplamada kalan boşluklar kapanarak asfalt kaplamanın

asıl davranışı ortaya çıkmıştır. İki şerit arasındaki asfalt kaplama boşluk oranlarının %50 oranındaki farklılığı burada da etkisini göstermiştir.

27) Doğu şeridinde, RJF derz bölgesi için en yüksek BŞD değeri 106×10^{-6} olarak okunmuş bu değer, batı şeridi RJF bölgesinde oluşan 170×10^{-6} BŞD mertebesiyle kıyaslandığında, asfalt kalınlığının iki katına çıkmasının BŞD değerini %70 oranında azalttığını göstermektedir.

28) Doğu şeridi RJF derz bölgesinde de 1,192,000 ESAL boyunca gözlemsel olarak incelenmiş ve herhangi bir çatlak oluşumuna rastlanılmamıştır.

29) Doğu şeridi (100 mm) RP ve SP derz bölgesinde yansıma çatlağı oluşum süresi batı şeridine (50 mm kalınlık) göre 7 kat artmıştır.

30) Doğu ve batı şeridinde bulunan çelik levhalar, 1,192,000 ESAL boyunca çeliğin akma sınırı olarak kabul edilen 2000×10^{-6} BŞD değerine ulaşamamış ve bu sayede kalıcı deformasyona uğramadığı anlaşılmıştır.

31) Çelik levhanın boyuna BŞD değerleri (geçiş yönüne paralel), enine yöndeki (geçiş yönüne dik) değerlerden yaklaşık 2 kat daha fazladır. Çelik levha tekerlek geçişi sırasında altında kalan derz boşluğuna doğru boyuna doğrultuda eğilmekteyken, enine yönde sadece uzamaya çalışmaktadır. Arada oluşan BŞD farklılığın temel nedeninin bu olduğu düşünülmektedir.

32) HYT tesisi kapsamındaki testler sonucunda derz güçlendirme türlerinden RJF malzemesinin hem 50 mm asfalt hem de 100 mm asfalt kalınlığında 1,192,000 ESAL boyunca yansıma çatlağı oluşumuna engel olduğu, RP derz güçlendirmesi kullanılması durumunda 50 mm kalınlıkta 71,520 ESAL'e gelindiğinde yansıma çatlaklarının başladığı, ilk çatlakların 476,800 ESAL'de belirmeye başladığı, SP derz güçlendirmesi kullanılması durumunda 50 mm kalınlıkta 10,000 ESAL'e gelindiğinde ilk çatlakların başladığı, 100 mm kalınlıkta ise ilk çatlakların 476,800 ESAL'de oluşmaya başladığı belirlenmiştir.

33) KTÜ-Ulaştırma laboratuvarında tasarımı yapılan BŞD ölçerlerin, beton üstü asfalt kaplamalarda kullanılması durumunda tekrarlı trafik yükleri altında ve 0-30°C sıcaklık koşulları altında $300-400 \times 10^{-6}$ BŞD mertebelerinde ilk çatlakların oluştuğu belirlenmiştir.

34) Asfalt kalınlığı 50 mm olması durumunda 1,192,000 ESAL sonucunda birbirine paralel yansıma çatlağı oluşumuna rastlanırken, kalınlığın 100 mm'ye çıkarılması durumunda yansıma çatlakları daha çok tek bir doğrultuda ancak çatallanmalar şeklinde meydana gelmiştir.

35) SE yöntemiyle yapılan analizlerde, beton kaplamaların asfalt ile kaplanmadan önce derz bölgelerinde düşey doğrultuda tekerlekler altına en fazla 0.25 MPa basınç gerilmesi oluşurken, boyuna doğrultuda iki teker arasında 0.12 MPa çekme gerilmesi oluşmaktadır. Beton kaplamanın basınç dayanımı (25 MPa) göz önünde bulundurulduğunda derz bölgesinde oluşan basınç gerilmesinin betonun basınç dayanımının yaklaşık 1/100'i kadar olduğu anlaşılmıştır. Çekme gerilmeleri ise çekme dayanımının yaklaşık 1/45'i kadardır.

36) Beton kaplamanın derz bölgesindeki düşey deplasman hareketliliği SE ve HYT tesisindeki sonuçlar bakımından oldukça birbirine yakındır. SE analizlerinde toplam deplasman genliği 2.05 mm iken, HYT tesisinde 1.79 mm civarında olup iki ölçüm sonucu arasında %12'lik bir fark bulunmaktadır.

37) 50 mm ve 100 mm kalınlığındaki asfalt kaplama tabanında oluşan boyuna ve düşey doğrultudaki BŞD değerleri açısından bakıldığında en düşük BŞD ve gerilme değerlerinin 100 ve 200 mm genişliğinde RP ve SP kullanılması durumunda elde edildiği görülmüştür. Bütün bu gerilme ve BŞD değerleri bakımından inceleme yapıldığında, 100 mm genişliğindeki RP ve SP güçlendirmesi kullanılmasının en ideal koşulları oluşturduğu ve asfalt kaplamanın zarar görmemesi için gereken minimum gerilme ve BŞD değerlerini verdiği anlaşılmıştır. Ancak HYT tesisinde ve ileride arazide de uygulama kolaylığı açısından RP ve SP derz güçlendirme malzemesinin minimum 200 mm genişliğinde olmasının uygun olacağı kanaatine varılmıştır.

38) Derz güçlendirme malzemelerinin beton kaplama derz bölgesinde oluşan gerilmelere etkisi incelendiğinde, RJF güçlendirme yönteminde gerilmelerin basınç bölgesinden çekme bölgesine geçtiği, RP güçlendirme yönteminde gerilmelerin önemli ölçüde azaldığı, SP güçlendirme yönteminde ise gerilmelerin önemli ölçüde arttığı belirlenmiştir.

39) RP güçlendirme malzemesi RJF malzemesine göre beton kaplama derz bölgesindeki gerilmelerin azaltılmasında daha etkin olmuştur. İki güçlendirme türü arasında ki temel farklardan birisi de RP güçlendirme türünün beton kaplama derz bölgesinin üzerini örtecek şekilde uygulanmasıdır. Bu sayede derz köşesinde oluşan bu gerilmeler, RP güçlendirme uygulamasıyla RJF'ye nispeten daha fazla azaltılmıştır.

40) 50 mm kalınlığındaki asfalt kaplama ile SP güçlendirmesinin bir arada kullanılması sonucunda beton kaplama derz bölgesindeki boyuna doğrultudaki çekme gerilmeleri yaklaşık 10 katına çıkarken, düşey doğrultudaki basınç gerilmeleri ise yaklaşık

6 katına çıkmıştır. 100 mm kalınlığındaki asfalt kaplama uygulamasında da durum pek farklı değildir. Her iki kaplama kalınlığının uygulanmasında da SP güçlendirme elemanının, beton kaplama derz bölgesindeki basınç gerilmelerini betonun basınç dayanımı sınırını aşmayacak şekilde artırdığı görülmüştür. Ancak boyuna doğrultudaki çekme gerilmelerinin betonun çekme dayanımını aştığı anlaşılmıştır. Bu koşullar altında SP güçlendirme elemanının tekrarlı yüklemeler altında beton kaplamada ciddi bozulmalar oluşturacağı düşünülmektedir.

41) 50 mm kalınlığındaki asfalt tabanında rijit bir ortam oluşturan RJF ve SP güçlendirmeleri basınç gerilmelerine neden olurken RP güçlendirme elemanının esneyebilen yapısı aynı asfalt kaplama tabanından çekme gerilmelerine neden olmaktadır. Ancak 100 mm asfalt kalınlığı tabanında durum farklıdır. Asfalt kaplama yüzeyine yapılan yüklemeler 100 mm kalınlığın taban bölgesine yaptığı etki ağırlıklı olarak çekme gerilmelerine neden olmaktadır. Bu durum güçlendirme malzemelerinin etkisinden çok asfalt kaplama kalınlığının artmasıyla ilişkilendirilmiştir.

42) SE analizlerine göre, aynı güçlendirme şartları altında sadece asfalt kaplama kalınlığının 50 mm'den 100 mm'ye çıkarılması durumunda beton kaplama hareketliliğinde yaklaşık %9 oranında bir azalma meydana gelmektedir.

43) 50 mm kalınlığındaki asfalt kaplama altında oluşan boyuna doğrultudaki çekme BŞD değerleri açısından RP güçlendirme malzemesi, RJF ve SP malzemesine göre daha kritik sonuçlar vermiştir. En iyi performans RJF malzemesinde gözlemlenmiştir. 100 mm kalınlığındaki asfalt kaplama altında ise SP malzemesi daha kritik değerler verirken RP güçlendirmesi bu kaplama kalınlığı için en iyi performansı göstermiştir. Düşey doğrultudaki BŞD değerlerine bakıldığında hem 50 mm hem de 100 mm kalınlığındaki asfalt kaplama için en iyi performansı gösteren güçlendirme yönteminin RJF olduğu tespit edilmiştir.

44) Beton kaplamalar kayma demirleri (dowel bar) ile desteklenerek düşey deplasman hareketi sabit tutulup farklı derz güçlendirme yöntemlerinin derz yansıma çatlağı üzerindeki etkisi incelenebilir.

45) Bu çalışmada TBB'ne ait asfalt karışım dizaynı kullanılmıştır. Yapılacak yeni çalışmalarda, KGM standartlarına uygun karışımlar kullanılarak çalışmalar tekrarlanabilir.

46) SE yöntemiyle yapılan analizler kapsamında yorulma analizi yapılmamıştır. Yorulma analizleri yapılarak yansıma çatlağının gelişim sürecinin takibi açısından yeni çalışmalar yapılabilir.

47) SE analizlerinde hareketli yük, farklı teker-yük konfigürasyonları denenerek uygulanabilir.

48) Beton yollar ülkemizde yeni yeni yayılan kaplama tipidir. Bu yollar hakkında daha fazla mekanik bilgi sahip olunması ve kısa sürede tecrübenin artırılması gerekmektedir. Bu hususta 3 ayda en az 10 yıllık yükleme yapılabilen HYT'nin daha fazla kullanılması gerekmektedir. Bu hususta dünya bilimine katkı sağlayabilmesi için Türk bilim insanlarının hizmetinde olan KTÜ-HYT tesisinin daha aktif kullanılması için her türlü işbirliğinin yürütülmesi gerekmektedir.



5. KAYNAKLAR

- AASHTO, 1993. American association of state highway and transportation officials, Guide for Design of Pavement Structures, Washington.
- Abed, A., H. ve Al-Azzawi, A., A., 2012. Evaluation of rutting depth in flexible pavements by using finite element analysis and local empirical model, American Journal of Engineering and Applied Sciences, 5, 2, 163-169.
- Al-Qadi, I., L., Carpenter, S., H., Leng, Z. ve Ozer, H., 2009. Tack coat optimization for hma overlays: accelerated pavement test report, FHWA-ICT-09-035, Illinois Department of Transportation Bureau of Materials and Physical Research, Illinois.
- Al-Qadi, I., L., Tutumluer, E., Dessouky, S. ve Kwon, J., 2007. Construction Report: Effectiveness of geogrid-reinforcement in flexible pavements: A full-scale testing, University of Illinois, Urbana-Champaign, IL.
- Al-Qadi, I., L. ve Wang, H., 2009. Full-depth pavement responses under various tire configurations: accelerated pavement testing and finite element modeling. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 78, 721-760.
- ANSYS 14.5, 2012. ANSYS Inc., Canonsburg, PA.
- Asphalt Institute, 1977. Extending pavement life with asphalt overlays, Lexington, KY.
- Asphalt Institute, 1993. Asphalt overlays for highway and street rehabilitation, Manual Series No. 17, The Asphalt Institute, College Park, MD.
- Anderson, T., L., 2005. Fracture mechanics fundamental and applications, Third Edition.
- Baek, J., 2010. Modeling reflective cracking development in hot-mix asphalt overlays and quantification of control techniques, University of Illinois at Urbana-Champaign.
- Baek, J., Ozer, H., Wang, H., ve Al-Qadi, I., L., 2010. Effects of interface conditions on reflective cracking development in hot-mix asphalt overlays, Road Materials and Pavement Design.
- Baek, J., Al-Qadi, I., L. ve Buttlar, W., G., 2008. Reflective cracking control, Special Joint Conference-North Central Hot Mix Asphalt Conference, January.
- Baek, J., Al-Qadi, I., L., Xie, W. ve Buttlar, W., G. 2008. In situ assessment of interlayer systems to abate reflective cracking in hot-mix asphalt overlays, Transportation Research Record, National Research Council, 104-113, Washington, USA.

- Baek, J. ve Al-Qadi, I., L., 2006. Investigation of the effect of steel reinforcement interlayer on retarding reflective cracking in hot-mix asphalt overlay, Transportation Research Record, National Research Council, 32-42, Washington, USA.
- Bağdatlı, M., E.,C. ve Yıldırım, M., Ş., 2017. Karayolu üstyapılarındaki bozulmaların bakım maliyetlerine etkisi, Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi, 6, 102-111.
- Baker, H., B., Buth, M., R. ve Van Deusen, D., A., 1994. Minnesota Road Research Project: Load response instrumentation installation and testing procedures, Final Report No. MN/PR-94/01, Minnesota Department of Transportation, St. Paul.
- Barksdale, R., D., Brown, S., F. ve Chan, F., 1989. Potential benefits of geosynthetics in flexible pavements, Transportation Research Record, National Research Council, Washington, USA.
- Bayomy, F., M., Al-Kandari, F., A. ve Smith, R., 1996. Mechanically based flexible overlay design system for Idaho, Transportation Research Record, National Research Council, 10-19, Washington, USA.
- Bennert, T. ve Maher, A., 2007. Evaluation of current state of flexible overlay design for rigid and composite pavements in the united states, Transportation Research Record, 97-108.
- Bennert, T., 2009. A rational approach to the prediction of reflective cracking in bituminous overlays for concrete pavements, New Brunswick, New Jersey, October.
- Bennert, T., 2010. Flexible overlays for rigid pavements, FHWA-NJ-2009-014, Federal Highway Administration U.S. Department of Transportation Washington, D.C.
- Blankenship, P., 2012. Reflective cracking relief interlayer for composite pavements.
- Boussinesq, J., 1885. Application des potentials a l'étude de l'équilibre et du mouvement des solides élastiques, Theory of Elasticity, 398–402, New York: McGraw-Hill.
- Brown, S., F. ve Pappin, J., W., 1982. Use of pavement test facility for the validation of analytical design methods, The Fifth International Conference On The Structural Design of Asphalt Pavements Held Delft University of Technology, August.
- Buttlar, W., Dempsey, B. ve Bozkurt, D., 1999. Evaluation of reflective crack control policy, Final Report Submitted to the Illinois Department of Transportation, Report No. ITRC FR 95/96-4.
- Buttlar, W., G., Bozkurt, D. ve Dempsey, B., J., 2000. Cost-effectiveness of paving fabrics used to control reflective cracking, Transportation Research Record, National Research Council, 139-149, Washington, USA.

- Button, J., W. ve Lytton, R., L., 1987. Evaluation of fabrics, fibers, and grids in overlays, Proceedings of the 6th International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements, 1, 925-934, Ann Arbor, MI.
- Button, J., W. ve Lytton, R., L., 2000. Guidelines for using geosynthetics with hot-mix asphalt overlays to reduce reflective cracking, Proceedings of the 86th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C.
- BYTŞ, 2016. Beton yollar teknik şartnamesi, Karayolları Genel Müdürlüğü, Araştırma ve Geliştirme Dairesi Başkanlığı, Ankara.
- Carmichael, I., R. ve Marienfeld, M., 1999. Synthesis and literature review of nonwoven paving fabrics performance in overlays, Transportation Research Record, 112-124.
- Changshun, H. ve Dongwei, C., 1999. Structural study of asphalt concrete overlays on the existing portland cement concrete pavement, Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies.
- Chen, H., J. ve Frederick, D., A., 1992. Interlayers on flexible pavements, Transportation Research Record, National Research Council, 90-94, Washington, USA.
- Chen, S. ve Jiang, Y., 2008. Pavement reflective cracking control with coarse-aggregate asphalt mix interlayer, International Journal of Construction Education and Research, 4, 3, 200-209.
- Cho, Y., H., Liu, C., Dossey, T. ve McCullough, B., F., 1998. Asphalt overlay design methods for rigid pavements considering rutting, reflection cracking, and fatigue cracking, Bureau of Engineering Research The University of Texas At Austin, October.
- Cleveland, G., S., Button, J., W., ve Lytton, R., L., 2002. Geosynthetics in flexible and rigid pavement overlay systems to reduce reflection cracking, Report no. FHWA/TX-02/1777, Texas Department of Transportation Research and Technology Implementation Office, 1-297.
- Çelik, M., 2019. İşlevsel hasarlı beton yollarda asfalt takviye tabakası kullanımının mekanistik ampirik yöntemlerle araştırılması, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Croney, D. ve Croney, P., 1991. The design and performance of road pavements, McGraw Hill International.
- Dave, E., V. ve Buttlar, W., G., 2010. Thermal reflective cracking of asphalt concrete overlays, International Journal of Pavement Engineering, 11, 6, 477-488.
- Dhakal, N., Elseifi, M., A. ve Zhang, Z., 2016. Mitigation strategies for reflection cracking in rehabilitated pavements, International Journal of Pavement Research and Technology, 9, 228-239.

- Elseifi, M., A. ve Bandaru, R., 2011. Cost effective prevention of reflection cracking of composite pavement, Research Report FHWA/LA.10/478, Louisiana Transportation Research Center.
- Elseifi, M., A. ve Al-Qadi, I., L., 2003. A simplified overlay design model against reflection cracking utilizing service life prediction, Transportation Research Board, National Research Council, 169-191, Washington, USA.
- Elseifi, M., A. ve Al-Qadi, I., L., 2005. Modeling and validation of strain energy absorbers for rehabilitated cracked flexible pavements, Journal of Transportation Engineering, ASCE, 9, 653-661.
- Evensen, R., 2008. Axle loads; equiva axles or load spectrum, Joint Nordic/Baltic Symposium on Pavement Design and Performance Indicators, Oslo, Şubat.
- FDOT Office, 2011. Instrumentation of Florida's accelerated pavement testing facility.
- Fickes, M., 2000. Asphalt smoothes the way, National Asphalt Pavement Association, Lanham, MD.
- Finn, F., N. ve Monismith, C., L., 1984. Asphalt overlay design procedures, NCHRP Synthesis of Highway Practice 116, Transportation Research Board, Washington, DC.
- Gokhale, S., Byron, T., Choubone, B. ve Iyer, S. 2008. Evaluation of pavement strain gauge repeatability under accelerated pavement testing, Report Number FL/DOT/SMO/08-521, FDOT, State Materials Office.
- Greene, J., Toros, U., Kim, S., Byron, T. ve Choubane, B., 2010. Impact of wide-base single tires on pavement damage, Transportation Research Record, National Research Council, 82-90, Washington, USA.
- Gulden, W. ve Brown, D., 1983. Treatments for reduction of reflective cracking of asphalt overlays on jointed-concrete pavements in georgia, Transportation Research Record, Washington, DC.
- Gupta, A. ve Kumar, A., 2014. Comparative structural analysis of flexible pavements using finite element method, The International Journal of Pavement Engineering and Asphalt Technology, 15, 11-19.
- Güngör, A., G., Sağlık, A. ve Çalışkol A., 2009. Yansıma çatlaklarının önlenmesinde ara tabakaların kullanımı, 5. Ulusal Asfalt Sempozyumu ve Sergisi, Kasım, Ankara.
- Hardy, M., S., A. ve Cebon, D., 1993. Response of continuous pavements to moving dynamic loads, Journal of Engineering Mechanics, 119, 9, 1762-1780.
- Harvey, J., Rust, C., Coetzee, N., Nokes, W. ve Van Kirk, J., 1994. Overview of Caltrans accelerated pavement testing pilot project, Fourth International Conference on the

Bearing Capacity of Roads and Airfields, University of Minnesota, Minneapolis, July, 1533-1548.

- Hilderbrand, G., 2002. Verification of flexible pavement response for a field test, Report 121, Danish Road Institute, Roskilde, Denmark.
- HMA, 2001. Pavement evaluation and rehabilitation, NHI Course No. 131063, Applied Pavement Technology, Inc.
- Holdt, C., V. ve Scullion, T., 2005. Methods of reducing joint reflection cracking: Field performance studies, FHWA/TX-06/0-4517-3, Texas Department of Transportation Research and Technology Implementation Office, Austin, Texas.
- Hu, S., Zhou, F. ve Scullion, T., 2010. Reflection cracking-based asphalt overlay thickness design and analysis tool, Transportation Research Record, National Research Council, 12-23, Washington, USA.
- Huang, Y., 2017. Evaluating pavement response and performance with different simulative tests, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia.
- Huges, C., S. ve McGhee, K., H., 1973. Results of reflection crack questionnaire survey, Report No. VHRC 72-R25, Virginia Highway Research Council.
- Islam, M., R. ve Tarefder, R., A., 2013. Field measurement of vertical strain in asphalt concrete, International Journal of Scientific and Engineering Research, 4, 2, 1-6.
- Jacobs, M., M., J., De Bondt, A., H., Molenaar, A., A., A. ve Hopman, P., C., 1992. Cracking in asphalt concrete pavements, 7th International Conference on Asphalt Pavements, International Society for Asphalt Pavements, Nottingham University, UK, 89-105.
- Jones, D., 2011. An overview of accelerated pavement testing, 4th International Conference on Accelerated Pavement Testing, Arizona.
- Kannemeyer, L., Perrie, B., D., Strauss, P., J. ve Du Plessis, L., 2006. Ultra-thin creep: modeling, testing under accelerated pavement testing and field application for roads, 7th International CROW Workshop on Fundamental Modeling of the Design and Performance of Concrete Pavements, September, Belgium.
- Kawa, I., Zhang, Z. ve Hudson, W., R., 1998. Evaluation of the Aashto 18-KIP load equivalency concept, FHWA/TX-05/0-1713-1, Center for Transportation Research, Texas, ABD.
- Kozak, M., 2011. Beton yollar ve beton yol yapımının araştırılması, Electronic Journal of Construction, 7, 89-99.
- Leng, Z., Ozer, H., Al-Qadi, I., L. ve Carpenter, S., H., 2008. Interface bonding between hot-mix asphalt and various portland cement concrete surfaces: laboratory

- assessment, Transportation Research Record, National Research Council, 46-53, Washington, USA.
- Lorenz, V., M., 1987. New Mexico study of interlayers used in reflective crack control, Transportation Research Record, National Research Council, 94-103, Washington, USA.
- Loria-Salazar, L., G., 2008. Reflective cracking of flexible pavements: literature review, analysis models, and testing methods, Department of Civil Engineering, University of Nevada, Reno, NV.
- Lourens, J., P., 1992. Nonlinear dynamic analysis and design of road pavements. RR 90/030, Department of Transport, Pretoria, South Africa.
- Lytton, R., L. 1989. Use of geotextiles for reinforcement and strain relief in asphalt concrete, Geotextile and Geomembrane, 8, 217-237.
- McNerney, M., T., Hugo, F. ve McCullough, B., F., 1994. THE development of an accelerated pavement test facility for Florida department of transportation, CTR Research Report 997-3F.
- Mehta, Y., Cleary, D. ve Ayman, W., A., 2017. Field cracking performance of airfield rigid pavements, Journal of Traffic and Transportation Engineering, 4, 380-387.
- Metcalf, J. B., 1996. NCHRP Synthesis of Highway Practice 235: Application of Full-Scale Accelerated Pavement Testing. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C.
- Mukhtar, M., T., 1994. Interlayer stress absorbing composite (ISAC) for mitigating reflection cracking in asphalt concrete overlays, Ph.D. Dissertation, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL.
- Mukhtar, M. ve Dempsey, B., 1996. Interlayer stress absorbing composite (ISAC) for mitigating reflection cracking in asphalt concrete overlays, Project IHR-533, Report No. UILU-ENG-96-2006, Illinois Cooperative Highway Research Program, Illinois Department of Transportation.
- Mutyılmaz, S., 2014. Beton kaplamaların genel özellikleri ve TM'lerdeki yeri, İnşaat İşleri Koordinasyon Toplantısı, Antalya, Kasım.
- Nam, B., H., Golestani, B., Noori, M., Tatari, O. ve An, J., 2014. Investigation of reflective cracking mitigation techniques, FDOT Contract No BDK78-977-17.
- Nernas, K. ve Nunn, M., 2004. A model for top-down reflection cracking in composite pavements, 5th International RILEM Conference–Cracking in Pavements: Mitigation, Risk Assessment, and Preservation, Limoges, France, 409-416.

- Nunn M. E., 1989. An investigation into reflection cracking in composite pavement, Proceedings of RILEM Conference on Reflective Cracking in Pavements, Liege, Belgium.
- Ozer, H., Al-Qadi, L., I., Wang, H. ve Leng, Z., 2011. Characterisation of interface bonding between hot-mix asphalt overlay and concrete pavements: modelling and in-situ response to accelerated loading, International Journal of Pavement Engineering, 13, 2, 181-196.
- Perez, S., A., Balay, J., M., Tamagny, P. ve Petit, C., 2006. Accelerated pavement testing and modeling of reflective cracking in pavements, Engineering Failure Analysis, 14, 1526-1537.
- Pierce, L., M., Jackson, N., C. ve Mahoney, J., P., 1993. Development and implementation of a mechanistic, empirically-based overlay design procedure for flexible pavements, Transportation Research Record, National Research Council, 120-129, Washington, USA.
- Roberts, F., L., Kandhal, P., S., Brown, E., R., Lee, D., Y., ve Kennedy, T., W., 1996. Hot-mix asphalt materials, mixture design, and construction, NAPA Research and Education Foundation, Lanham, MD.
- Romanoschi, S., A., Metcalf, J., B., Li, Y. ve Rasoulian, M., 1998. Assessment of pavement life at the first full-scale accelerated pavement test in Louisiana, TRB 1998 Annual Meeting, Transportation Research Board, Washington.
- Sağlık, A. ve Güngör, A., G. 2008. Karayolları esnek üstyapılar projelendirme rehberi, Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı, Üstyapı Şubesi Müdürlüğü, Ankara.
- Sargand, S., 1994. Development of an instrumentation plan for the Ohio SPS test pavement, Final Report No. FHWA/OH-94/019, Ohio Department of Transportation, Columbus, OH.
- Sarkar, A., 2015. Numerical comparison of flexible pavement dynamic response under different axles. International Journal of Pavement Engineering, 1-11.
- Sert, T., 2010. Karayolu alttemel tabakası ve taban zemini arasında farklı göz açıklıklarındaki geogridlerin performansının araştırılması, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Sha, Q., L., 1993. Two kinds of mechanism of reflective cracking, reflective cracking in pavements: state of the art and design recommendations, Second International RILEM Conference, Liege, Belgium, 441-448.
- Sheng, H., Zhou, F. ve Scullion, T., 2010. Reflection cracking-based asphalt overlay thickness design and analysis tool, Transportation Research Record, National Research Council, 12-23, Washington, USA.

- Sii, H., B., 2014. Three-dimensional finite element analysis of concrete pavement on weak foundation, Griffith School of Engineering, Griffith University, August.
- Smith, R., D., 1984. Laboratory testing of fabric interlayers for asphalt concrete paving: interim report, Transportation Research Record, National Research Council, 6-18, Washington, USA.
- Smith, T., 2001. Rehabilitating concrete pavements using CPR restoration, resurfacing, reconstruction, Transportation and Public Works Cement Association of Canada, April.
- Steen, E., R., 2000. Road maintenance technical aspects regarding the choice of geosynthetics, 4th International RILEM Conference-Reflection Cracking in Pavements, Ontario, Canada, 507–516.
- Steen, E., R., 2004. Stress relieving function of paving fabrics when used in new road construction, 5th International RILEM Conference-Cracking in Pavements, Limoges, France, 105-112.
- Steyn, W., 1996. Aspects of the structural performance of rehabilitated lightly cemented pavements. M.Eng. dissertation. University of Pretoria, South Africa.
- Steyn, W., De Beer, M. ve Visser, A., T., 1997. Thin asphalt and double seal rehabilitated lightly cemented pavements: evaluation of structural behaviour and life cycle costs, Eight International Conference on Asphalt Pavements, University of Washington, Seattle, 2, 1181-1201.
- Steyn, W., 2009. Use and application of accelerated pavement testing in pavement preservation research, Transportation Research Circular E-C139: Use of Accelerated Pavement Testing to Evaluate Maintenance and Pavement Preservation Treatments, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 49-59.
- Strauss, P. J., Du Plessis, J., Francis, V. ve A. Viljoen, W., 1998. The application and validation of an analytical method in the structural rehabilitation of a cracked rigid pavement, Annual Transportation Convention, Pretoria, South Africa.
- Song, S., H., Paulino, G., H. ve Buttlar, W., G., 2006. A bilinear cohesive zone model tailored for fracture of asphalt concrete considering viscoelastic bulk material, Engineering Fracture Mechanics, 73, 18, 2829-2849.
- Tabatabaee, N., Al-Qadi, I., L. ve Peter, B., S., 1992. Field evaluation of pavement instrumentation methods, Journal of Testing and Evaluation, 20, 144-151.
- Tanttu, L., K., 2009. Calculation method for permanent deformation of unbound pavement materials, Department of Civil and Environmental Engineering, Helsinki University, January.

- Tirupathi, R., C. ve Ashok, D., B., 1991. Introduction to finite elements in engineering, Prentice-Hall, Inc.
- Trevino, M., Dossey, T., McCullough, B., F. ve Yildirim, Y., 2004. Applicability of asphalt concrete overlays on continuously reinforced concrete pavements, FHWA/TX-05/0-4398-1, March.
- URL-1, <http://cementurk.ajansgn.com/Index/ArticleDetails/44>, 10.09.2019
- URL-2, http://tcma.ebrosur.net/cvbd/118/files/assets/common/downloads/CvBD_118.pdf, 10.09.2019
- URL-3, <https://docs.lib.purdue.edu/cgi/viewcontent.cgi?referer=https://www.google.com/&httpsredir=1&article=1638&context=roadschool>, 10.09.2019
- URL-4, <http://www.asphaltisbest.com/wp-content/uploads/2014/03/MN-thin-overlay.pdf>, 10.09.2019
- URL-5, <https://www.pavementinteractive.org/reference-desk/pavement-management/pavement-distresses/reflection-cracking/>, 10.09.2019
- URL-6, www.asphaltisbest.com/resources_engineering.asp, 10.09.2019
- URL-7, <http://muhendislik.istanbul.edu.tr/insaat/wp-content/uploads/2016/10/BSK-Kaplamali-Yollarda-Bozulmalar.pdf>, 10.09.2019
- URL-8, https://www.istanbulteknik.com/docs/asfalt_urunleri.pdf, 10.09.2019
- URL-9, <https://sites.google.com/site/afd40web/apt-facilities-outside-the-usa/europe>, 10.09.2019
- URL-10, <https://sites.google.com/site/afd40web/apt-facilities-in-the-usa>, 10.09.2019
- URL-11, http://www.geokon.com/products/manuals/3500_Earth_Pressure_Cells.pdf, 10.09.2019
- Van Deuren, H. ve Esnouf, J., 1996. Geotextile reinforced bituminous surfacing, Proceedings of 3rd International RILEM Conference, Maastricht, The Netherlands.
- Van der Merwe, C. J., Theyse, H., L., Horak, E., Hugo, F. ve Du Plessis, H., A., 1992. Evaluation of the rehabilitation design of a BTB and the effects of artificial aging using accelerated wheel load testing, Seventh International Conference on Asphalt Pavements, Nottingham, United Kingdom.
- Van Til, C., J., McCullough, B., A. ve Varga, B., A., 1972. Evaluation of AASHO interim guide for design of pavement structures, NCHRP Report 128, California.

- Von Quintus, H., L., Mallela, J., Weiss, W., Shen, S. ve Lytton, R., L., 2009. Techniques for mitigation of reflective cracks, Final Report AAPTTP 05-04, Airfield Asphalt Pavement Technology Program, Auburn University, Auburn, AL.
- Von Quintus, H., L., Mallela, J., ve Lytton, R., L., 2010. Techniques for mitigation of reflective cracks. FAA Worldwide Airport Technology Transfer Conference, Applied Research Associates, Champaign, IL.
- Walker, D., 2012. Talking Asphalt: Reflective cracking, <http://asphaltmagazine.com>.
- Wang, F., 2005. Mechanistic-empirical study of effects of truck tire pressure on asphalt pavement performance. PhD. Dissertation, University of Texas at Austin.
- Wang, W. ve Höeg, K., 2011. Cyclic behavior of asphalt concrete used as impervious core in embankment dams, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 137, 5, 536-544.
- Wang, X., Y., 2004. Intensity variation of asphalt pavement and its maintenance, Zhengzhou: Yellow River Water Conservancy Press.
- Westergaard, H., M., 1926. Analysis of stresses in concrete pavement due to variations of temperature, Sixth Annual Meeting of the Highway Research Board, December, Washington, D.C., 201-214.
- William, R., C., 2015. Reflective crack mitigation guide for flexible pavements, IHRB Project TR-641, Institute for Transportation Iowa State University, IA.
- Williamson, M., J., 2015. Finite element analysis of hot-mix asphalt layer interface bonding, Department of Civil Engineering College of Engineering, Kansas State University, Manhattan, Kansas.
- Wu, R., Harvey, J., T. ve Signore, J., M., 2012. Cracking and rutting performance of composite pavements under testing with heavy vehicle simulator, Rubberized Hot-Mix Asphalt with Gap-Graded Aggregates over Portland Cement Concrete, Transportation Research Record, National Research Council, Washington, USA, 177-184.
- Yeğinovalı, A., 2010. Niçin beton yol, TÇMB/AR-GE/Y09.01, Ağustos, Ankara.
- Yin, H., 2015. Full-scale test of thermally induced reflective cracking in airport pavements, Road Materials and Pavement Desing, 16, 1, 119-132.
- Yoder, E., J. ve Witzak, M., W., 1975. Principles of Pavement Design, 2nd edition, John Wiley and Sons, Inc.
- Zaini, A., A., Aziz, M., M., A., Kassim, K., A. ve Mustafa, K., H., 2015. A review on crack relief layer in airport runway, Jurnal Teknologi, 78, 41-48.

- Zhang, W., Wang, Q. ve Suo, C., 2008. A novel vehicle classification using embedded strain gauge sensors, *Sensors*, 8, 6952-6971.
- Zhou, F. ve Sun, L., 2002. Reflective cracking in asphalt overlay on existing PCC, *Proceedings of the 9th International Conference on Asphalt Pavements*, Copenhagen, Denmark.
- Zhou, F. ve Scullion, T., 2005. Overlay tester: a simple performance test for thermal reflective cracking, *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 74, 443- 484.



6. EKLER

EK-1

Beton kaplama ANSYS modelinin logfile dosyası

```
/PREP7
wpro,,-90.000000,
/RGB,INDEX,100,100,100,
0
/RGB,INDEX, 80, 80, 80,13
/RGB,INDEX, 60, 60, 60,14
/RGB,INDEX, 0, 0, 0,15
/REPLOT
!NCNV,2,0,0,0,0
/PREP7
!!!eleman tipi tanımlanıyor
ET,1,SOLID185
!!!malzemeler tanımlanıyor
!beton
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,1,,3e10
MPDATA,PRXY,1,,0.2
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,DENS,1,,2400
MPTEMP,,,,,,,,

!zemin
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,2,,12e6
MPDATA,PRXY,2,,0.45
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,DENS,2,,1800

!teker
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,3,,3.35e8
MPDATA,PRXY,3,,0.49
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,DENS,3,,750
!beton blok tek parca
yapılıyor
!döşemeler yapılıyor

BLC4,0,0,8.02,1.9,0.2
!derz yapılıyor
BLC5,4.01,0,0.02,1.9,0.2
!derz yerine tasındı
FLST,3,1,6,ORDE,1
FITEM,3,2
VGEN, ,P51X, , , , -0.95, ,
,1

!overlap
FLST,2,2,6,ORDE,2
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
VOVLAP,P51X

!derz silindi
VDELE, 5, , , 1

!temel yapılıyor

BLC5,4.01,0.95,8.02,1.9,1.5

!temel yolun altına tasındı
FLST,3,1,6,ORDE,1
FITEM,3,1
VGEN, ,P51X, , , , -1.5, , , 1

!glue ile birleştirildi
FLST,2,3,6,ORDE,3
FITEM,2,1
FITEM,2,3
FITEM,2,-4
VGLUE,P51X

!yük basma alanı
tanımlanıyor

!referans çizgisi 25. point

/PREP7
K,25,0,0.2,-0.9,
K,26,8.02,0.2,-0.9,
LSTR, 25, 26

!referans çizgi kopyalandı
FLST,3,1,4,ORDE,1
FITEM,3,1
LGEN,2,P51X, , , , -0.25, , 0
FLST,3,1,4,ORDE,1
FITEM,3,1
LGEN,2,P51X, , , , -0.35, , 0
FLST,3,1,4,ORDE,1
FITEM,3,1
LGEN,2,P51X, , , , -0.6, , 0

!tekerler izi
BLOCK,0,0.3,0.9,1.15,0.2,0.
23,
BLOCK,0,0.3,1.25,1.50,0.2,
0.23,

!Malzemeler atanıyor
FLST,5,2,6,ORDE,2
FITEM,5,2
FITEM,5,5
CM,_Y,VOLU
VSEL, , , ,P51X
CM,_Y1,VOLU
CMSEL,S,_Y

CMSEL,S,_Y1
VATT, 1, , 1, 0
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1

CM,_Y,VOLU
```

EK-1'in Devami

VSEL, , , , 6	FITEM,5,5	KEYOPT,3,10,2
CM,_Y1,VOLU	FITEM,5,-6	KEYOPT,3,11,0
CMSEL,S,_Y	CM,_Y,VOLU	KEYOPT,3,12,0
CMSEL,S,_Y1	VSEL, , , ,P51X	KEYOPT,3,2,0
VATT, 2, , 1, 0	CM,_Y1,VOLU	KEYOPT,2,5,0
CMSEL,S,_Y	CHKMSH,'VOLU'	
CMDELE,_Y	CMSEL,S,_Y	! Generate the target surface
CMDELE,_Y1	VCLEAR,_Y1	ASEL,S,,,14
FLST,5,2,6,ORDE,2	VSWEEP,_Y1	ASEL,A,,,18
FITEM,5,1	CMDELE,_Y	CM,_TARGET,AREA
FITEM,5,3	CMDELE,_Y1	TYPE,2
CM,_Y,VOLU	CMDELE,_Y2	NSLA,S,1
VSEL, , , ,P51X		ESLN,S,0
CM,_Y1,VOLU	!ekran ayari	ESLL,U
CMSEL,S,_Y	/GRAPHICS,FULL	ESEL,U,ENAME,,188,189
CMSEL,S,_Y1		NSLE,A,CT2
VATT, 3, , 1, 0	!kontakt kuruldu	ESURF
		CMSEL,S,_ELEMCM
!yol cizgileri silindi	/COM, CONTACT PAIR	
	CREATION - START	! Generate the contact
CMSEL,S,_Y	CM,_NODECM,NODE	surface
CMDELE,_Y	CM,_ELEMCM,ELEM	ASEL,S,,,2
CMDELE,_Y1	CM,_KPCM,KP	ASEL,A,,,15
LPLOT	CM,_LINECM,LINE	CM,_CONTACT,AREA
FLST,2,4,4,ORDE,4	CM,_AREACM,AREA	TYPE,3
FITEM,2,1	CM,_VOLUCM,VOLU	NSLA,S,1
FITEM,2,3	/GSAV,cwz,gsav,,temp	ESLN,S,0
FITEM,2,9		NSLE,A,CT2 ! CZMESH
FITEM,2,-10	!surtunme	patch (fsk qt-40109 8/2008)
LDELE,P51X, , ,1		ESURF
	MP,MU,1,0.2	ALLSEL
!mesh yapiliyor	MAT,1	ESEL,ALL
	MP,EMIS,1,7.88860905221	ESEL,S,TYPE,,2
FLST,5,58,4,ORDE,5	e-031	ESEL,A,TYPE,,3
FITEM,5,2	R,3	ESEL,R,REAL,,3
FITEM,5,4	REAL,3	/PSYMB,ESYS,1
FITEM,5,-8	ET,2,170	/PNUM,TYPE,1
FITEM,5,11	ET,3,174	/NUM,1
FITEM,5,-62	R,3,,,1.0,0.1,0,	EPLLOT
CM,_Y,LINE	RMORE,,,1.0E20,0.0,1.0,	ESEL,ALL
LSEL, , , ,P51X	RMORE,0.0,0,1.0,,1.0,0.5	
CM,_Y1,LINE	RMORE,0,1.0,1.0,0.0,,1.0	
CMSEL,,_Y	KEYOPT,3,4,0	
LESIZE,_Y1,0.10, , , , , ,1	KEYOPT,3,5,3	
FLST,5,5,6,ORDE,4	KEYOPT,3,7,0	
FITEM,5,1	KEYOPT,3,8,0	
FITEM,5,-3	KEYOPT,3,9,0	

EK-1'in Devami

ESEL,S,TYPE,,2	FITEM,2,20
ESEL,A,TYPE,,3	/GO
ESEL,R,REAL,,3	DA,P51X,UX,7.72
CMSEL,A,_NODECM	
CMDEL,_NODECM	!basinc degerleri tanimlandi
CMSEL,A,_ELEMCM	0.8 mpa
CMDEL,_ELEMCM	
CMSEL,S,_KPCM	FLST,2,2,5,ORDE,2
CMDEL,_KPCM	FITEM,2,3
CMSEL,S,_LINECM	FITEM,2,16
CMDEL,_LINECM	/GO
CMSEL,S,_AREACM	
CMDEL,_AREACM	SFA,P51X,1,PRES,800000
CMSEL,S,_VOLUCM	
CMDEL,_VOLUCM	!mesnet
/GRES,cwz,gsav	
CMDEL,_TARGET	FLST,2,1,5,ORDE,1
CMDEL,_CONTACT	FITEM,2,1
/COM, CONTACT PAIR	
CREATION - END	/GO
/MREP,EPLOTT	DA,P51X,ALL,
FINISH	
/SOL	!tekerlek sinir sartlari
!analiz ayarlari	FLST,2,8,1,ORDE,8
NSUBST,26,26,26	FITEM,2,3254
OUTRES,ERASE	FITEM,2,-3255
OUTRES,NSOL,ALL	FITEM,2,3258
OUTRES,ESOL,ALL	FITEM,2,-3259
OUTRES,NLOA,ALL	FITEM,2,4186
OUTRES,STRS,ALL	FITEM,2,-4187
OUTRES,EPEL,ALL	FITEM,2,4190
OUTRES,EPPL,ALL	FITEM,2,-4191
TIME,8	/GO
!gorsellik 0 olursa abartili 1 olursa gelecek	D,P51X, , , , ,UY,UZ, , , ,
NLGEOM,0	!beton kaplamanin sinir sartlari
!yükü ittirme ayarlari basliyor	FLST,2,2,5,ORDE,2
	FITEM,2,22
	FITEM,2,26
FLST,2,2,5,ORDE,2	/GO
FITEM,2,6	DA,P51X,UZ,

EK-1'in Devamı

Beton üstü 50 mm asfalt kaplama ve RP güçlendirme ANSYS modelinin logfile dosyası

/PREP7	MPDATA,PRXY,2,,0.45	TBPT,,0.00030133,351445
wpro,,-90.000000,	MPTEMP,,,,,,,,	TBPT,,0.00031512,361660
/RGB,INDEX,100,100,100,	MPTEMP,1,0	TBPT,,0.00035438,414574
0	MPDATA,DENS,2,,1800	
/RGB,INDEX, 80, 80, 80,13	!teker	!alt zemin yapiliyor
/RGB,INDEX, 60, 60, 60,14		! koordinatlar esas alınarak
/RGB,INDEX, 0, 0, 0,15	MPTEMP,1,0	(X0,Xs,Z0,Zs,Y0,Ys), asfalt
/REPLOT	MPDATA,EX,3,,3.35e8	5 cm eklendiğinde Y0 ve Ys
!NCNV,2,0,0,0,0	MPDATA,PRXY,3,,0.49	degisecek
/PREP7	MPTEMP,,,,,,,,	BLOCK,0,8.02,0,1.9,0,1.5,
	MPTEMP,1,0	
!!!eleman tipi tanımlaniyor	MPDATA,DENS,3,,750	!1. beton blok yapiliyor
ET,1,SOLID185	!RP	BLOCK,0,4,0,1.9,1.5,1.7,
ET,2,SOLID185	MPTEMP,1,0	!2. beton blok yapiliyor
ET,3,SOLID185	MPDATA,EX,4,,1.37e5	
ET,4,SOLID185	MPDATA,PRXY,4,,0.463	BLOCK,4.02,8.02,0,1.9,1.5,
	MPTEMP,,,,,,,,	1.7,
	MPTEMP,1,0	!derz yapiliyor
ET,5,SOLID185	MPDATA,DENS,4,,1300	
	!asfalt 50 mm	BLOCK,4,4.02,0,1.9,1.5,1.7,
ET,6,SOLID185		
ET,7,SOLID185	MPTEMP,,,,,,,,	!guclendirme seviyesi asfalt
	MPTEMP,1,0	tabakasi olusturuluyor
	MPDATA,EX,5,,1.4e9	!1. ince asfalt tabakasi
!!!malzemeler tanımlaniyor	MPDATA,PRXY,5,,0.35	BLOCK,0,3.9,0,1.9,1.7,1.70
	MPTEMP,,,,,,,,	3,
!beton	MPTEMP,1,0	!2. ince asfalt tabakasi
	MPDATA,DENS,5,,2100	BLOCK,4.12,8.02,0,1.9,1.7,
MPTEMP,,,,,,,,	TBDE,KINH,5,,	1.703,
MPTEMP,1,0	TB,KINH,5,1,13,0	!1 .guclendirme asfalt
MPDATA,EX,1,,3e10	TBTEMP,0	tabakasi
MPDATA,PRXY,1,,0.2	TBPT,,0.00004775,66843.56	BLOCK,3.9,4,0,1.9,1.7,1.70
MPTEMP,,,,,,,,	TBPT,,0.00006897,81892	3,
MPTEMP,1,0	TBPT,,0.00008700,100650	!2 .guclendirme asfalt
MPDATA,DENS,1,,2400	TBPT,,0.00012202,143309	tabakasi
MPTEMP,,,,,,,,	TBPT,,0.00013369,156957	BLOCK,4,4.02,0,1.9,1.7,1.7
	TBPT,,0.00016021,180816	03,
!zemin	TBPT,,0.00017401,194456	!3 .guclendirme asfalt
	TBPT,,0.00022281,259316	tabakasi
MPTEMP,1,0	TBPT,,0.00023979,279791	BLOCK,4.02,4.12,0,1.9,1.7,
MPDATA,EX,2,,12e6	TBPT,,0.00025783,291700	1.703,

EK-1'in Devamı

!guclendirme ustü asfalt tabakası	FLST,5,2,6,ORDE,2 FITEM,5,1	!derz ve guclendirme ataniyor
!1. kalın asfalt tabakası BLOCK,0,3.9,0,1.9,1.703,1.75,	FITEM,5,-2 CM,_Y,VOLU VSEL, , , ,P51X CM,_Y1,VOLU CMSEL,S,_Y	FLST,5,4,6,ORDE,4 FITEM,5,15 FITEM,5,18 FITEM,5,21 FITEM,5,-22 CM,_Y,VOLU VSEL, , , ,P51X CM,_Y1,VOLU CMSEL,S,_Y
!2. kalın asfalt tabakası BLOCK,4.12,8.02,0,1.9,1.703,1.75,	CMSEL,S,_Y1 VATT, 3, , 3, 0	CMSEL,S,_Y1 VATT, 4, , 4, 0
!1 .guclendirme ustü asfalt tabakası BLOCK,3.9,4,0,1.9,1.703,1.75,	CMSEL,S,_Y CMDELE,_Y CMDELE,_Y1	CMSEL,S,_Y VATT, 4, , 4, 0 CMSEL,S,_Y CMDELE,_Y CMDELE,_Y1
!2 .guclendirme ustü asfalt tabakası BLOCK,4,4.02,0,1.9,1.703,1.75,	!zemin ataniyor CM,_Y,VOLU VSEL, , , , 28 CM,_Y1,VOLU CMSEL,S,_Y	!asfaltlar ataniyor
!3 .guclendirme ustü asfalt tabakası BLOCK,4.02,4.12,0,1.9,1.703,1.75,	CMSEL,S,_Y1 VATT, 2, , 2, 0	FLST,5,7,6,ORDE,6 FITEM,5,16 FITEM,5,-17 FITEM,5,19 FITEM,5,-20 FITEM,5,23 FITEM,5,-25 CM,_Y,VOLU VSEL, , , ,P51X CM,_Y1,VOLU CMSEL,S,_Y
!glue yapiliyor	CMSEL,S,_Y CMDELE,_Y CMDELE,_Y1	CMSEL,S,_Y1 VATT, 5, , 5, 0 CMSEL,S,_Y CMDELE,_Y CMDELE,_Y1
FLST,2,14,6,ORDE,2 FITEM,2,1 FITEM,2,-14 VGLUE,P51X	!beton ataniyor	CMSEL,S,_Y1 VATT, 5, , 5, 0 CMSEL,S,_Y CMDELE,_Y CMDELE,_Y1
!tekerler koordinatlar esas alınarak (X0,Xs,Z0,Zs,Y0,Ys), asfalt 5 cm eklendiginde Y0 ve Ys degisecek	FLST,5,2,6,ORDE,2 FITEM,5,26 FITEM,5,-27 CM,_Y,VOLU VSEL, , , ,P51X CM,_Y1,VOLU CMSEL,S,_Y	CMSEL,S,_Y1 VATT, 5, , 5, 0 CMSEL,S,_Y CMDELE,_Y CMDELE,_Y1
BLOCK,0,0.3,0.9,1.15,1.75,1.78,	CMSEL,S,_Y1 VATT, 1, , 1, 0	!mesh yapiliyor
BLOCK,0,0.3,1.25,1.5,1.75,1.78,	CMSEL,S,_Y CMDELE,_Y CMDELE,_Y1	FLST,5,122,4,ORDE,21 FITEM,5,1 FITEM,5,-44 FITEM,5,51 FITEM,5,53
!mesh attributes !tekerler ataniyor		

EK-1'in Devamı

FITEM,5,-56	FITEM,5,-180	R,3
FITEM,5,58	FITEM,5,191	REAL,3
FITEM,5,-59	FITEM,5,-194	ET,8,170
FITEM,5,61	FITEM,5,203	ET,9,174
FITEM,5,65	FITEM,5,-204	R,3,,,1.0,0.1,0,
FITEM,5,-69	FITEM,5,207	RMORE,,,1.0E20,0.0,1.0,
FITEM,5,72	FITEM,5,-208	RMORE,0.0,0,1.0,,1.0,0.5
FITEM,5,78	CM,_Y,LINE	RMORE,0,1.0,1.0,0.0,,1.0
FITEM,5,90	LSEL, , , ,P51X	KEYOPT,9,4,0
FITEM,5,113	CM,_Y1,LINE	KEYOPT,9,5,3
FITEM,5,-116	CMSEL,,_Y	KEYOPT,9,7,0
FITEM,5,125		KEYOPT,9,8,0
FITEM,5,-128	LESIZE,_Y1,0.01, , , , , ,1	KEYOPT,9,9,0
FITEM,5,138		KEYOPT,9,10,2
FITEM,5,150	FLST,5,16,6,ORDE,4	KEYOPT,9,11,0
FITEM,5,169	FITEM,5,1	KEYOPT,9,12,0
FITEM,5,-220	FITEM,5,-2	KEYOPT,9,2,0
CM,_Y,LINE	FITEM,5,15	KEYOPT,8,5,0
LSEL, , , ,P51X	FITEM,5,-28	! Generate the target surface
CM,_Y1,LINE	CM,_Y,VOLU	ASEL,S,,,56
CMSEL,,_Y	VSEL, , , ,P51X	ASEL,A,,,62
	CM,_Y1,VOLU	ASEL,A,,,119
LESIZE,_Y1,0.1, , , , , ,1	CHKMSH,'VOLU'	ASEL,A,,,123
	CMSEL,S,_Y	ASEL,A,,,126
!sweep		CM,_TARGET,AREA
FLST,5,16,6,ORDE,4		TYPE,8
FITEM,5,1	VCLEAR,_Y1	NSLA,S,1
FITEM,5,-2	VSWEEP,_Y1	ESLN,S,0
FITEM,5,15		ESLL,U
FITEM,5,-28	CMDELE,_Y	ESEL,U,ENAME,,188,189
CM,_Y,VOLU	CMDELE,_Y1	NSLE,A,CT2
VSEL, , , ,P51X	CMDELE,_Y2	ESURF
CM,_Y1,VOLU		CMSEL,S,_ELEMCM
CHKMSH,'VOLU'	!contact olusturuluyor	
CMSEL,S,_Y	/COM, CONTACT PAIR	! Generate the contact
	CREATION - START	surface
VSWEEP,_Y1	CM,_NODECM,NODE	ASEL,S,,,2
	CM,_ELEMCM,ELEM	ASEL,A,,,10
CMDELE,_Y	CM,_KPCM,KP	CM,_CONTACT,AREA
CMDELE,_Y1	CM,_LINECM,LINE	TYPE,9
CMDELE,_Y2	CM,_AREACM,AREA	NSLA,S,1
	CM,_VOLUCM,VOLU	ESLN,S,0
	/GSAV,cwz,gsav,,temp	NSLE,A,CT2 ! CZMESH
! 1cm lik mesh kısmi	MP,MU,5,0.01	patch (fsk qt-40109 8/2008)
	MAT,5	ESURF
FLST,5,12,4,ORDE,8	MP,EMIS,5,7.88860905221	ALLSEL
FITEM,5,177	e-031	ESEL,ALL

EK-1'in Devamı

ESEL,S,TYPE,,8	!yükü itirme ayarlari	DA,P51X,UZ,
ESEL,A,TYPE,,9	basliyor	
ESEL,R,REAL,,3		!nodes tutuldu
/PSYMB,ESYS,1	FLST,2,2,5,ORDE,2	
/PNUM,TYPE,1	FITEM,2,8	FLST,2,8,1,ORDE,8
/NUM,1	FITEM,2,15	FITEM,2,5324
EPlot		FITEM,2,-5325
ESEL,ALL	/GO	FITEM,2,5328
ESEL,S,TYPE,,8	DA,P51X,UX,7.72	FITEM,2,-5329
ESEL,A,TYPE,,9		FITEM,2,5336
ESEL,R,REAL,,3	!basinc degerleri tanimlandi	FITEM,2,-5337
CMSEL,A,_NODECM	0.8 mpa	FITEM,2,5340
CMDEL,_NODECM		FITEM,2,-5341
CMSEL,A,_ELEMCM	FLST,2,2,5,ORDE,2	
CMDEL,_ELEMCM	FITEM,2,3	/GO
CMSEL,S,_KPCM	FITEM,2,11	D,P51X, , , , ,UY,UZ, , , ,
CMDEL,_KPCM	/GO	
CMSEL,S,_LINECM		!stifness
CMDEL,_LINECM	SFA,P51X,1,PRES,800000	/PREP7
CMSEL,S,_AREACM		/COM, CONTACT PAIR
CMDEL,_AREACM	!zeminin alti 3 yonden	PROPERTIES - START
CMSEL,S,_VOLUCM	tutuldu	RMODIF,3,3,-100000000
CMDEL,_VOLUCM		/COM, CONTACT PAIR
/GRES,cwz,gsav	FLST,2,1,5,ORDE,1	PROPERTIES - END
CMDEL,_TARGET	FITEM,2,1	/MREP,EPlot
CMDEL,_CONTACT		
/COM, CONTACT PAIR	/GO	
CREATION - END	DA,P51X,ALL,	
!analiz ayarlari yapildi	!yuzeyler yandan tutuldu	
	/SOL	
/SOL	FLST,2,13,5,ORDE,13	
NSUBST,26,26,26	FITEM,2,88	
OUTRES,ERASE	FITEM,2,92	
OUTRES,NSOL,ALL	FITEM,2,95	
OUTRES,ESOL,ALL	FITEM,2,101	
OUTRES,NLOA,ALL	FITEM,2,105	
OUTRES,STRS,ALL	FITEM,2,108	
OUTRES,EPEL,ALL	FITEM,2,114	
OUTRES,EPPL,ALL	FITEM,2,117	
TIME,8	FITEM,2,121	
	FITEM,2,125	
!gorsellik o olursa abartili 1	FITEM,2,128	
olursa gercek	FITEM,2,132	
NLGEOM,0	FITEM,2,136	
	/GO	

EK-1'in Devamı

Beton üstü 50 mm asfalt kaplama ve SP güçlendirme ANSYS modelinin logfile dosyası

/PREP7	MPDATA,PRXY,2,,0.45	TBPT,,0.00030133,351445
wpro,,-90.000000,	MPTEMP,,,,,,,,	TBPT,,0.00031512,361660
/RGB,INDEX,100,100,100,	MPTEMP,1,0	TBPT,,0.00035438,414574
0	MPDATA,DENS,2,,1800	
/RGB,INDEX, 80, 80, 80,13	!teker	!celik
/RGB,INDEX, 60, 60, 60,14		MPTEMP,,,,,,,,
/RGB,INDEX, 0, 0, 0,15	MPTEMP,1,0	MPTEMP,1,0
/REPLOT	MPDATA,EX,3,,3.35e8	MPDATA,EX,6,,2.1e11
!NCNV,2,0,0,0,0	MPDATA,PRXY,3,,0.49	MPDATA,PRXY,6,,0.3
/PREP7	MPTEMP,,,,,,,,	MPTEMP,,,,,,,,
!!!eleman tipi tanımlanıyor	MPTEMP,1,0	MPTEMP,1,0
	MPDATA,DENS,3,,750	MPDATA,DENS,6,,7850
ET,1,SOLID185	!kauçuk	MPTEMP,,,,,,,,
		!alt zemin yapılıyor
ET,2,SOLID185	MPTEMP,1,0	! koordinatlar esas alınarak
	MPDATA,EX,4,,1.37e5	(X0,Xs,Z0,Zs,Y0,Ys), asfalt
ET,3,SOLID185	MPDATA,PRXY,4,,0.463	5 cm eklendiğinde Y0 ve Ys
	MPTEMP,,,,,,,,	değişecek
ET,4,SOLID185	MPTEMP,1,0	
	MPDATA,DENS,4,,1300	BLOCK,0,8.02,0,1.9,0,1.5,
ET,5,SOLID185		
	!asfalt 50 mm	!1. beton blok yapılıyor
ET,6,SOLID185		
	MPTEMP,,,,,,,,	BLOCK,0,4,0,1.9,1.5,1.7,
ET,7,SOLID185	MPTEMP,1,0	
	MPDATA,EX,5,,1.4e9	!2. beton blok yapılıyor
!!!malzemeler tanımlanıyor	MPDATA,PRXY,5,,0.35	
	MPTEMP,,,,,,,,	BLOCK,4,02,8.02,0,1.9,1.5,
!beton	MPTEMP,1,0	1.7,
	MPDATA,DENS,5,,2100	
MPTEMP,,,,,,,,	TBDE,KINH,5,,	!derz yapılıyor
MPTEMP,1,0	TB,KINH,5,1,13,0	
MPDATA,EX,1,,3e10	TBTEMP,0	BLOCK,4,4.02,0,1.9,1.5,1.7,
MPDATA,PRXY,1,,0.2	TBPT,,0.00004775,66843.56	
MPTEMP,,,,,,,,	TBPT,,0.00006897,81892	!güçlendirme seviyesi asfalt
MPTEMP,1,0	TBPT,,0.00008700,100650	tabakası oluşturuluyor
MPDATA,DENS,1,,2400	TBPT,,0.00012202,143309	
MPTEMP,,,,,,,,	TBPT,,0.00013369,156957	!1. ince asfalt tabakası
	TBPT,,0.00016021,180816	BLOCK,0,3.9,0,1.9,1.7,1.70
!zemin	TBPT,,0.00017401,194456	3,
	TBPT,,0.00022281,259316	
MPTEMP,1,0	TBPT,,0.00023979,279791	!2. ince asfalt tabakası
MPDATA,EX,2,,12e6	TBPT,,0.00025783,291700	

EK-1'in Devamı

BLOCK,4.12,8.02,0,1.9,1.7,1.703,	FITEM,2,1 FITEM,2,-14 VGLUE,P51X	FLST,5,2,6,ORDE,2 FITEM,5,26 FITEM,5,-27 CM,_Y,VOLU VSEL, , , P51X CM,_Y1,VOLU CMSEL,S,_Y
!1 .guclendirme asfalt tabakasi BLOCK,3.9,4,0,1.9,1.7,1.703,	!tekerler koordinatlar esas alınarak (X0,Xs,Z0,Zs,Y0,Ys), asfalt 5 cm eklendiginde Y0 ve Ys degisecek BLOCK,0,0.3,0.9,1.15,1.75,1.78, BLOCK,0,0.3,1.25,1.5,1.75,1.78,	CMSEL,S,_Y1 VATT, 1, , 1, 0 CMSEL,S,_Y CMDELE,_Y CMDELE,_Y1
!2 .guclendirme asfalt tabakasi BLOCK,4,4.02,0,1.9,1.7,1.703,	!mesh attributes	
!3 .guclendirme asfalt tabakasi BLOCK,4.02,4.12,0,1.9,1.7,1.703,	!tekerler ataniyor	!derz ataniyor
!guclendirme ustü asfalt tabakasi	FLST,5,2,6,ORDE,2 FITEM,5,1 FITEM,5,-2 CM,_Y,VOLU VSEL, , , P51X CM,_Y1,VOLU CMSEL,S,_Y	FLST,5,4,6,ORDE,4 FITEM,5,15 CM,_Y,VOLU VSEL, , , P51X CM,_Y1,VOLU CMSEL,S,_Y
!1. kalın asfalt tabakasi BLOCK,0,3.9,0,1.9,1.703,1.75,	CMSEL,S,_Y1 VATT, 3, , 3, 0 CMSEL,S,_Y CMDELE,_Y CMDELE,_Y1	CMSEL,S,_Y1 VATT, 4, , 4, 0 CMSEL,S,_Y CMDELE,_Y CMDELE,_Y1
!2. kalın asfalt tabakasi BLOCK,4.12,8.02,0,1.9,1.703,1.75,	!zemin ataniyor	!asfaltlar ataniyor
!1 .guclendirme ustü asfalt tabakasi BLOCK,3.9,4,0,1.9,1.703,1.75,	CM,_Y,VOLU VSEL, , , 28 CM,_Y1,VOLU CMSEL,S,_Y	FLST,5,7,6,ORDE,6 FITEM,5,16 FITEM,5,-17 FITEM,5,19 FITEM,5,-20 FITEM,5,23 FITEM,5,-25 CM,_Y,VOLU VSEL, , , P51X CM,_Y1,VOLU CMSEL,S,_Y
!2 .guclendirme ustü asfalt tabakasi BLOCK,4,4.02,0,1.9,1.703,1.75,	CMSEL,S,_Y1 VATT, 2, , 2, 0 CMSEL,S,_Y CMDELE,_Y CMDELE,_Y1	
!3 .guclendirme ustü asfalt tabakasi BLOCK,4.02,4.12,0,1.9,1.703,1.75,		
!glue yapiliyor		
FLST,2,14,6,ORDE,2	!beton ataniyor	

EK-1'in Devami

CMSEL,S,_Y1	FITEM,5,-220	FITEM,5,-2
VATT, 5, , 5, 0	CM,_Y,LINE	FITEM,5,15
CMSEL,S,_Y	LSEL, , , ,P51X	FITEM,5,-28
CMDELE,_Y	CM,_Y1,LINE	CM,_Y,VOLU
CMDELE,_Y1	CMSEL,,_Y	VSEL, , , ,P51X
!celik guclendirme ataniyor	LESIZE,_Y1,0.1, , , , , ,1	CM,_Y1,VOLU
FLST,5,3,6,ORDE,3		CHKMSH,'VOLU'
FITEM,5,18		CMSEL,S,_Y
FITEM,5,21	!sweep	
FITEM,5,-22	FLST,5,16,6,ORDE,4	VCLEAR,_Y1
CM,_Y,VOLU	FITEM,5,1	VSWEEP,_Y1
VSEL, , , ,P51X	FITEM,5,-2	
CM,_Y1,VOLU	FITEM,5,15	CMDELE,_Y
CMSEL,S,_Y	FITEM,5,-28	CMDELE,_Y1
	CM,_Y,VOLU	CMDELE,_Y2
CMSEL,S,_Y1	VSEL, , , ,P51X	
VATT, 6, , 6, 0	CM,_Y1,VOLU	!contact olusturuluyor
CMSEL,S,_Y	CHKMSH,'VOLU'	
CMDELE,_Y	CMSEL,S,_Y	/COM, CONTACT PAIR
CMDELE,_Y1		CREATION - START
	VSWEEP,_Y1	CM,_NODECM,NODE
!hacim 15 siliniyor		CM,_ELEMCM,ELEM
VDELE, 15, , ,1	CMDELE,_Y	CM,_KPCM,KP
!mesh yapiliyor	CMDELE,_Y1	CM,_LINECM,LINE
FLST,5,122,4,ORDE,21	CMDELE,_Y2	CM,_AREACM,AREA
FITEM,5,1		CM,_VOLUCM,VOLU
FITEM,5,-44	! 1cm lik mesh kısmi	/GSAV,cwz,gsav,,temp
FITEM,5,51	FLST,5,12,4,ORDE,8	MP,MU,5,0.01
FITEM,5,53	FITEM,5,177	MAT,5
FITEM,5,-56	FITEM,5,-180	MP,EMIS,5,7.88860905221
FITEM,5,58	FITEM,5,191	e-031
FITEM,5,-59	FITEM,5,-194	R,3
FITEM,5,61	FITEM,5,203	REAL,3
FITEM,5,65	FITEM,5,-204	ET,8,170
FITEM,5,-69	FITEM,5,207	ET,9,174
FITEM,5,72	FITEM,5,-208	R,3,,1.0,0.1,0,
FITEM,5,78	CM,_Y,LINE	RMORE,,1.0E20,0.0,1.0,
FITEM,5,90	LSEL, , , ,P51X	RMORE,0.0,0,1.0,,1.0,0.5
FITEM,5,113	CM,_Y1,LINE	RMORE,0,1.0,1.0,0.0,,1.0
FITEM,5,-116	CMSEL,,_Y	KEYOPT,9,4,0
FITEM,5,125		KEYOPT,9,5,3
FITEM,5,-128	LESIZE,_Y1,0.01, , , , , ,1	KEYOPT,9,7,0
FITEM,5,138		KEYOPT,9,8,0
FITEM,5,150	FLST,5,16,6,ORDE,4	KEYOPT,9,9,0
FITEM,5,169	FITEM,5,1	

EK-1'in Devami

KEYOPT,9,10,2	CMDEL,_ELEMCM	!zeminin alti 3 yonden
KEYOPT,9,11,0	CMSEL,S,_KPCM	tutuldu
KEYOPT,9,12,0	CMDEL,_KPCM	FLST,2,1,5,ORDE,1
KEYOPT,9,2,0	CMSEL,S,_LINECM	FITEM,2,1
KEYOPT,8,5,0	CMDEL,_LINECM	
! Generate the target surface	CMSEL,S,_AREACM	/GO
ASEL,S,,,56	CMDEL,_AREACM	DA,P51X,ALL,
ASEL,A,,,62	CMSEL,S,_VOLUCM	!yuzeyler yandan tutuldu
ASEL,A,,,119	CMDEL,_VOLUCM	/SOL
ASEL,A,,,123	/GRES,cwz,gsav	FLST,2,13,5,ORDE,13
ASEL,A,,,126	CMDEL,_TARGET	FITEM,2,88
CM,_TARGET,AREA	CMDEL,_CONTACT	FITEM,2,92
TYPE,8	/COM, CONTACT PAIR	FITEM,2,95
NSLA,S,1	CREATION - END	FITEM,2,101
ESLN,S,0	!analiz ayarlari yapildi	FITEM,2,105
ESLL,U	/SOL	FITEM,2,108
ESEL,U,ENAME,,188,189	NSUBST,26,26,26	FITEM,2,114
NSLE,A,CT2	OUTRES,ERASE	FITEM,2,117
ESURF	OUTRES,NSOL,ALL	FITEM,2,121
CMSEL,S,_ELEMCM	OUTRES,ESOL,ALL	FITEM,2,125
! Generate the contact	OUTRES,NLOA,ALL	FITEM,2,128
surface	OUTRES,STRS,ALL	FITEM,2,132
ASEL,S,,,2	OUTRES,EPEL,ALL	FITEM,2,136
ASEL,A,,,10	OUTRES,EPPL,ALL	
CM,_CONTACT,AREA	TIME,8	/GO
TYPE,9	!gorsellik o olursa abartili 1	DA,P51X,UZ,
NSLA,S,1	olursa gercek	!nodes tutuldu
ESLN,S,0	NLGEOM,0	FLST,2,8,1,ORDE,8
NSLE,A,CT2 ! CZMESH	!yükü ittirme ayarlari	FITEM,2,5573
patch (fsk qt-40109 8/2008)	basliyor	FITEM,2,-5574
ESURF	FLST,2,2,5,ORDE,2	FITEM,2,5577
ALLSEL	FITEM,2,8	FITEM,2,-5578
ESEL,ALL	FITEM,2,15	FITEM,2,5585
ESEL,S,TYPE,,8		FITEM,2,-5586
ESEL,A,TYPE,,9	/GO	FITEM,2,5589
ESEL,R,REAL,,3	DA,P51X,UX,7.72	FITEM,2,-5590
/PSYMB,ESYS,1	!basinc degerleri tanimlandi	
/PNUM,TYPE,1	0.8 mpa	/GO
/NUM,1		D,P51X, , , , ,UY,UZ, , , ,
EPLOT	FLST,2,2,5,ORDE,2	!stiffness
ESEL,ALL	FITEM,2,3	/PREP7
ESEL,S,TYPE,,8	FITEM,2,11	/COM, CONTACT PAIR
ESEL,A,TYPE,,9	/GO	PROPERTIES - START
ESEL,R,REAL,,3		RMODIF,3,3,-100000000
CMSEL,A,_NODECM	SFA,P51X,1,PRES,800000	/COM, CONTACT PAIR
CMDEL,_NODECM		PROPERTIES - END
CMSEL,A,_ELEMCM		

EK-1'in Devamı

Beton üstü 50 mm asfalt kaplama ve RJF güçlendirme ANSYS modelinin logfile dosyası

/PREP7	MPTEMP,,,,,,,,	TBPT,,0.00031512,361660
wpro,,-90.000000,	MPTEMP,1,0	TBPT,,0.00035438,414574
/RGB,INDEX,100,100,100,	MPDATA,DENS,2,,1800	
0	!teker	!alt zemin yapiliyor
/RGB,INDEX, 80, 80, 80,13		! koordinatlar esas alınarak
/RGB,INDEX, 60, 60, 60,14	MPTEMP,1,0	(X0,Xs,Z0,Zs,Y0,Ys), asfalt
/RGB,INDEX, 0, 0, 0,15	MPDATA,EX,3,,3.35e8	5 cm eklendiğinde Y0 ve Ys
/REPLOT	MPDATA,PRXY,3,,0.49	degisecek
!NCNV,2,0,0,0,0	MPTEMP,,,,,,,,	BLOCK,0,8.02,0,1.9,0,1.5,
/PREP7	MPTEMP,1,0	
	MPDATA,DENS,3,,750	!1. beton blok yapiliyor
!!!eleman tipi tanımlaniyor	!kauçuk	BLOCK,0,4,0,1.9,1.5,1.7,
ET,1,SOLID185		
	MPTEMP,1,0	!2. beton blok yapiliyor
ET,2,SOLID185	MPDATA,EX,4,,1.37e5	
	MPDATA,PRXY,4,,0.463	BLOCK,4,02,8.02,0,1.9,1.5,
ET,3,SOLID185	MPTEMP,,,,,,,,	1.7,
	MPTEMP,1,0	
ET,4,SOLID185	MPDATA,DENS,4,,1300	!derz yapiliyor
ET,5,SOLID185	!asfalt 50 mm	BLOCK,4,4.02,0,1.9,1.5,1.7,
ET,6,SOLID185	MPTEMP,,,,,,,,	!guçlendirme seviyesi asfalt
	MPTEMP,1,0	tabakasi oluşturuluyor
ET,7,SOLID185	MPDATA,EX,5,,1.4e9	!1. ince asfalt tabakasi
	MPDATA,PRXY,5,,0.35	BLOCK,0,3.9,0,1.9,1.7,1.70
!!!malzemeler tanımlaniyor	MPTEMP,,,,,,,,	3,
	MPTEMP,1,0	!2. ince asfalt tabakasi
!beton	MPDATA,DENS,5,,2100	BLOCK,4,12,8.02,0,1.9,1.7,
	TBDE,KINH,5,,	1.703,
MPTEMP,,,,,,,,	TB,KINH,5,1,13,0	!1 .guçlendirme asfalt
MPTEMP,1,0	TBTEMP,0	tabakasi
MPDATA,EX,1,,3e10	TBPT,,0.00004775,66843.56	BLOCK,3,9,4,0,1.9,1.7,1.70
MPDATA,PRXY,1,,0.2	TBPT,,0.00006897,81892	3,
MPTEMP,,,,,,,,	TBPT,,0.00008700,100650	!2 .guçlendirme asfalt
MPTEMP,1,0	TBPT,,0.00012202,143309	tabakasi
MPDATA,DENS,1,,2400	TBPT,,0.00013369,156957	BLOCK,4,4.02,0,1.9,1.7,1.7
MPTEMP,,,,,,,,	TBPT,,0.00016021,180816	03,
	TBPT,,0.00017401,194456	!3 .guçlendirme asfalt
!zemin	TBPT,,0.00022281,259316	tabakasi
MPTEMP,1,0	TBPT,,0.00023979,279791	BLOCK,4,02,4.12,0,1.9,1.7,
MPDATA,EX,2,,12e6	TBPT,,0.00025783,291700	1.703,
MPDATA,PRXY,2,,0.45	TBPT,,0.00030133,351445	

EK-1'in Devamı

!guclendirme ustü asfalt tabakasi	FLST,5,2,6,ORDE,2 FITEM,5,1	!derz ataniyor CM,_Y,VOLU VSEL, , , , 15 CM,_Y1,VOLU CMSEL,S,_Y
!1. kalın asfalt tabakasi BLOCK,0,3.9,0,1.9,1.703,1.75,	FITEM,5,-2 CM,_Y,VOLU VSEL, , , ,P51X CM,_Y1,VOLU CMSEL,S,_Y	CMSEL,S,_Y1 VATT, 4, , 4, 0 CMSEL,S,_Y CMDELE,_Y CMDELE,_Y1
!2. kalın asfalt tabakasi BLOCK,4.12,8.02,0,1.9,1.703,1.75,	CMSEL,S,_Y1 VATT, 3, , 3, 0	!asfaltlar ataniyor FLST,5,10,6,ORDE,2 FITEM,5,16 FITEM,5,-25 CM,_Y,VOLU VSEL, , , ,P51X CM,_Y1,VOLU CMSEL,S,_Y
!1 .guclendirme ustü asfalt tabakasi BLOCK,3.9,4,0,1.9,1.703,1.75,	CMSEL,S,_Y CMDELE,_Y CMDELE,_Y1	!zemin ataniyor CM,_Y,VOLU VSEL, , , , 28 CM,_Y1,VOLU CMSEL,S,_Y
!2 .guclendirme ustü asfalt tabakasi BLOCK,4,4.02,0,1.9,1.703,1.75,	!zemin ataniyor CM,_Y,VOLU VSEL, , , , 28 CM,_Y1,VOLU CMSEL,S,_Y	CMSEL,S,_Y1 VATT, 5, , 5, 0 CMSEL,S,_Y CMDELE,_Y CMDELE,_Y1
!3 .guclendirme ustü asfalt tabakasi BLOCK,4.02,4.12,0,1.9,1.703,1.75,	CMSEL,S,_Y1 VATT, 2, , 2, 0	!mesh yapiliyor FLST,5,122,4,ORDE,21 FITEM,5,1 FITEM,5,-44 FITEM,5,51 FITEM,5,53 FITEM,5,-56 FITEM,5,58 FITEM,5,-59 FITEM,5,61 FITEM,5,65 FITEM,5,-69 FITEM,5,72 FITEM,5,78 FITEM,5,90 FITEM,5,113 FITEM,5,-116
!glue yapiliyor	CMSEL,S,_Y CMDELE,_Y CMDELE,_Y1	
FLST,2,14,6,ORDE,2 FITEM,2,1 FITEM,2,-14 VGLUE,P51X	!beton ataniyor FLST,5,2,6,ORDE,2 FITEM,5,26 FITEM,5,-27 CM,_Y,VOLU VSEL, , , ,P51X CM,_Y1,VOLU CMSEL,S,_Y	
!tekerler koordinatlar esas alınarak (X0,Xs,Z0,Zs,Y0,Ys), asfalt 5 cm eklendiginde Y0 ve Ys degisecek	CMSEL,S,_Y1 VATT, 1, , 1, 0	
BLOCK,0,0.3,0.9,1.15,1.75,1.78,	CMSEL,S,_Y CMDELE,_Y CMDELE,_Y1	
BLOCK,0,0.3,1.25,1.5,1.75,1.78,		
!mesh attributes		
!tekerler ataniyor		

EK-1'in Devamı

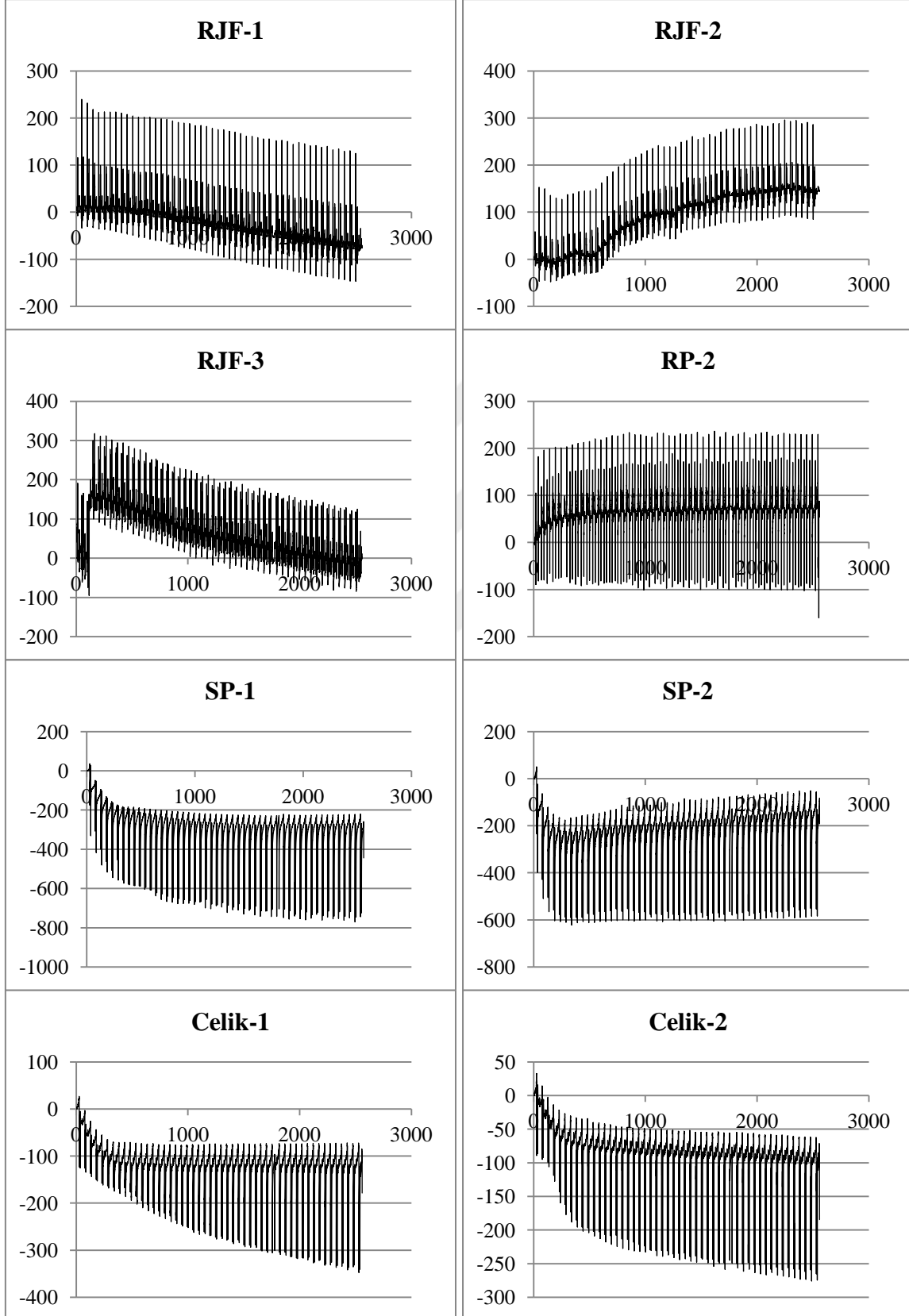
FITEM,5,125	FLST,5,16,6,ORDE,4	KEYOPT,9,12,0
FITEM,5,-128	FITEM,5,1	KEYOPT,9,2,0
FITEM,5,138	FITEM,5,-2	KEYOPT,8,5,0
FITEM,5,150	FITEM,5,15	! Generate the target surface
FITEM,5,169	FITEM,5,-28	ASEL,S,,,56
FITEM,5,-220	CM,_Y,VOLU	ASEL,A,,,62
CM,_Y,LINE	VSEL, , , ,P51X	ASEL,A,,,119
LSEL, , , ,P51X	CM,_Y1,VOLU	ASEL,A,,,123
CM,_Y1,LINE	CHKMSH,'VOLU'	ASEL,A,,,126
CMSEL,,_Y	CMSEL,S,_Y	CM,_TARGET,AREA
	VCLEAR,_Y1	TYPE,8
LESIZE,_Y1,0.10, , , , , ,1	VSWEAP,_Y1	NSLA,S,1
	CMDELE,_Y	ESLN,S,0
!sweep	CMDELE,_Y1	ESLL,U
FLST,5,16,6,ORDE,4	CMDELE,_Y2	ESEL,U,ENAME,,188,189
FITEM,5,1		NSLE,A,CT2
FITEM,5,-2	!contact olusturuluyor	ESURF
FITEM,5,15	/COM, CONTACT PAIR	CMSEL,S,_ELEMCM
FITEM,5,-28	CREATION - START	! Generate the contact
CM,_Y,VOLU	CM,_NODECM,NODE	surface
VSEL, , , ,P51X	CM,_ELEMCM,ELEM	ASEL,S,,,2
CM,_Y1,VOLU	CM,_KPCM,KP	ASEL,A,,,10
CHKMSH,'VOLU'	CM,_LINECM,LINE	CM,_CONTACT,AREA
CMSEL,S,_Y	CM,_AREACM,AREA	TYPE,9
VSWEAP,_Y1	CM,_VOLUCM,VOLU	NSLA,S,1
CMDELE,_Y	/GSAV,cwz,gsav,,temp	ESLN,S,0
CMDELE,_Y1	MP,MU,5,0.01	NSLE,A,CT2 ! CZMESH
CMDELE,_Y2	MAT,5	patch (fsk qt-40109 8/2008)
	MP,EMIS,5,7.88860905221	ESURF
! 1cm lik mesh kısmı	e-031	ALLSEL
	R,3	ESEL,ALL
FLST,5,12,4,ORDE,8	REAL,3	ESEL,S,TYPE,,8
FITEM,5,177	ET,8,170	ESEL,A,TYPE,,9
FITEM,5,-180	ET,9,174	ESEL,R,REAL,,3
FITEM,5,191	R,3,,,1.0,0.1,0,	/PSYMB,ESYS,1
FITEM,5,-194	RMORE,,,1.0E20,0.0,1.0,	/PNUM,TYPE,1
FITEM,5,203	RMORE,0.0,0,1.0,,1.0,0.5	/NUM,1
FITEM,5,-204	RMORE,0,1.0,1.0,0.0,,1.0	EPLLOT
FITEM,5,207	KEYOPT,9,4,0	ESEL,ALL
FITEM,5,-208	KEYOPT,9,5,3	ESEL,S,TYPE,,8
CM,_Y,LINE	KEYOPT,9,7,0	ESEL,A,TYPE,,9
LSEL, , , ,P51X	KEYOPT,9,8,0	ESEL,R,REAL,,3
CM,_Y1,LINE	KEYOPT,9,9,0	CMSEL,A,_NODECM
CMSEL,,_Y	KEYOPT,9,10,2	CMDEL,_NODECM
	KEYOPT,9,11,0	
LESIZE,_Y1,0.01, , , , , ,1		

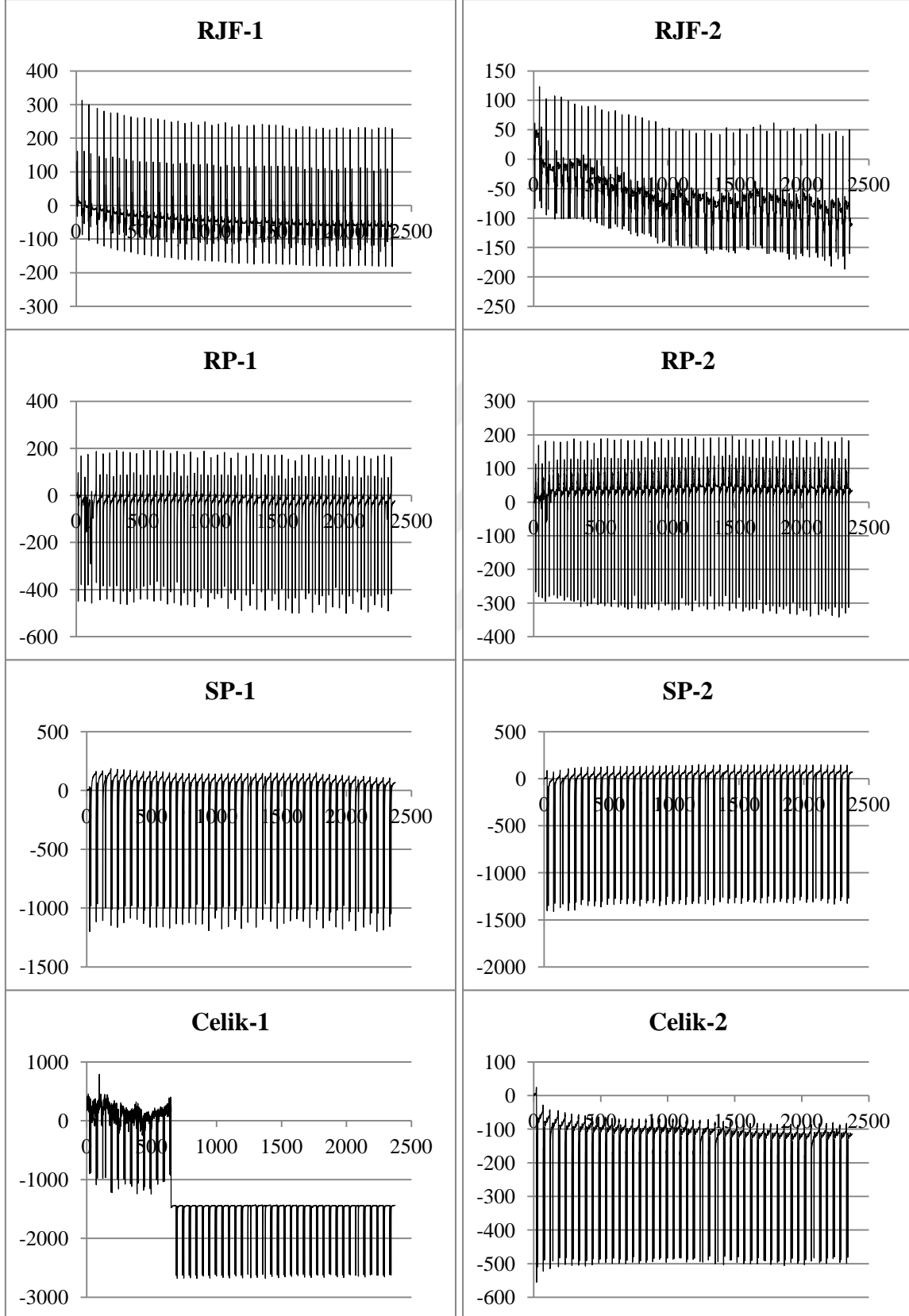
EK-1'in Devami

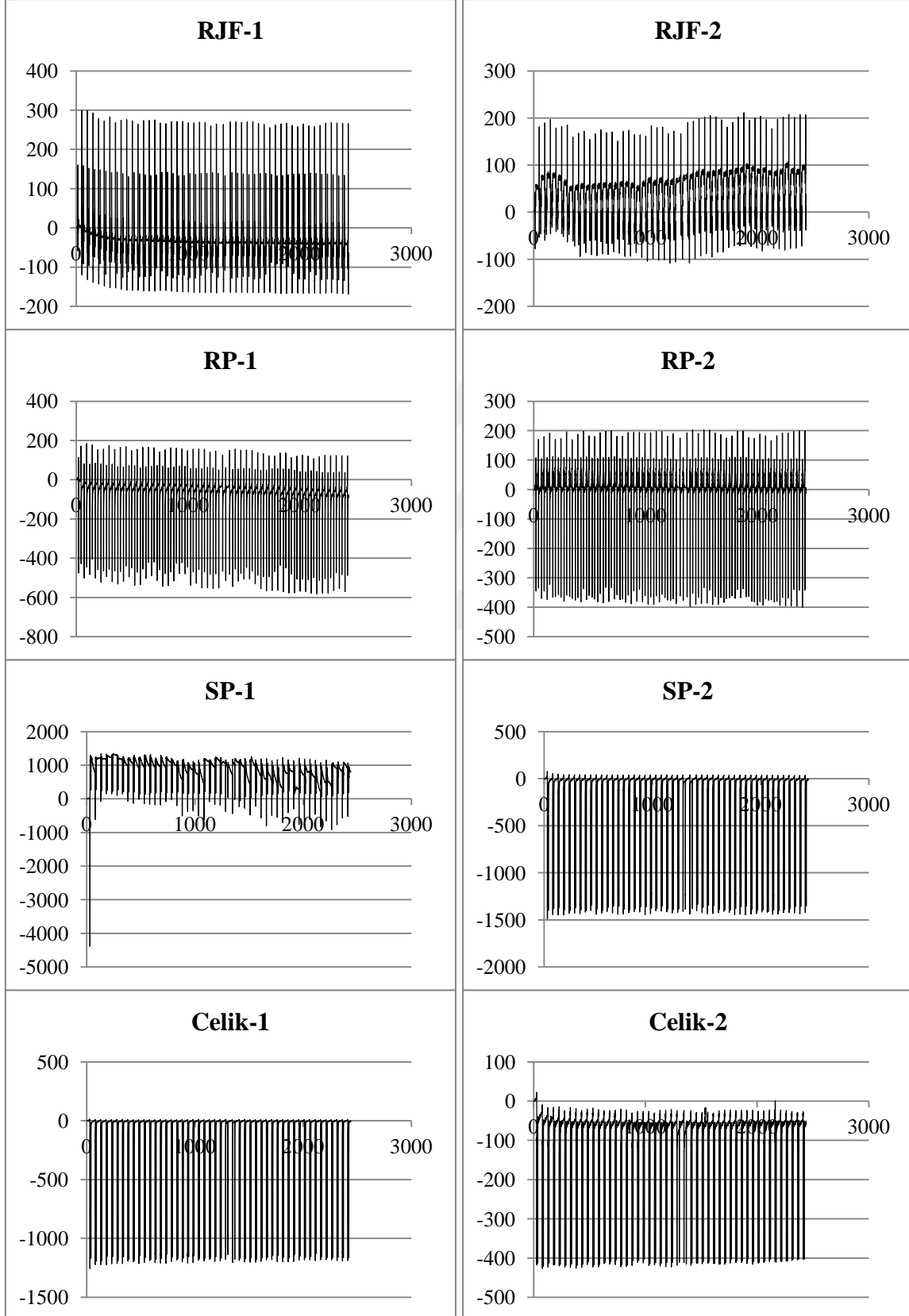
CMSEL,A,_ELEMCM	FITEM,2,11	!stifness
CMDEL,_ELEMCM	/GO	
CMSEL,S,_KPCM	SFA,P51X,1,PRES,800000	/PREP7
CMDEL,_KPCM		/COM, CONTACT PAIR
CMSEL,S,_LINECM	!zeminin alti 3 yonden	PROPERTIES - START
CMDEL,_LINECM	tutuldu	RMODIF,3,3,-100000000
CMSEL,S,_AREACM		/COM, CONTACT PAIR
CMDEL,_AREACM	FLST,2,1,5,ORDE,1	PROPERTIES - END
CMSEL,S,_VOLUCM	FITEM,2,1	
CMDEL,_VOLUCM	/GO	
/GRES,cwz,gsav	DA,P51X,ALL,	
CMDEL,_TARGET		
CMDEL,_CONTACT	!yuzeyler yandan tutuldu	
/COM, CONTACT PAIR	/SOL	
CREATION - END	FLST,2,13,5,ORDE,13	
	FITEM,2,88	
!analiz ayarlari yapildi	FITEM,2,92	
	FITEM,2,95	
/SOL	FITEM,2,101	
NSUBST,26,26,26	FITEM,2,105	
OUTRES,ERASE	FITEM,2,108	
OUTRES,NSOL,ALL	FITEM,2,114	
OUTRES,ESOL,ALL	FITEM,2,117	
OUTRES,NLOA,ALL	FITEM,2,121	
OUTRES,STRS,ALL	FITEM,2,125	
OUTRES,EPEL,ALL	FITEM,2,128	
OUTRES,EPPL,ALL	FITEM,2,132	
TIME,8	FITEM,2,136	
!gorsellik o olursa abartili 1	/GO	
olursa gercek	DA,P51X,UZ,	
NLGEOM,0		
	!nodes tutuldu	
!yuku ittirme ayarlari		
basliyor	FLST,2,8,1,ORDE,8	
	FITEM,2,5324	
FLST,2,2,5,ORDE,2	FITEM,2,-5325	
FITEM,2,8	FITEM,2,5328	
FITEM,2,15	FITEM,2,-5329	
/GO	FITEM,2,5336	
DA,P51X,UX,7.72	FITEM,2,-5337	
	FITEM,2,5340	
!basinc degerleri tanimlandi	FITEM,2,-5341	
0.8 mpa		
	/GO	
FLST,2,2,5,ORDE,2	D,P51X, , , , ,UY,UZ, , , ,	
FITEM,2,3		

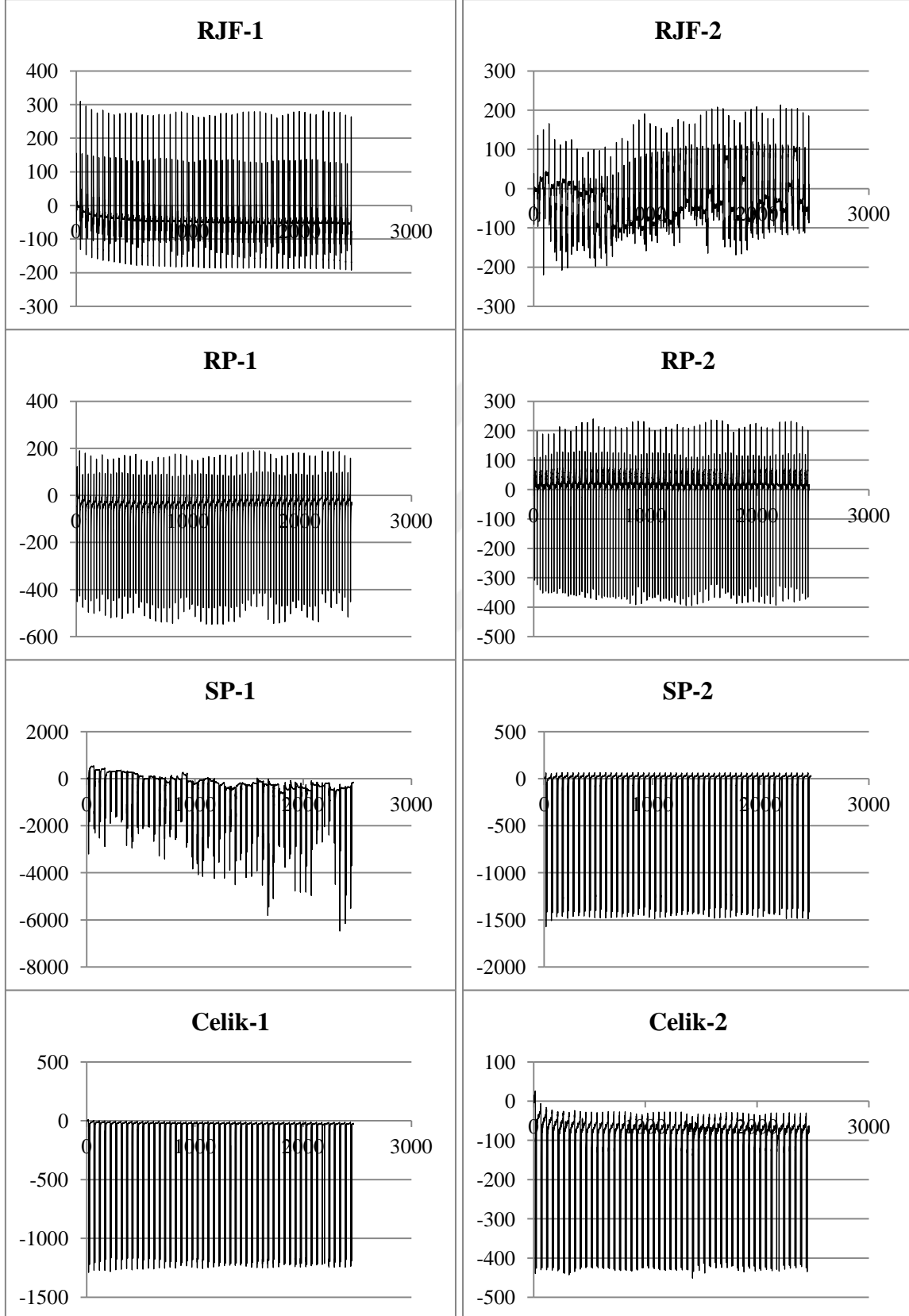
EK-2

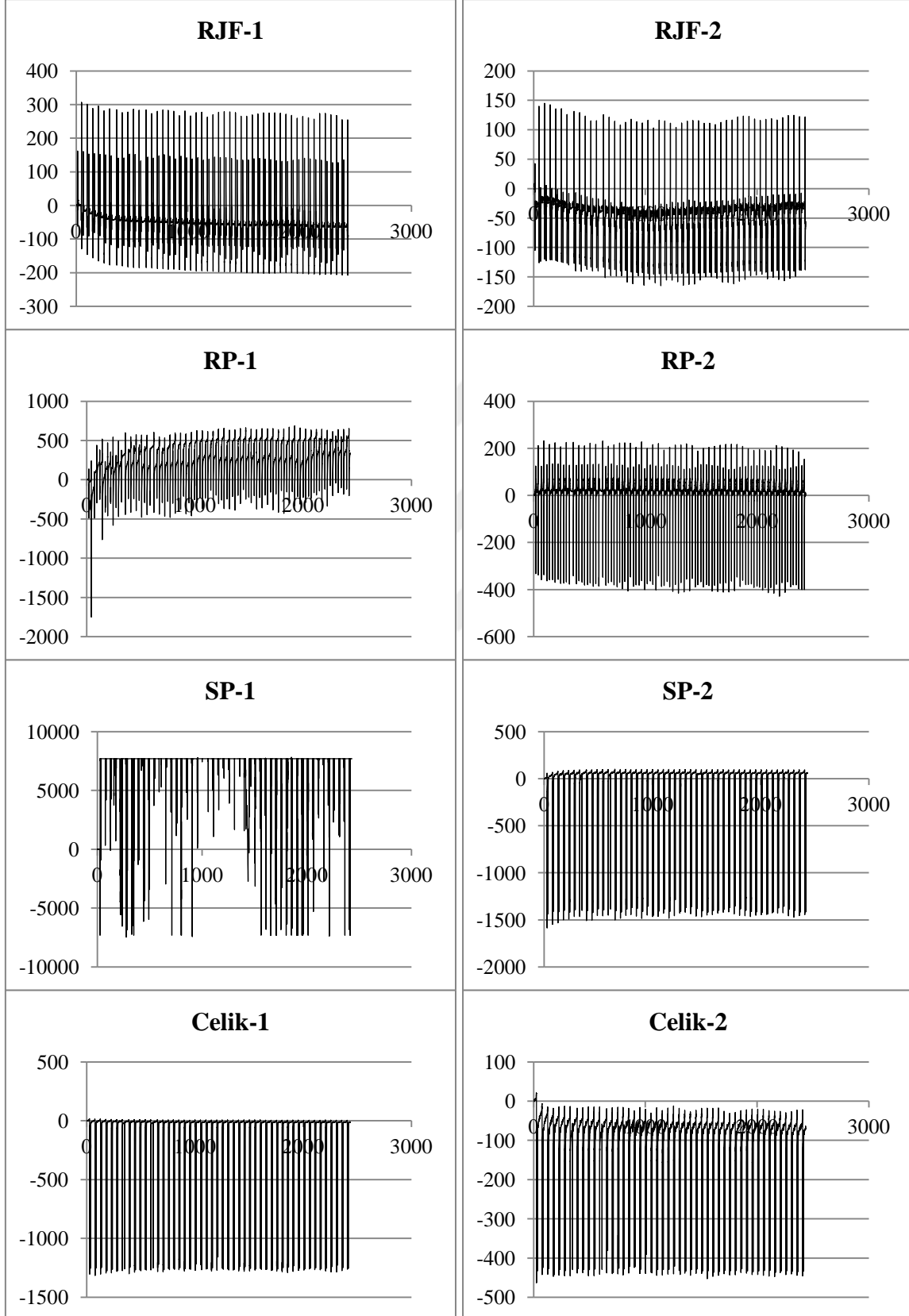
Batı Şeridi BŞD Ölçümleri (0-100 Geçiş)-Yatay eksen (sn), Dikey Eksen ($\epsilon \times 10^{-6}$)

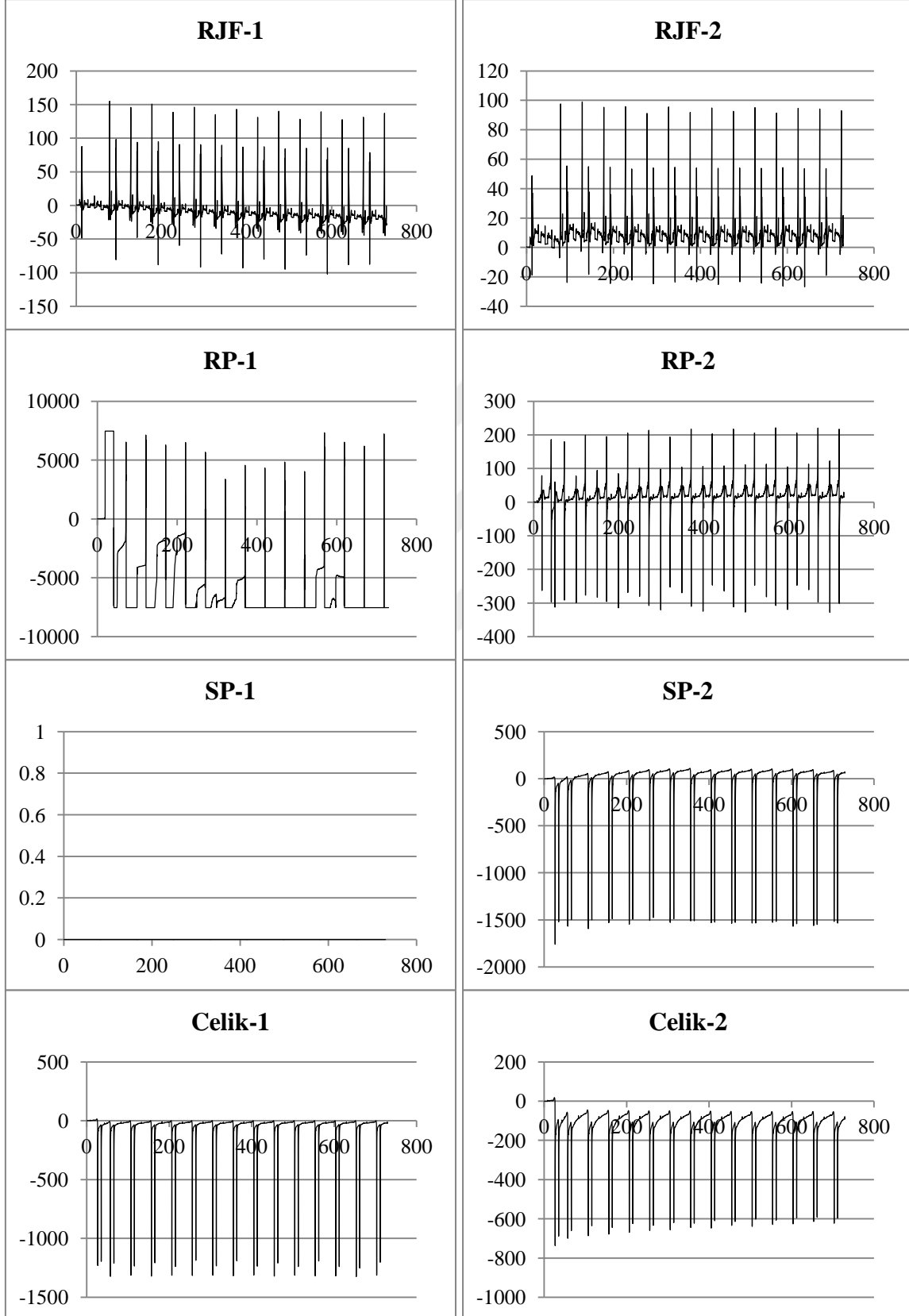


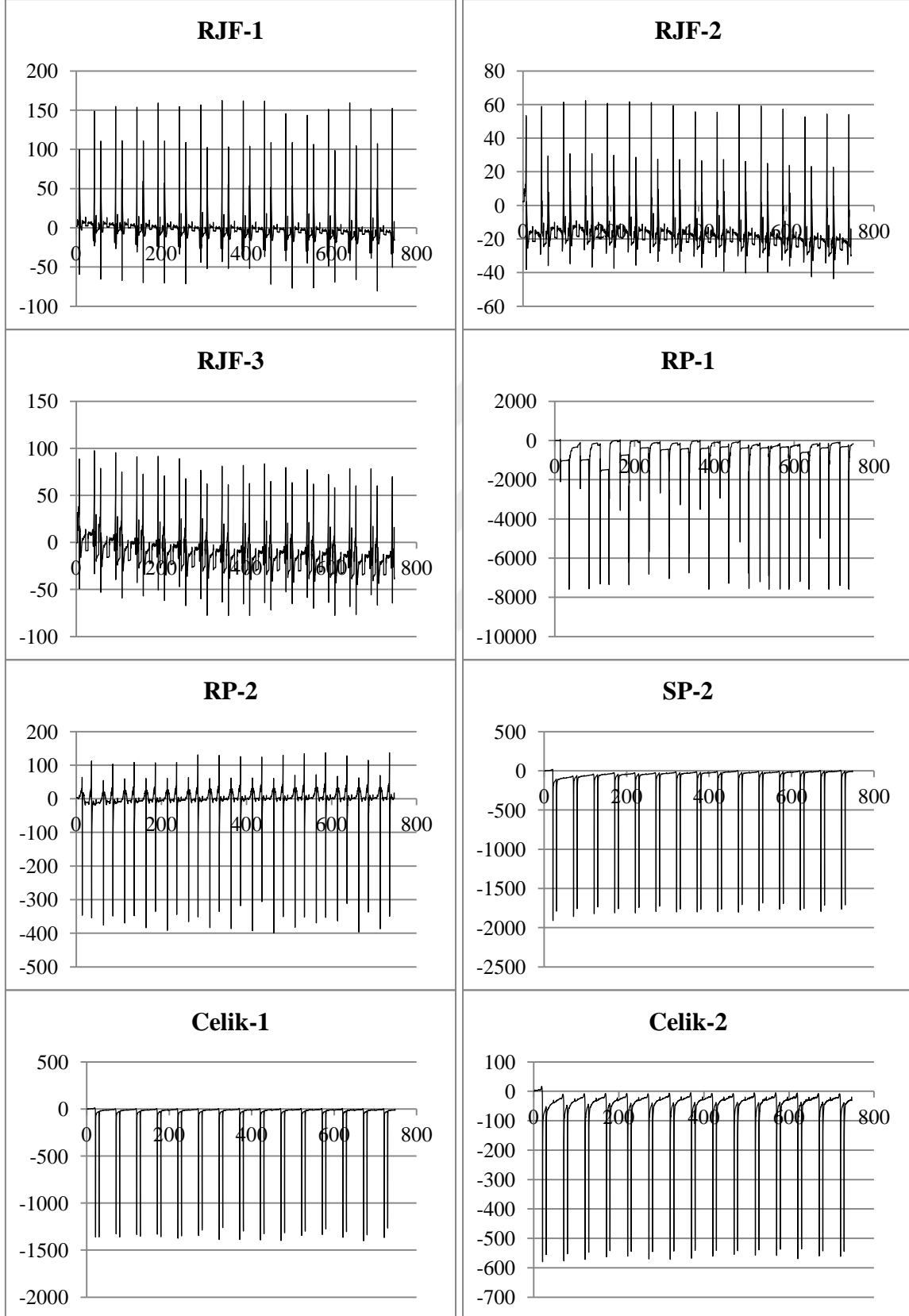
EK-2'nin devamıBatı Şeridi BŞD Ölçümleri (6,000 Geçiş)-Yatay eksen (sn), Dikey Eksen ($\epsilon \times 10^{-6}$)

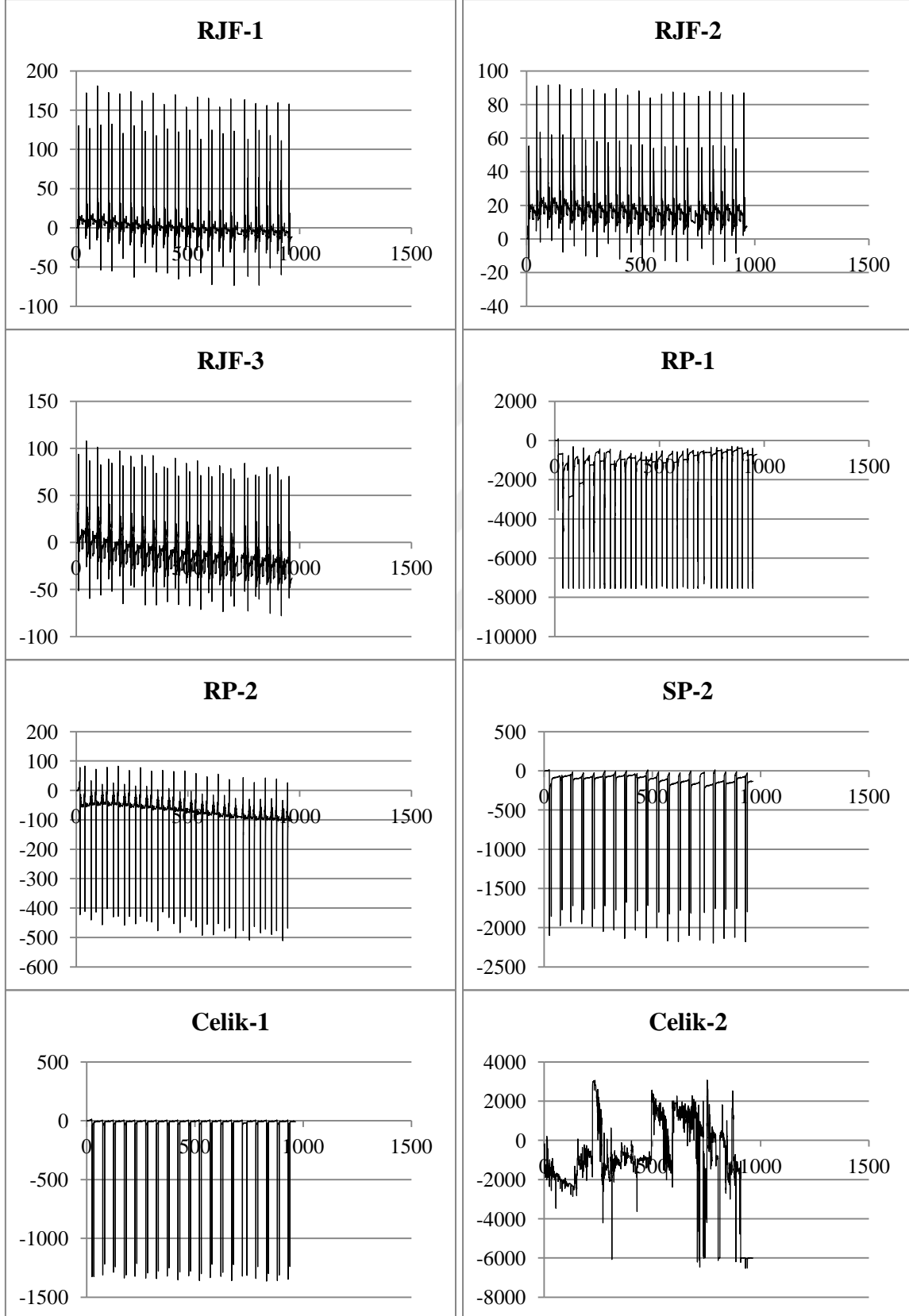
EK-2'nin devamıBatı Şeridi BŞD Ölçümleri (7,000 Geçiş)-Yatay eksen (sn), Dikey Eksen ($\epsilon \times 10^{-6}$)

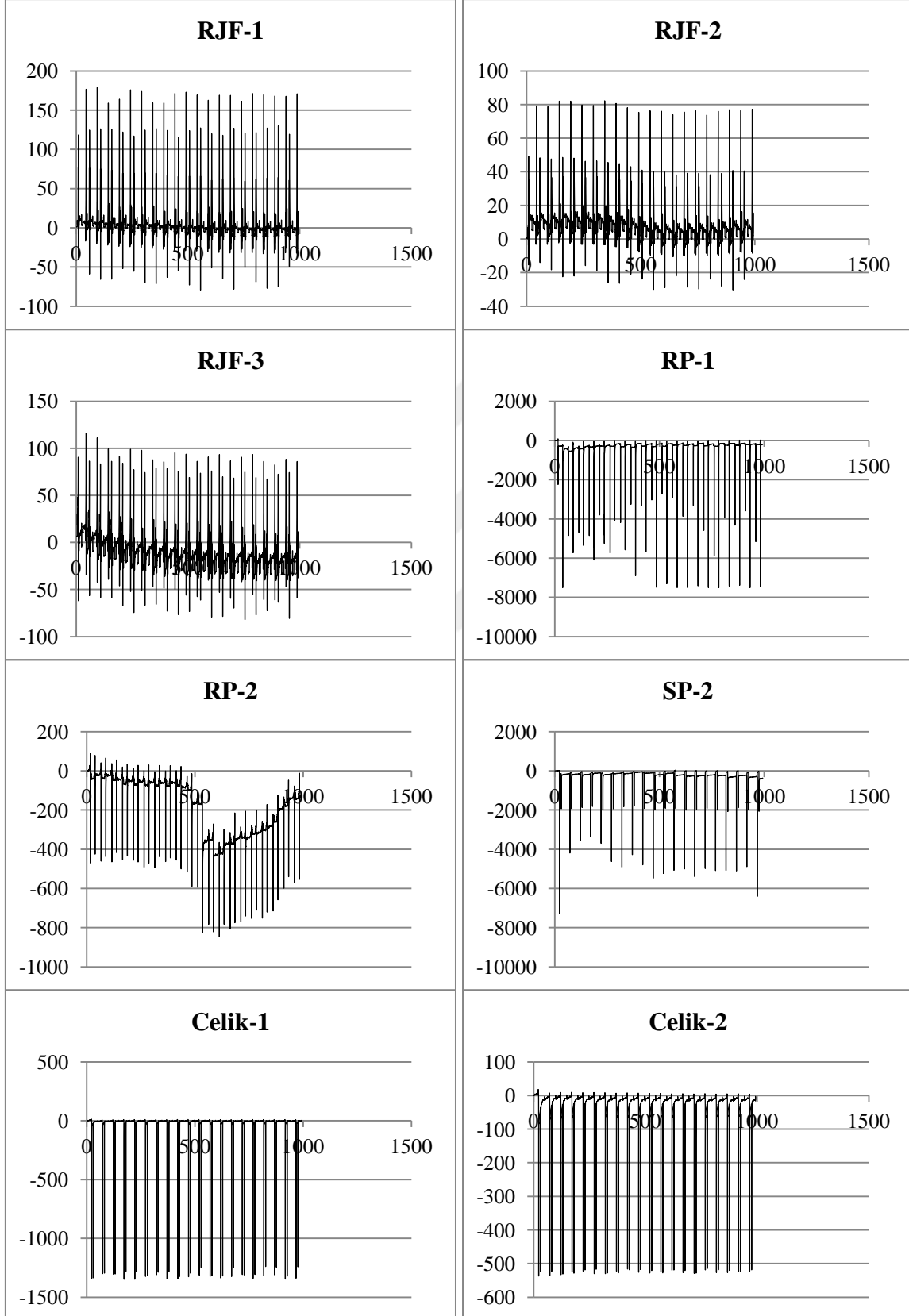
EK-2'nin devamıBatı Şeridi BŞD Ölçümleri (8,500 Geçiş)-Yatay eksen (sn), Dikey Eksen ($\epsilon \times 10^{-6}$)

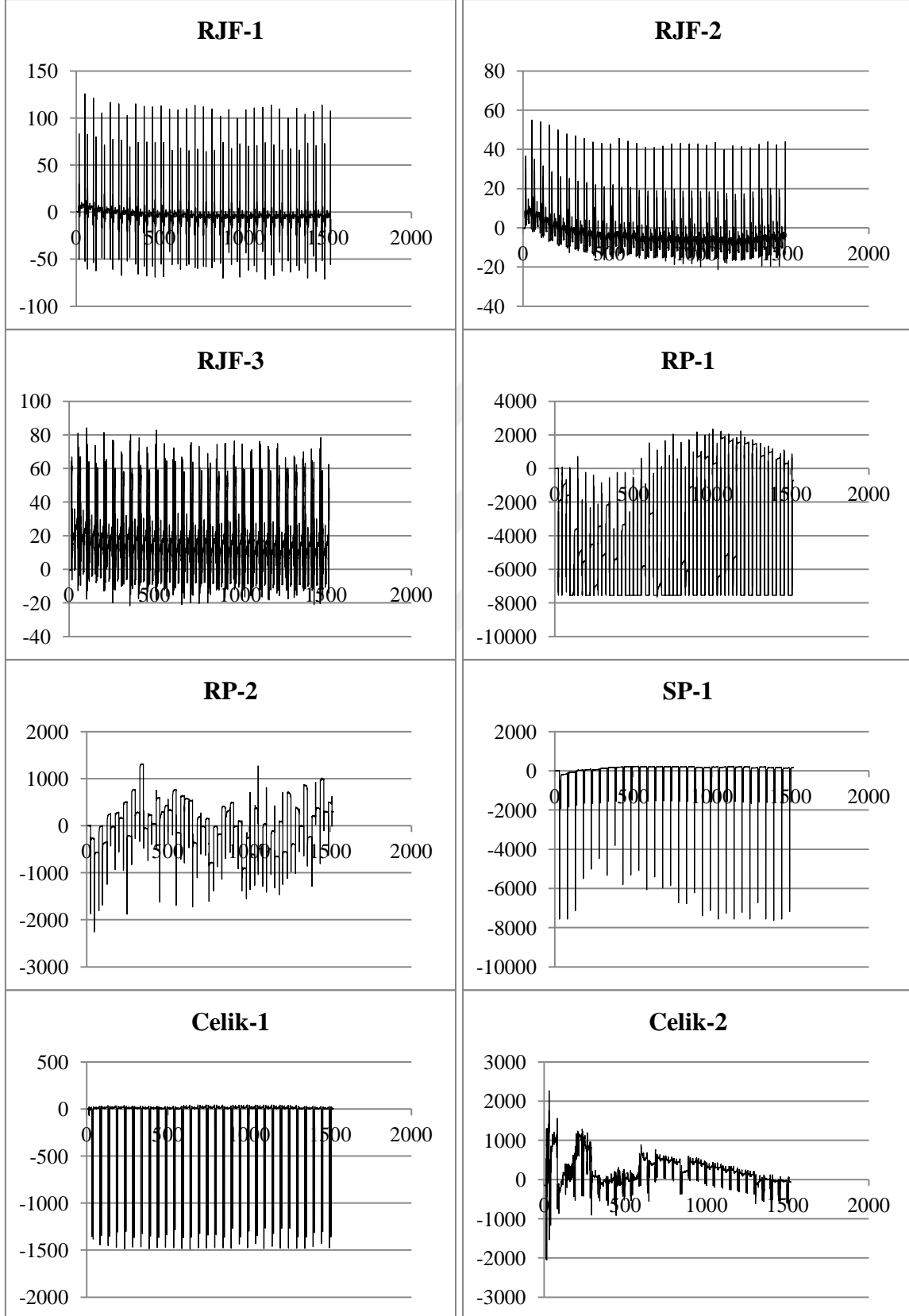
EK-2'nin devamıBatı Şeridi BŞD Ölçümleri (11,500 Geçiş)-Yatay eksen (sn), Dikey Eksen ($\epsilon \times 10^{-6}$)

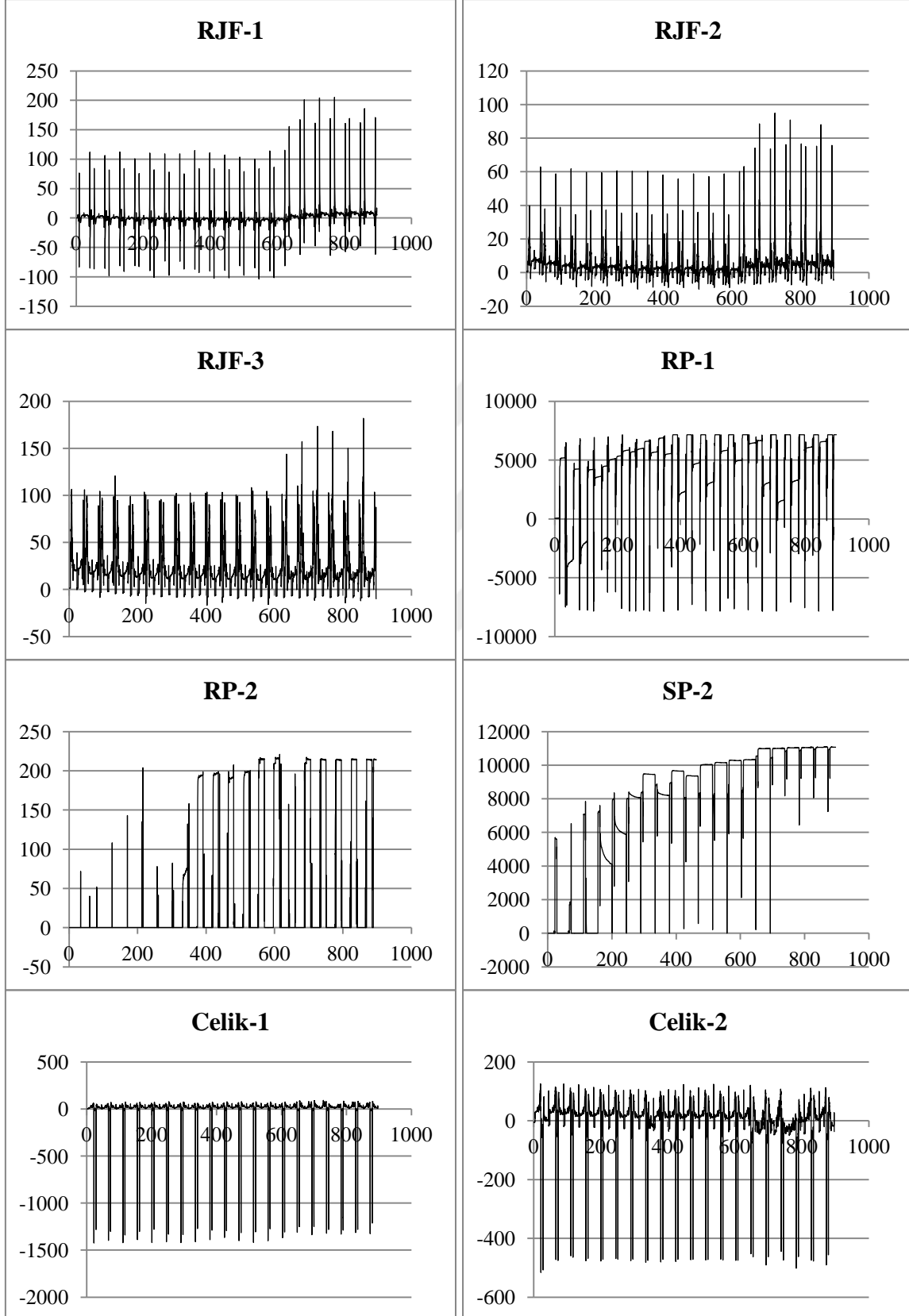
EK-2'nin devamıBatı Şeridi BŞD Ölçümleri (15,000 Geçiş)-Yatay eksen (sn), Dikey Eksen ($\epsilon \times 10^{-6}$)

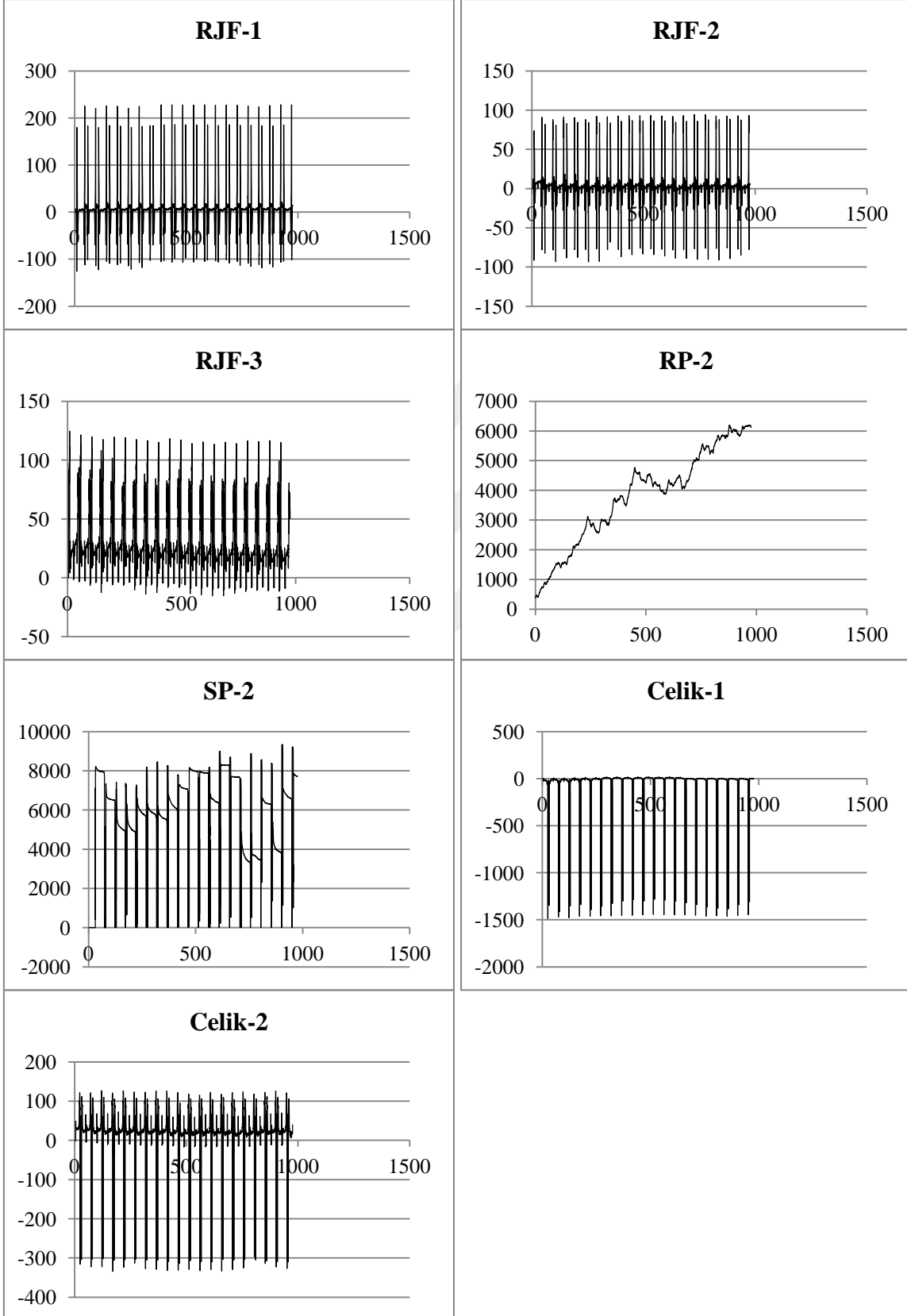
EK-2'nin devamıBatı Şeridi BŞD Ölçümleri (20,000 Geçiş)-Yatay eksen (sn), Dikey Eksen ($\epsilon \times 10^{-6}$)

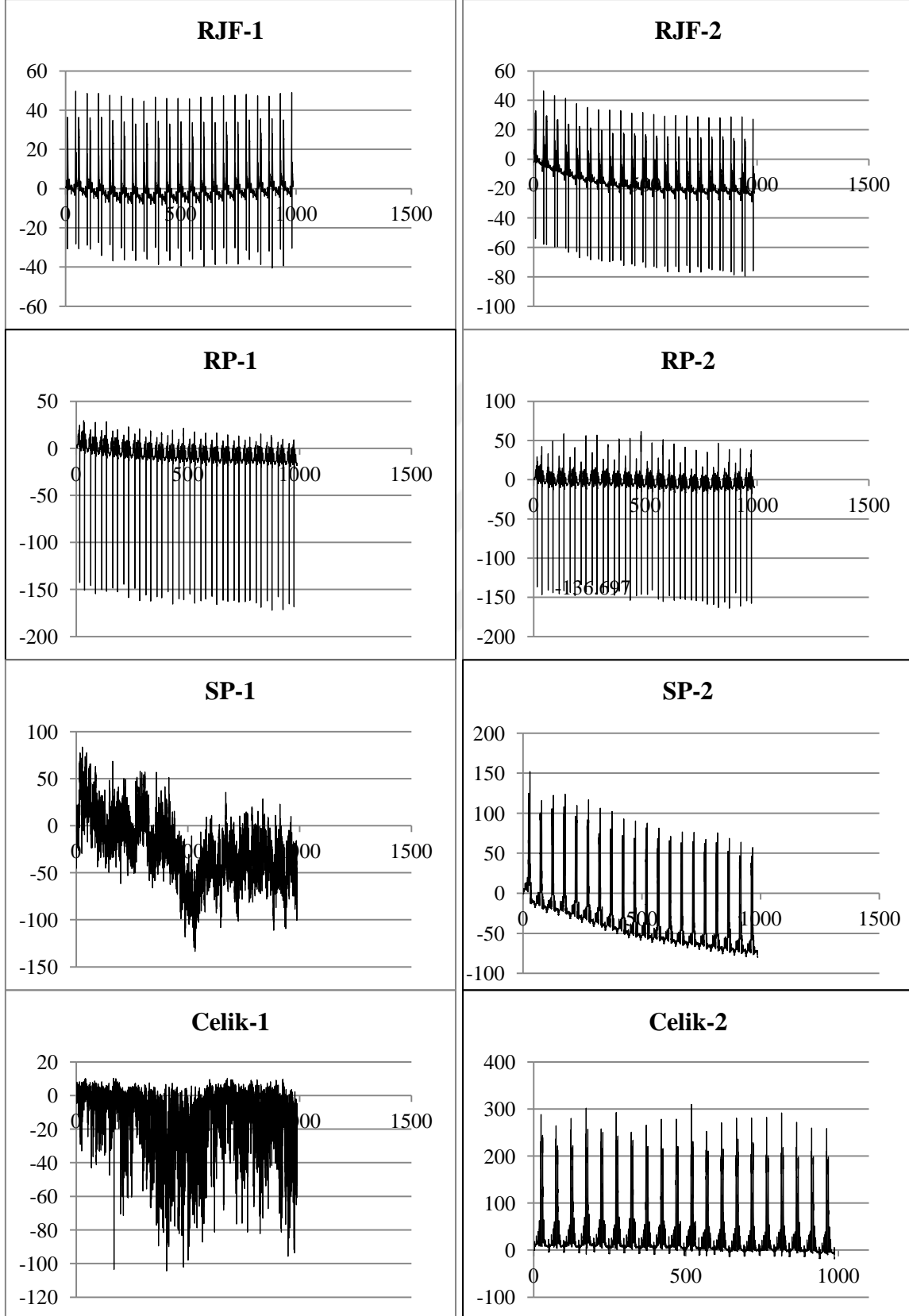
EK-2'nin devamıBatı Şeridi BŞD Ölçümleri (25,000 Geçiş)-Yatay eksen (sn), Dikey Eksen ($\epsilon \times 10^{-6}$)

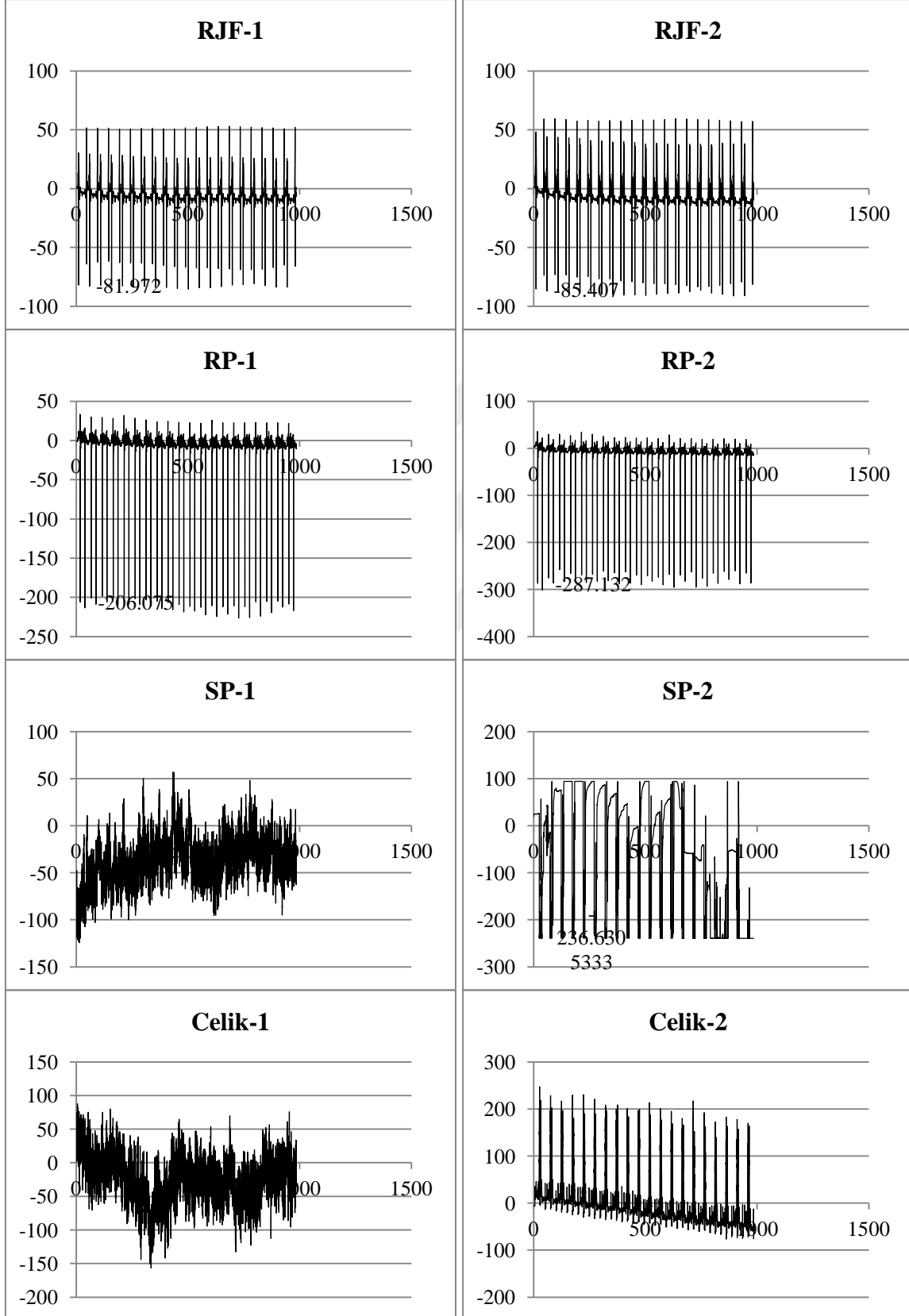
EK-2'nin devamıBatı Şeridi BŞD Ölçümleri (30,000 Geçiş)-Yatay eksen (sn), Dikey Eksen ($\epsilon \times 10^{-6}$)

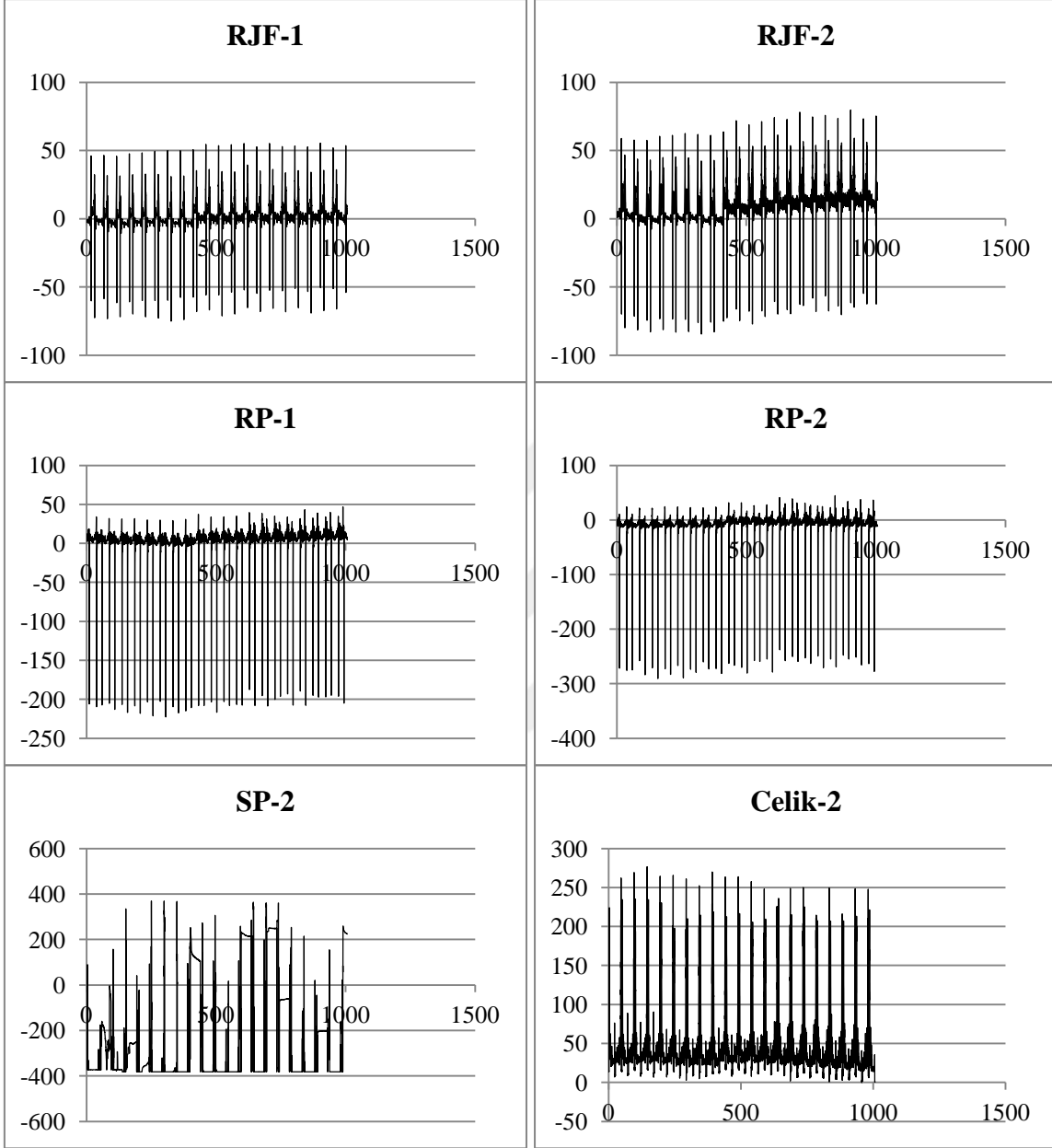
EK-2'nin devamıBatı Şeridi BŞD Ölçümleri (50,000 Geçiş)-Yatay eksen (sn), Dikey Eksen ($\epsilon \times 10^{-6}$)

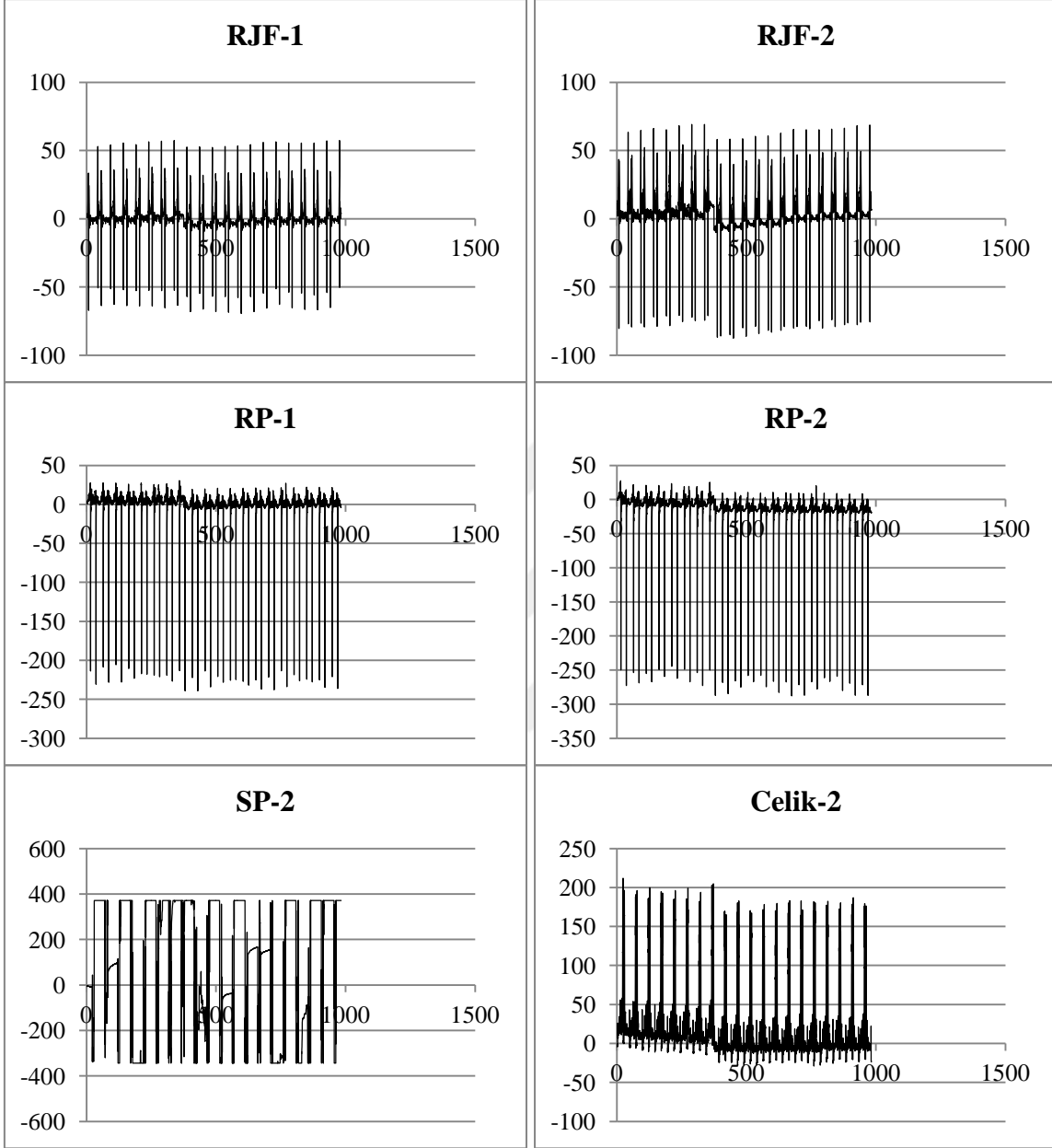
EK-2'nin devamıBatı Şeridi BŞD Ölçümleri (70,000 Geçiş)-Yatay eksen (sn), Dikey Eksen ($\epsilon \times 10^{-6}$)

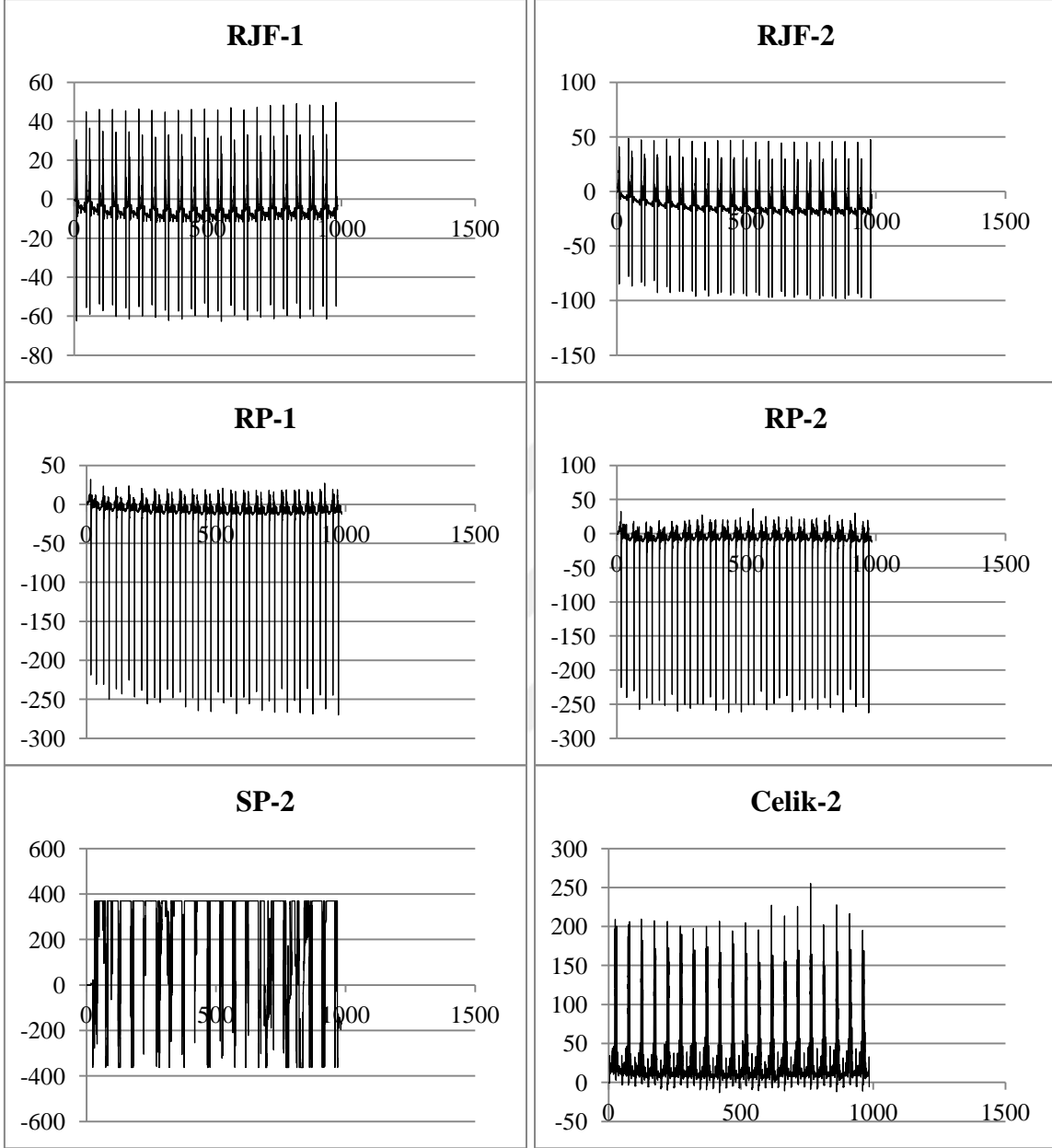
EK-2'nin devamıBatı Şeridi BŞD Ölçümleri (100,000 Geçiş)-Yatay eksen (sn), Dikey Eksen ($\epsilon \times 10^{-6}$)

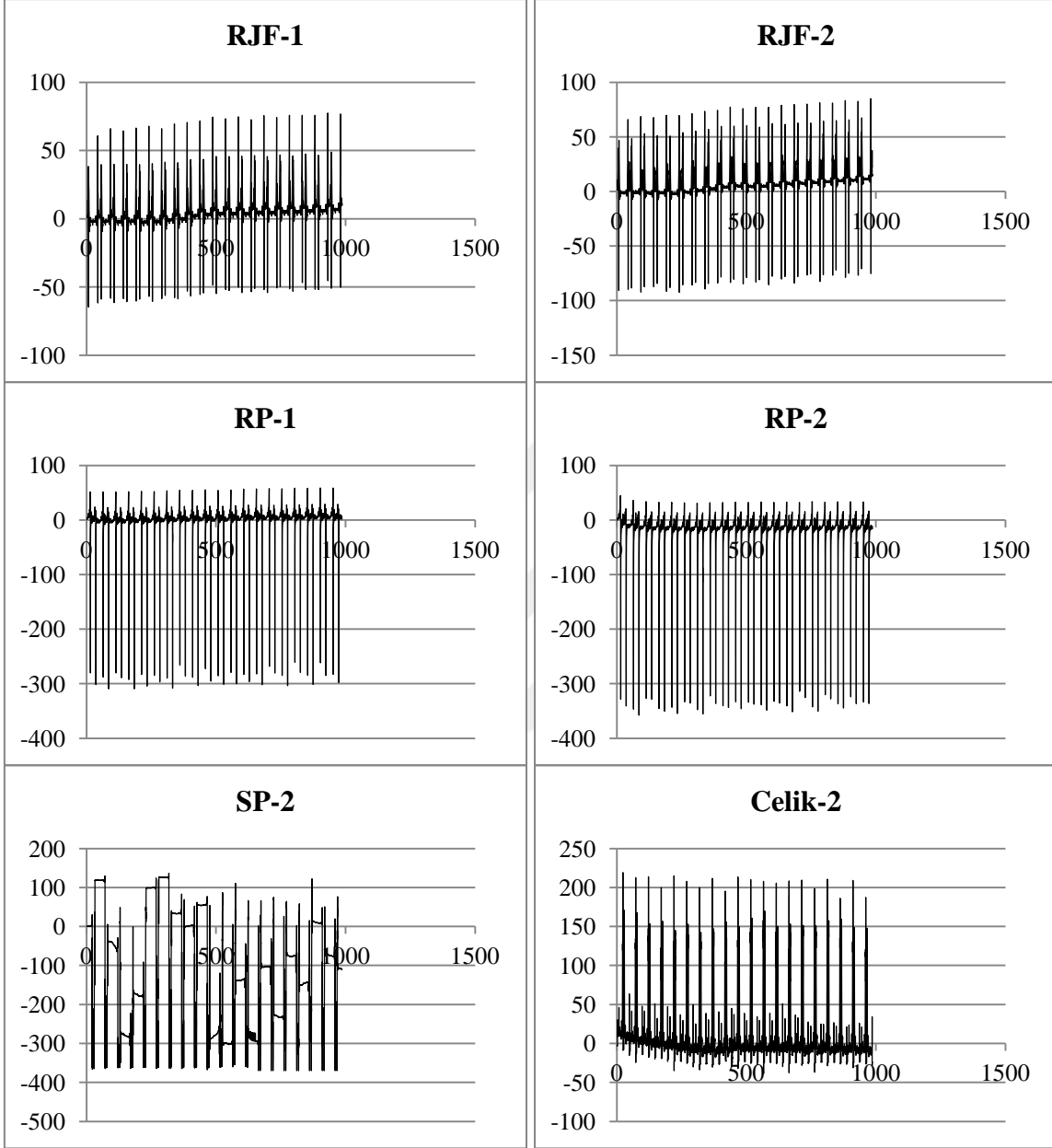
EK-2'nin devamıDoğu Şeridi BŞD Ölçümleri (0-100 Geçiş)-Yatay eksen (sn), Dikey Eksen ($\epsilon \times 10^{-6}$)

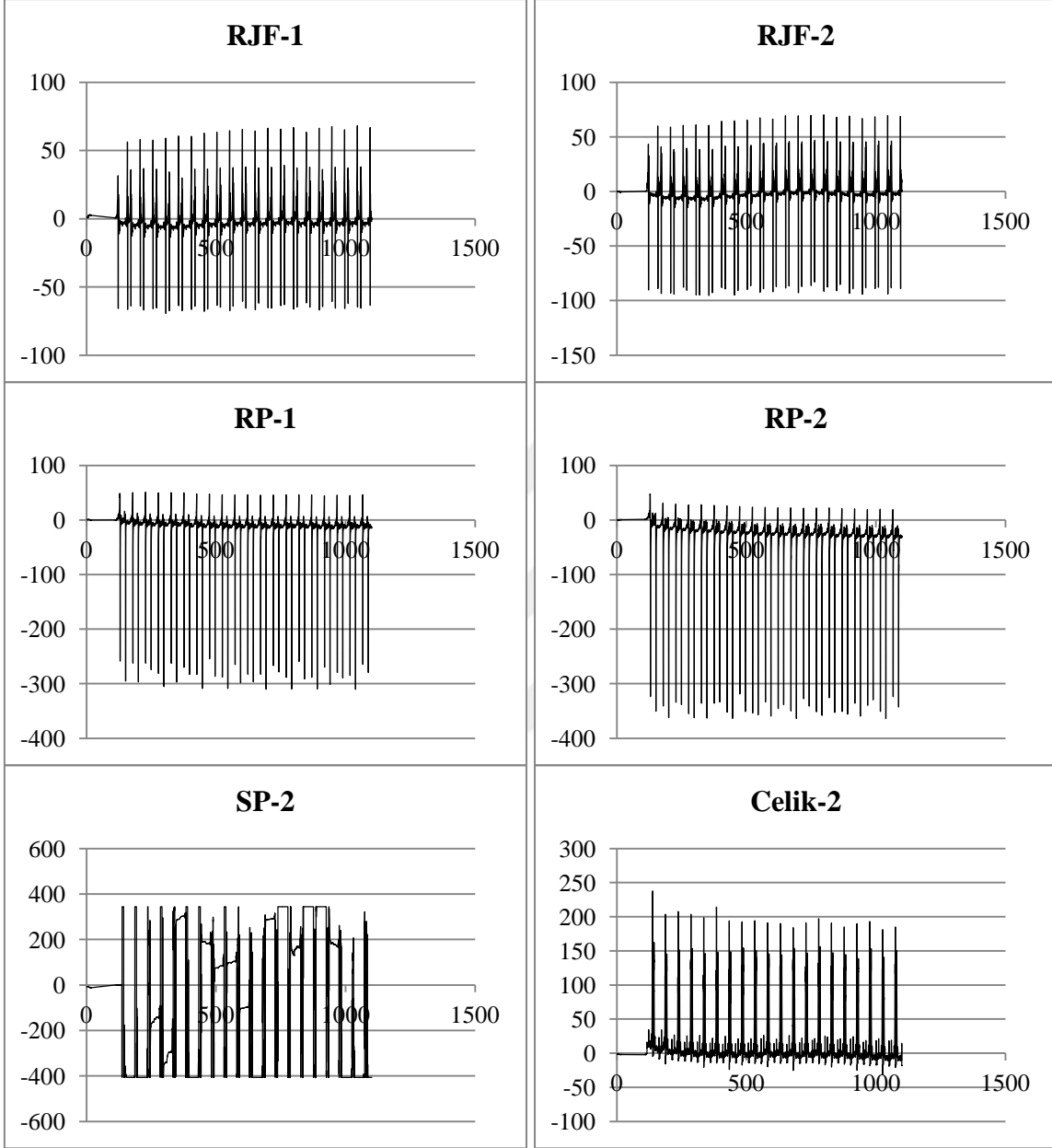
EK-2'nin devamıDoğu Şeridi BŞD Ölçümleri (6,000 Geçiş)-Yatay eksen (sn), Dikey Eksen ($\epsilon \times 10^{-6}$)

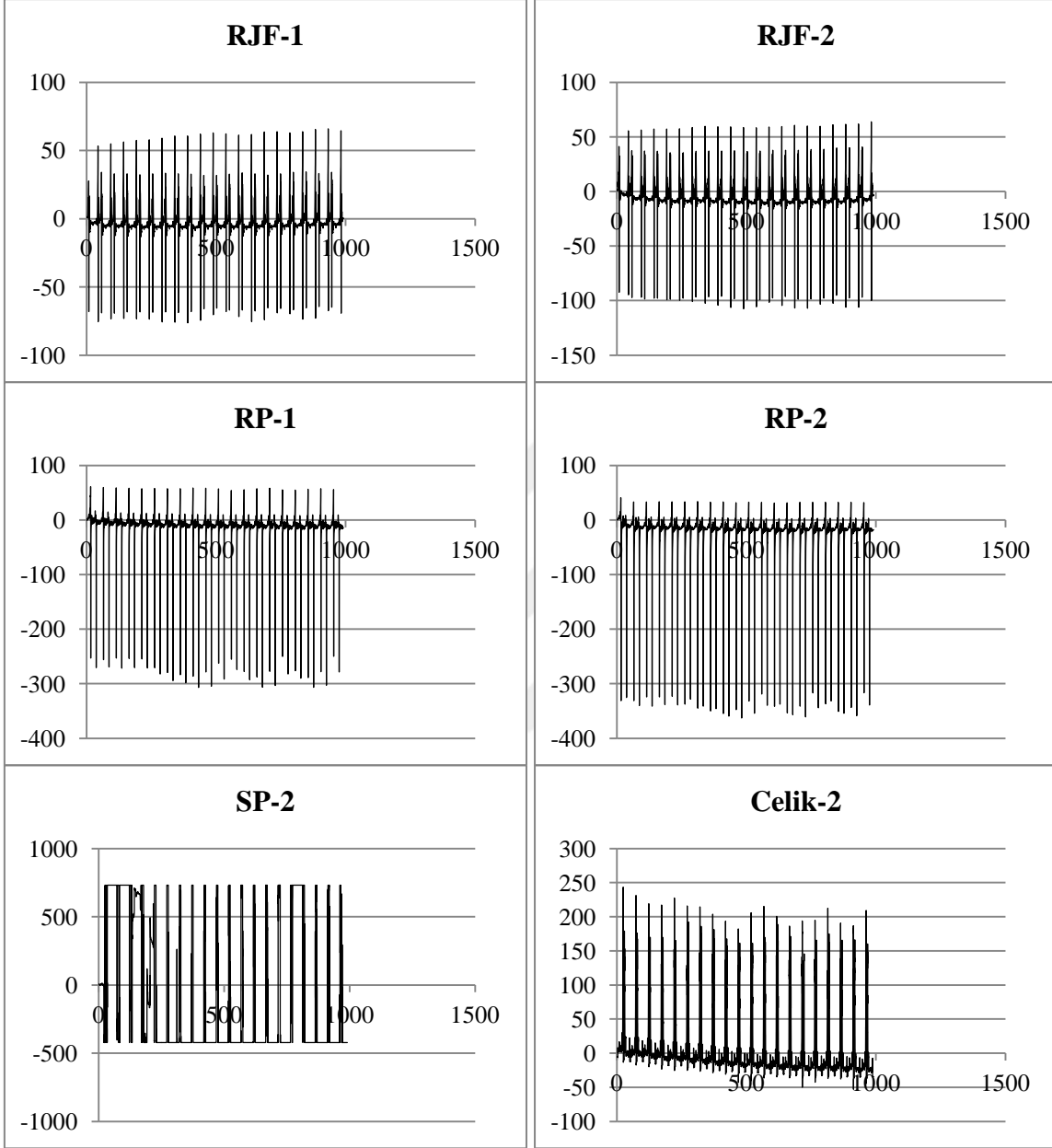
EK-2'nin devamıDoğu Şeridi BŞD Ölçümleri (7,000 Geçiş)-Yatay eksen (sn), Dikey Eksen ($\epsilon \times 10^{-6}$)

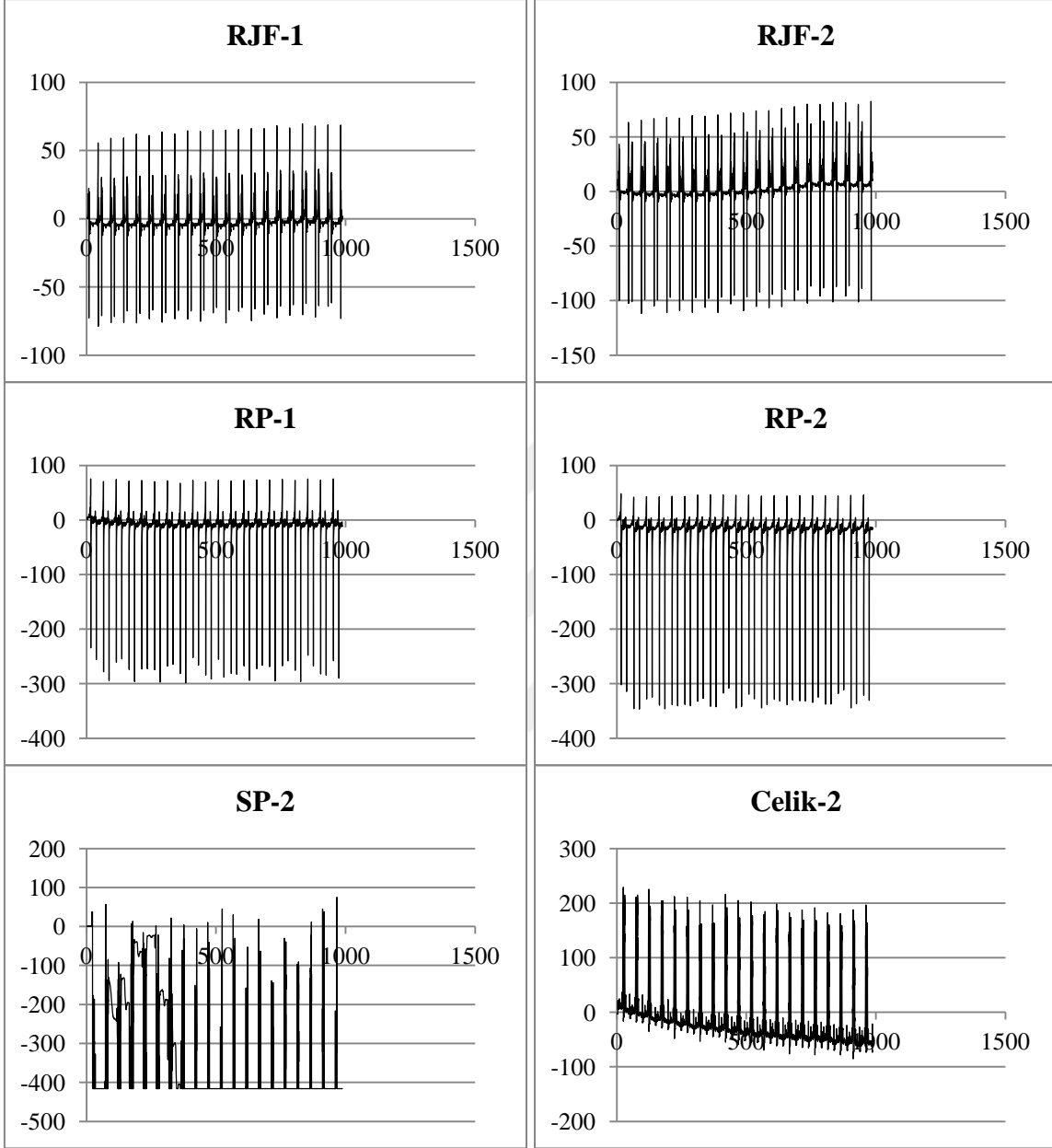
EK-2'nin devamıDoğu Şeridi BŞD Ölçümleri (8,500 Geçiş)-Yatay eksen (sn), Dikey Eksen ($\epsilon \times 10^{-6}$)

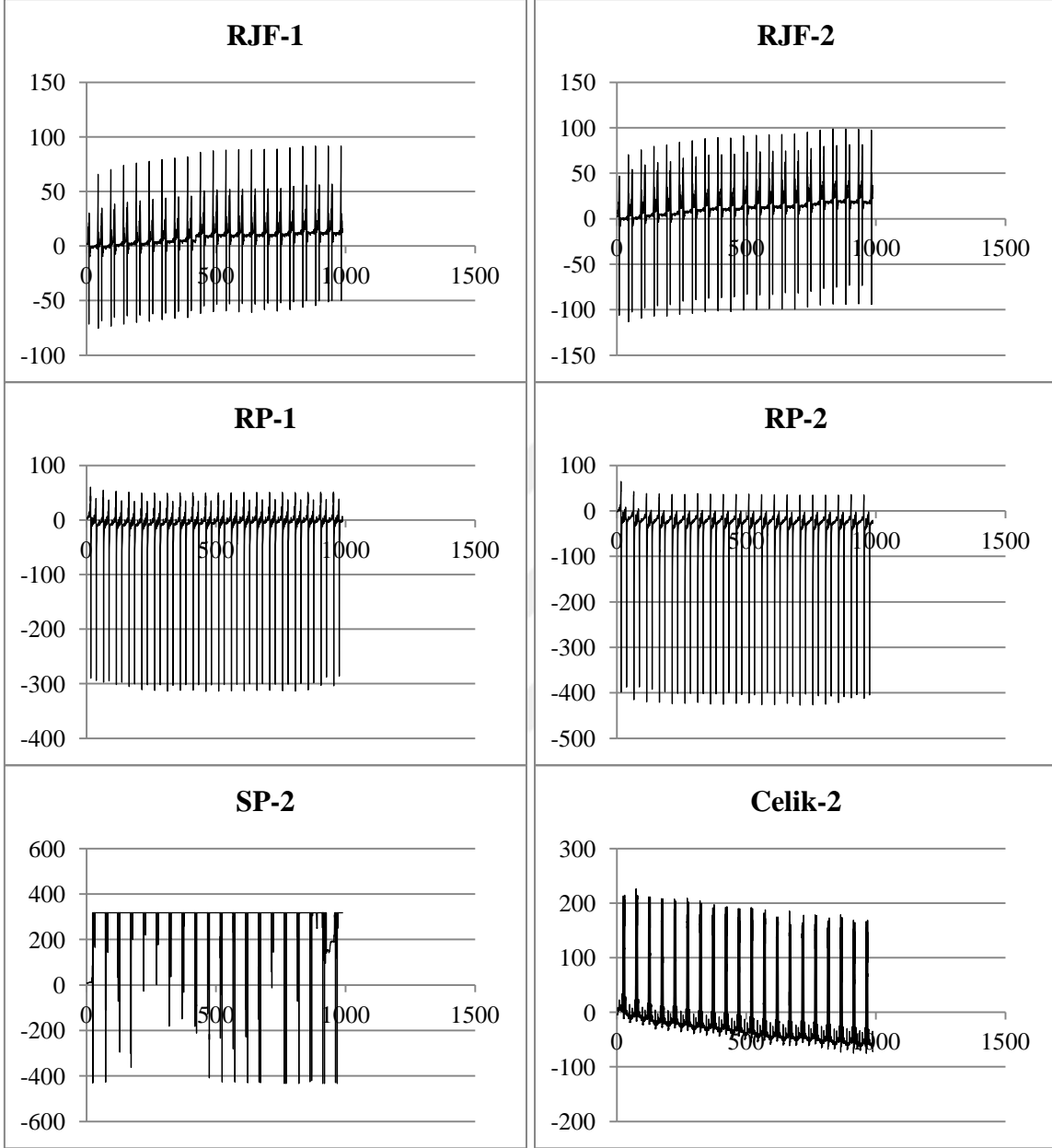
EK-2'nin devamıDoğu Şeridi BŞD Ölçümleri (11,500 Geçiş)-Yatay eksen (sn), Dikey Eksen ($\epsilon \times 10^{-6}$)

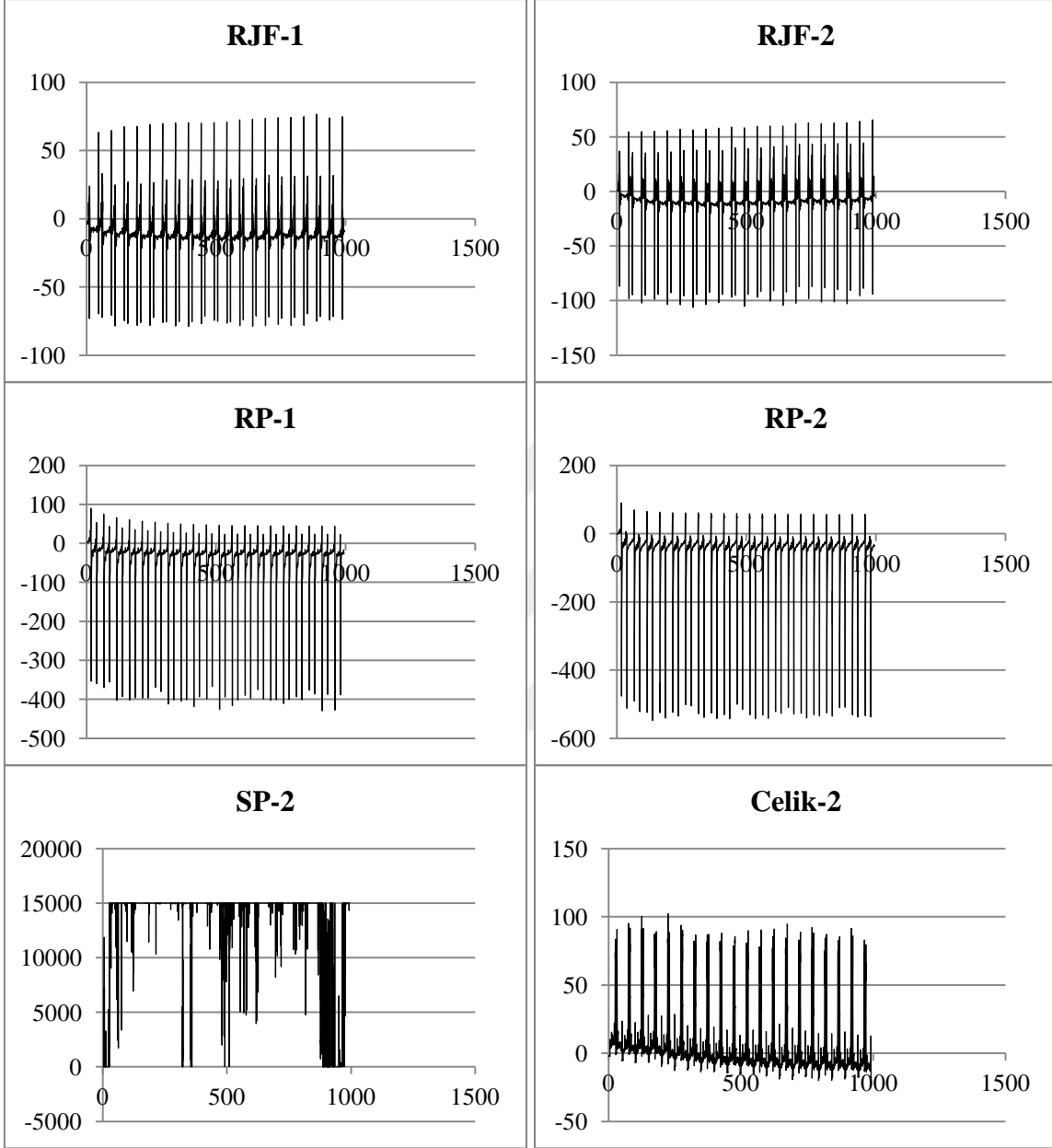
EK-2'nin devamıDoğu Şeridi BŞD Ölçümleri (15,000 Geçiş)-Yatay eksen (sn), Dikey Eksen ($\epsilon \times 10^{-6}$)

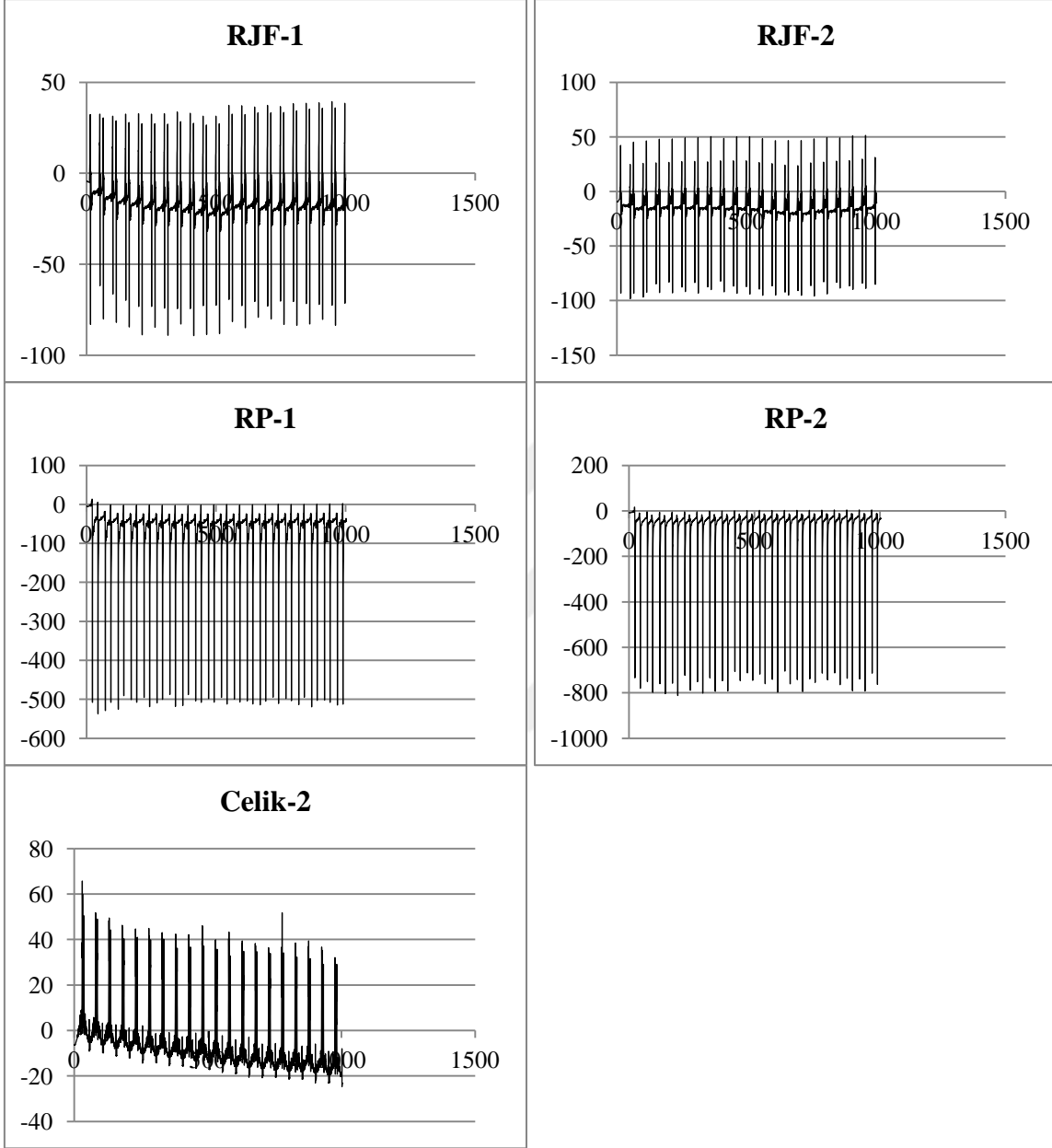
EK-2'nin devamıDoğu Şeridi BŞD Ölçümleri (20,000 Geçiş)-Yatay eksen (sn), Dikey Eksen ($\epsilon \times 10^{-6}$)

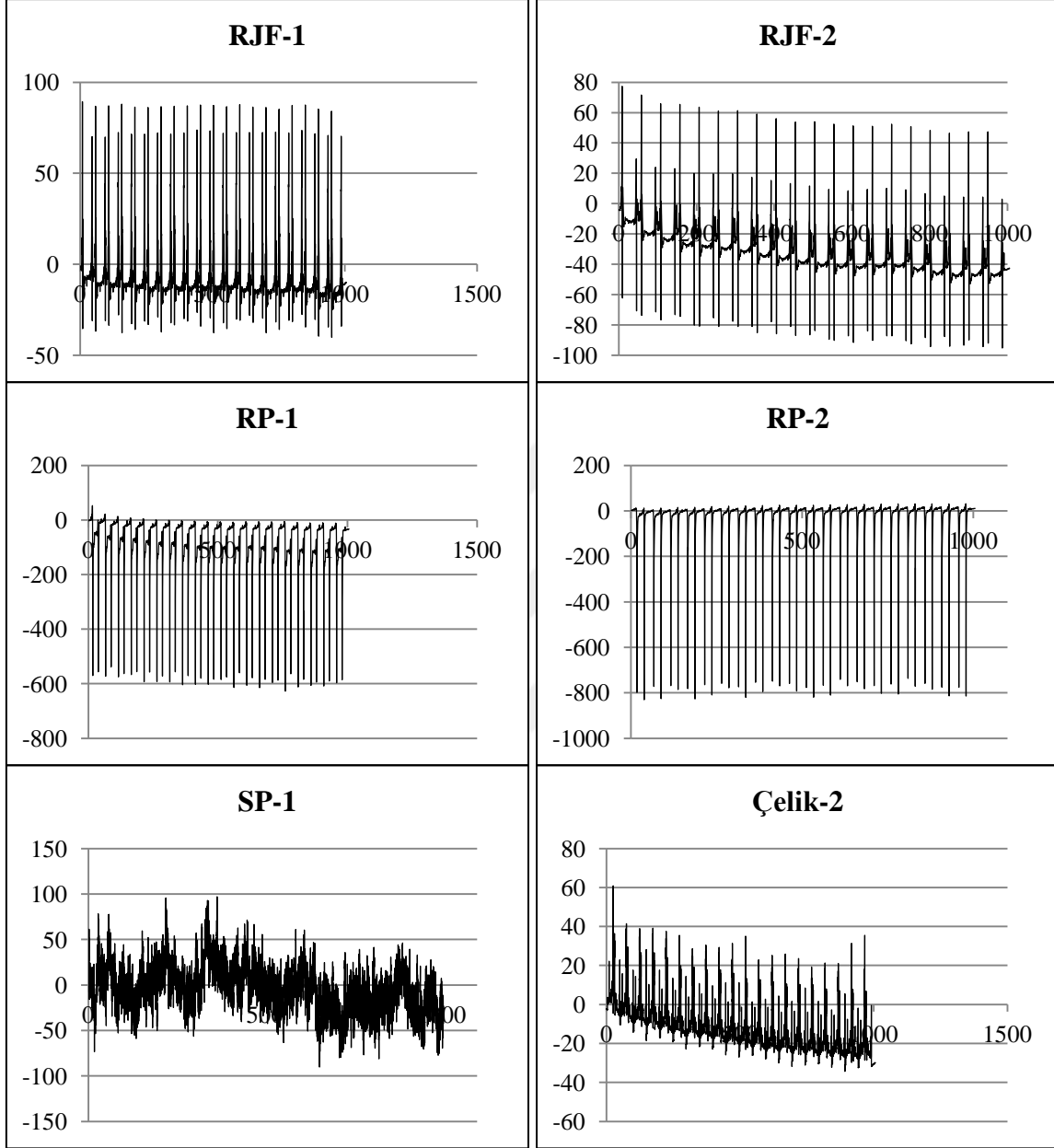
EK-2'nin devamıDoğu Şeridi BŞD Ölçümleri (25,000 Geçiş)-Yatay eksen (sn), Dikey Eksen ($\epsilon \times 10^{-6}$)

EK-2'nin devamıDoğu Şeridi BŞD Ölçümleri (30,000 Geçiş)-Yatay eksen (sn), Dikey Eksen ($\epsilon \times 10^{-6}$)

EK-2'nin devamıDoğu Şeridi BŞD Ölçümleri (40,000 Geçiş)-Yatay eksen (sn), Dikey Eksen ($\epsilon \times 10^{-6}$)

EK-2'nin devamıDoğu Şeridi BŞD Ölçümleri (50,000 Geçiş)-Yatay eksen (sn), Dikey Eksen ($\epsilon \times 10^{-6}$)

EK-2'nin devamıDoğu Şeridi BŞD Ölçümleri (70,000 Geçiş)-Yatay eksen (sn), Dikey Eksen ($\epsilon \times 10^{-6}$)

EK-2'nin devamıDoğu Şeridi BŞD Ölçümleri (100,000 Geçiş)-Yatay eksen (sn), Dikey Eksen ($\epsilon \times 10^{-6}$)

ÖZGEÇMİŞ

Mehmet Tefvik SEFEROĞLU, 1986 yılında Erzurum'da doğdu. 2003 yılında Erzurum Lisesi'nden mezun oldu. 2004 yılında Erciyes Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'ne girdi. 2009 yılında mezun oldu. 2008 yılından itibaren özel sektörde çalışmaya başladı. 2010 yılında Gümüşhane Üniversitesi'nde araştırma görevlisi olarak çalışmaya başladı. 2012 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi'ne geçiş yapıp, 2014 yılında yüksek lisansını tamamlayarak aynı yıl doktora eğitimine başladı. 2018 Haziran ayından beri 217M481 numaralı TÜBİTAK 1001 Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projeleri Destekleme Programında bursiyerlik görevini üstlenmiştir. Evli ve üç çocuk babası olan Mehmet Tefvik SEFEROĞLU İyi derece İngilizce bilmektedir.