

**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

Muhammet ÇELİK Tarafından Hazırlanan

**İŞLEVSEL HASARLI BETON YOLLARDA ASFALT TAKVİYE TABAKASI
KULLANIMININ MEKANİSTİK AMPİRİK YÖNTEMLERLE ARAŞTIRILMASI**

**başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 16 /04/2019 gün ve 1800 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda
DOKTORA TEZİ
olarak kabul edilmiştir.**

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Fazıl ÇELİK

Üye : Prof. Dr. Muhammet Vefa AKPINAR

Üye : Prof. Dr. Ali Osman ATAHAN

Üye : Prof. Dr. Murat GÜLER

Üye : Doç. Dr. Temel TÜRKER






Prof. Dr. Asim KADIOĞLU

Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Bu tez Karadeniz Teknik Üniversitesi Hızlandırılmış Yol Testi Tesisinde yaptığımız ekip çalışması neticesinde oluşmuştur. Tesisi 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 başvurusu süreci ve deneyler ile birlikte 3 yıllık bir emeğin sonucudur. 3 yıl boyunca her aşamasını birlikte başardığım, değerli dostum Araş. Gör. Mehmet Tevfik SEFEROĞLU'na ayrıca teşekkür ederim.

Deneyler için gerekli maddi destek 117M120 numaralı TÜBİTAK 1001 Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projeleri Destekleme Programı tarafından sağlanmıştır. Trabzon Büyükşehir Belediyesi'nin ekip, ekipman ve malzeme konusunda sağladığı her türlü desteğin bu tezin oluşmasına katkısı büyüktür. Bu tezde Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliğinin ve Ticim Advanced Structural Technologies Firmasının da değerli katkıları bulunmaktadır. Buradan her dört kurumumuza da teşekkürleri bir borç bilirim. Çalışmaya fikirleriyle destek veren, değerli tez izleme hocalarım Sayın Prof. Dr. Ali Osman ATAHAN ve Sayın Doç. Dr. Temel TÜRKER'e teşekkürlerimi sunarım.

Tezin deneysel çalışmalarında ve yazım aşamasında bana bizzat yardımcı olan, fikir ve bilgilerini paylaşan değerli dostlarım Dr. İnş. Müh. Hasan SESLİ ve Dr. İnş. Müh. Mohammad Manzoor NASERY, ayrıca çalışma boyunca fikren ve fiziken yardımlarını esirgemeyen Dr. Öğr. Üyesi Ayşegül Güneş SEFEROĞLU, Dr. Öğr. Üyesi Serhat DEMİR, Araş. Gör. Ahmet KUVAT, Araş. Gör. Ufuk KANDİL, Jeofizik Yük. Müh. Ülkü BİNLER'e, İnş. Tek. Hasan Tahsin SELİM'e, meslektaşım Fatih DOKUMACI'ya ve Ozan ÇORLU'ya teşekkürlerimi sunarım.

Tüm hayatımın en büyük destekçileri babam Ahmet ÇELİK, annem Ayşe ÇELİK ve kardeşim İnş. Müh. Muharrem ÇELİK'e teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca 12 yıldır hayatımı daha da anlamlı hale getiren, Sevgili Eşim Pınar NAZ ÇELİK'e şükranlarımı sunuyorum. Son olarak onlara ayırmam gereken vakitten çalarak tez çalışmalarımı yürüttüğüm oğlum Ahmet Alp ÇELİK ve kızım Almıla Nisa ÇELİK'e de teşekkür ederim.

Muhammet ÇELİK
Trabzon,2019

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “İşlevsel Hasarlı Beton Yollarda Asfalt Takviye Tabakası Kullanımının Mekanistik Ampirik Yöntemlerle Araştırılması.” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Muhammet Vefa AKPINAR'ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuarlarda 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. 03.05.2019

Muhammet ÇELİK

İÇİNDEKİLER

| | <u>Sayfa No</u> |
|---|------------------------|
| ÖNSÖZ..... | III |
| TEZ ETİK BEYANNAMESİ..... | IV |
| İÇİNDEKİLER..... | V |
| ÖZET..... | VIII |
| SUMMARY..... | IX |
| ŞEKİLLER DİZİNİ..... | X |
| TABLolar DİZİNİ..... | XVIII |
| SEMBOLLER DİZİNİ..... | XX |
| 1. GENEL BİLGİLER..... | 1 |
| 1.1. Giriş..... | 1 |
| 1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı..... | 4 |
| 1.3. Çalışmanın Literatüre Katkısı..... | 8 |
| 1.4. İyileştirme Yapılacak Beton Yolların Değerlendirilmesi..... | 9 |
| 1.4.1 Betonun Kırılma Mekanizması..... | 11 |
| 1.4.2. Kaplamada Yapısal ve İşlevsel Performans Değerlendirmesi İçin Hasarlar | 11 |
| 1.4.2.1. Köşe Çatlakları..... | 13 |
| 1.4.2.2. Enine Çatlaklar..... | 14 |
| 1.4.2.3. Boyuna Çatlaklar..... | 14 |
| 1.4.2.4. Parçalanmış Döşemeler..... | 15 |
| 1.4.2.5. Durabilite Çatlakları ve Konforsuzluğa Neden Olan Bozulmalar..... | 16 |
| 1.4.3. Oluşum Nedenlerine Göre Hasarlar..... | 17 |
| 1.4.3.1. Büzülme Çatlakları..... | 17 |
| 1.4.3.2. Erken Oluşan Çatlaklar..... | 17 |
| 1.4.3.3. Büzülmeye Bağlı Olmayan Çatlaklar..... | 18 |
| 1.4.3.4. Yüzeyde Oluşan Hasarlar..... | 21 |
| 1.5. Doğu Karadeniz Bölgesi Genel Özellikleri ve Bölgede Yolların Durumu | 24 |
| 1.6. Beton Yollar Üzerine Yapılan İyileştirme Kaplamaları..... | 30 |
| 1.6.1 İyileştirme Kaplaması Uygulaması Öncesi Yapılan Tamir..... | 32 |
| 1.7. İnce Asfalt Kaplama ile İyileştirme Yapılması..... | 35 |
| 1.8. BÜİAK Ömrünü Belirleyen Faktörler..... | 37 |

| | | |
|----------|--|-----|
| 1.8.1. | Yarım Derzler ve LTE..... | 38 |
| 1.8.2. | BÜİAK'ta Yorulma Çatlakları..... | 39 |
| 1.8.3. | Tekerlek İzi Oluşumu..... | 43 |
| 1.9. | LTPP – HYT ve Dünya Üzerinde HYT Tesisleri..... | 45 |
| 1.9.1. | Caltrans Hvs..... | 47 |
| 1.9.2. | Atlas..... | 48 |
| 1.9.3. | Crrel-Hvs..... | 49 |
| 1.9.4. | Fhwa-Ptf..... | 49 |
| 1.9.5. | Ltrc-Prf..... | 50 |
| 1.9.6. | Mn/Road..... | 50 |
| 1.10. | Ölçüm Cihazları Hakkında Literatür..... | 54 |
| 1.11. | Dingil Eşdeğerlik Faktörü (LEF – Load Equivalency Factor)..... | 56 |
| 1.12. | İzin Verilen Yük Tekrar Sayısı (Nf,Nr)..... | 59 |
| 1.13. | Literatürde Benzer Çalışmalar..... | 61 |
| 1.14. | Sonlu Elemanlar Metodu (SEM) ve Literatürde SEM Çalışmaları..... | 67 |
| 2. | YÖNTEM VE YAPILAN ÇALIŞMALAR..... | 70 |
| 2.1. | HYT Tesisi ve Mevcut Betonun Deneylere hazırlanması..... | 71 |
| 2.1.1. | Çalışmada Kullanılmış KTÜ/HYT..... | 71 |
| 2.1.2. | Çalışmada Kullanılmış Kaplamalar ve Temel Malzemeler..... | 74 |
| 2.1.3. | Tesis İçinde Bulunan Beton Kaplamanın Değerlendirilmesi..... | 79 |
| 2.2. | Beton Plakların Yorulması..... | 81 |
| 2.3. | İnce Asfalt Kaplama Hazırlık Aşamaları..... | 90 |
| 2.3.1. | Asfalt Kaplama Öncesi Çalışmalar..... | 90 |
| 2.3.2. | Yükleme Yapılmış 3 farklı Plağın Özellikleri..... | 91 |
| 2.3.3. | Ölçüm Aletlerinin Temini, Kalibrasyonu ve Yerleştirilmesi..... | 94 |
| 2.3.3.1. | Gerinim Ölçerlerin Hazırlanması..... | 94 |
| 2.4. | Asfalt Kaplama Yapımı..... | 103 |
| 2.5. | Asfalt Kaplama Yorulması..... | 108 |
| 2.5.1. | Asfalt Kaplamadan Alınan Ölçümler..... | 110 |
| 2.5.1.1. | Tekerlek İzi Oluşumu Takibi..... | 110 |
| 2.5.1.2. | HYT Tesisinin Yük değerinin Basınç Hücresi ile takibi..... | 112 |
| 2.5.1.3. | Gerinim Ölçerlerin ve LVDT'lerin Değerlerinin Takibi..... | 113 |
| 2.5.1.4. | Ultrasonik Tomografi Cihazı ile Ölçüm Alınması..... | 114 |

| | | |
|----------|--|-----|
| 2.6. | Sonlu Elemanlar Metodu (SEM) Modelleri Oluşturulması..... | 115 |
| 2.7. | Maliyet Hesapları..... | 119 |
| 2.8. | Özetle Yapılan Çalışmalar..... | 121 |
| 3. | BULGULAR VE İRDELEMELER..... | 125 |
| 3.1. | Mevcut Beton ile İlgili Bulgular..... | 126 |
| 3.2. | Beton Kaplamalara Yapılan Yüklemeler..... | 128 |
| 3.2.1. | Yarım Derz Kesimlerinin, Beton Tabanına Doğru Çatlaması..... | 129 |
| 3.2.2. | Plaklarda Oluşan Düşey Deplasmanlar ve LTE..... | 131 |
| 3.2.3. | LVDT Ölçümlerinden Elde Edilen Veriler..... | 137 |
| 3.2.4. | LTE (Yük Aktarım Verimliliği) ve δ ave Değerleri..... | 141 |
| 3.3. | Asfalt Kaplamalarda Oluşan Değerler..... | 144 |
| 3.3.1. | Asfalt Kaplamalarda Okunan LVDT Değerleri..... | 144 |
| 3.3.2. | Asfalt Kaplamalarda Ölçülen Gerinim (Birim Şekil Değiştirme Değerleri) | 150 |
| 3.3.2.1. | Asfalt Kaplamaların Alt Yüzeyinde Oluşan Basınç Gerinimleri..... | 154 |
| 3.3.2.2. | Asfalt Kaplamaların Alt Yüzeyinde Oluşan Çekme Gerinimleri..... | 160 |
| 3.3.3. | Asfalt Kaplamalarda Tekerlek İzi Oluşumu..... | 166 |
| 3.3.4. | Asfalt Kaplamalarda Kalınlığa Göre Basınç Hücre Verileri..... | 174 |
| 3.4. | Sonlu Elemanlar..... | 176 |
| 3.5. | Maliyet Hesapları ve Karşılaştırmalar..... | 189 |
| 3.6. | Genel Değerlendirme ve İzin Verilen Yük Tekrar Sayısı | 192 |
| 4. | SONUÇ VE ÖNERİLER..... | 196 |
| 5. | KAYNAKLAR..... | 203 |
| 6. | EKLER..... | 218 |

ÖZGEÇMİŞ

Doktora Tezi

ÖZET

İŞLEVSEL HASARLI BETON YOLLARDA ASFALT TAKVİYE TABAKASI
KULLANIMININ MEKANİSTİK AMPİRİK YÖNTEMLERLE ARAŞTIRILMASI

Muhammet ÇELİK

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Muhammet Vefa AKPINAR
2019, 217 Sayfa, 26 Sayfa Ek

Türkiye’de ve dünyada binlerce km beton yol dönemin asgari şartlarını karşılamak için yapılmış ve yıllarca trafik yüklerinin, çevre koşullarının vb. etkiler altında hizmet vermiştir. Bu etkiler nedeniyle beton yolların üzerinde farklı şekilde hasarlar oluşmuştur. Hasarlar yol emniyetini ve konforu etkilediği zaman yolların yeniden yapılması veya iyileştirilmesi gündeme gelmektedir. Gelecek nesillere kaynakların aktarılabilmesi ilkesi olan sürdürülebilirlik gereği, yeniden yapım yerine iyileştirme alternatifi daha çevreci ve ekonomik bir seçenek olarak karışımıza çıkmaktadır.

Bu çalışmada yarım derzli beton plakların üzerine yapılan ince asfalt kaplamaların mekanistik ampirik performansları Hızlandırılmış Yol Testi (HYT) tesisinde araştırılmıştır. Araştırmada beton kaplamaların yarım derzli, donatısız, hasır donatılı, asfalt kaplama kalınlığı ve ara yüzey güçlendirmesi değişken parametreler olarak göz önünde bulundurulmuştur. Bu çalışma kapsamında Türkiye’de en fazla beton yol ağına sahip bölgesi olan Doğu Karadeniz Bölgesindeki kullanılan tipik beton yol en kesitleri inşaa edilmiştir. HYT tesisinde 3 ay sürede, arazi şartlarında 8-10 yıla tekabül eden yükler farklı kaplama kesitleri üzerinde uygulanmıştır. Deneylede düşey deplasman, gerinim değerleri, tekerlek izi ve yorulma çatlak oluşumları takip edilmiş. Sonlu elemanlar modelleri oluşturulmuş ve deneysel veriler ile modellerin sonuçları doğrulanmıştır. Son olarak da kaplamaların fayda/maliyet analizleri karşılaştırılmıştır.

Sonuçlar değerlendirildiğinde, LTE (Yük aktarım verimliliği), düşey deplasman, gerinim ve maliyet değerleri açısından beton üstü 8 cm asfalt kaplama yerine 5 cm asfalt kaplamanın yeterli olacağı, beton plaklarda hasır donatı kullanılmasının yolun ömrünü önemli ölçüde artıracığı, derz güçlendirme malzemesinin faydalı olacağı görülmüştür. Ayrıca iki farklı asfalt kalınlığında da yorulma çatlaklarının oluşmadığı, tekerlek izlerinin ihmal edilecek kadar az olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Hızlandırılmış Yol Testi, İyileştirme, Beton yollar, Yarı Rijit Kaplamalar, Sürdürülebilirlik, Sonlu Eleman Analizleri

PhD. Thesis

SUMMARY

INVESTIGATION OF THE USE OF THIN ASPHALT OVERLAY OVER FUNCTIONALLY
FATIGUED CONCRETE ROADS BY MECHANICAL EMPIRICAL ANALYSIS

Muhammet ÇELİK

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Muhammet VEFA AKPINAR
2019, 217 Pages, 26 Pages Appendix

Thousands of kilometers of concrete road in Turkey and around the world has been built to meet the minimum requirements and has served many years under the influences of traffic load, environmental conditions, etc. Due to these effects, concrete roads have been damaged in different ways. When damages affect road safety and comfort, reconstruction or rehabilitation of roads comes into question. The necessity of sustainability, which is the principle of preserving resources for future generations, instead of rebuilding, the rehabilitation option comes as a more environmentally friendly and economical.

In this study, the mechanistic-empirical performance of the thin asphalt overlay paved on concrete slabs containing contraction joints was investigated in the Accelerated Road Test (HYT) facility. In the research, concrete contraction jointed, unreinforced, mesh-reinforced, asphalt thickness and interface bonding reinforcement were considered as variable parameters. In this study, the typical concrete road sections used in the Eastern Black Sea region which has the longest road network in Turkey was constructed in the Accelerated Road Test (HYT) facility. In the 3-month period at HYT facility, the loads corresponding to 8-10 years in the field conditions were applied to different asphalt overlay sections. In the experiments, vertical displacement, strain values, rutting and fatigue cracks were observed. Three-dimensional finite element models were developed, the results of the experimental data and the models were verified and the vertical stress distributions that were difficult to obtain from experimental studies were computed. Finally, the cost/benefit analyses of the overlays were compared.

When the results are evaluated, it was seen that 5 cm asphalt pavement will be sufficient instead of 8 cm asphalt pavement above the concrete plates in terms of vertical displacement, strain, cost values and the use of mesh reinforcement in concrete slabs will significantly increase the life of the road, and the grout reinforcement material at the contraction joint is beneficial. In addition, it was determined that fatigue cracks were not formed for the given thicknesses and the rutting was negligible.

Key Words: Accelerated Pavement Test, Rehabilitation, Concrete Roads, Composite Pavement, Sustainability, Finite Element Analysis

ŞEKİLLER DİZİNİ

| | <u>Sayfa No</u> |
|---|------------------------|
| Şekil 1.1. Deneyleler için hazırlanan beton plaklar..... | 5 |
| Şekil 1.2. Deneylelerin yapıldığı kaplama modelleri.(a) Asfalt kalınlığı 5 cm (b) 8 cm Asfalt kalınlığı | 6,7 |
| Şekil 1.3. İyileştirme çalışması öncesi yolun değerlendirilmesi | 10 |
| Şekil 1.4. Yapısal ve işlevsel (yüzeysel) hasar türleri..... | 13 |
| Şekil 1.5. Köşe çatlağı görünümü..... | 13 |
| Şekil 1.6. Trabzon Bulak Ma. 30 yıldır kullanılan beton yolda boyuna çatlaklar..... | 15 |
| Şekil 1.7. Trabzon İli Çaykara İlçesi Taşören Mahallesi eski beton üzerine yapılan asfalt kaplama da boyuna çatlak oluşumu..... | 15 |
| Şekil 1.8. Trabzon Çilekli Mahallesi. İnce beton kaplamada parçalanmış plak hasarı.. | 16 |
| Şekil 1.9. Derz kesme zaman aralığı | 19 |
| Şekil 1.10. Dernekpazarı Zincirlitaş Mah. alttemelde drenaj eksikliği nedeniyle oluşan kaymalar..... | 20 |
| Şekil 1.11. Trabzon Çaykara İlçesi Uzungöl mahallesinde yola düşen kayalar..... | 20 |
| Şekil 1.12. Trabzon İlinde beton yollardan alınan numunelerde görülen yassı agrega... | 22 |
| Şekil 1.13. Of Kavakpınar Mah. cilalama nedeniyle emniyetsiz sürüşe neden olan yol..... | 24 |
| Şekil 1.14. Of İlçesi, yağışlarda drenaj eksikliği ve hidroplaning..... | 24 |
| Şekil 1.15. Beşikdüzü, Aksaklı Mah. yolda boyuna çatlaklar, soyulmalar, talaşlanmalar..... | 25 |
| Şekil 1.16. Ortahisar Kavala Mah. Parçalanmış plak, enine ve boyuna çatlaklar..... | 25 |
| Şekil 1.17. Rize ili Denizgören Köyünde alınan BÜİAK numuneleri..... | 26 |
| Şekil 1.18. Trabzon İlinde alınan beton numuneler..... | 26 |
| Şekil 1.19. Rize İlinde alınan BÜİAK numuneler..... | 26 |
| Şekil 1.20. Of ilçesinde yol altında su nedeniyle oluşan akma ve boşalan yol kaplamasının kopması, temel ve alttemel eksikliği ve suyun doğru tahliye edilmemesi nedeniyle oluşan hasarlar..... | 28 |
| Şekil 1.21. Vakfıkebir, Şenocak Mah. dolan yol kenarı hendeği yüzünden, 2-3 cm kalınlığında yapılmış BÜİAK plakları arasına giren su ve yolda yaşanan kopmalar..... | 28 |

| | |
|---|----|
| Şekil 1.22. Trabzon Şalpazarı İlçesi, Çarlaklı Mah. beton yolu en az 20 sene önce inşa edilmiş ancak ağır taşıt yükü ve hatalı tasarım nedeniyle oluşan parçalanmış plak..... | 29 |
| Şekil 1.23. Rize İyidere İlçesi, Denizgören köy yolu, Beton üstü ince asfalt kaplamada yorulma (yansıma) çatlakları ve asfaltın çok ince olduğu yerlerde yük ve çevre etkisi ile kopmalar..... | 29 |
| Şekil 1.24 Beşikdüzü İlçesi, Akköse Mah. BÜİAK yorulma çatlakları..... | 30 |
| Şekil 1.25. İyidere Kalecik Köyü, işçiliğinin vatandaşlar tarafından yapılan, en az 25 yıldır hizmet veren, tasarımda kırılmamış (pürüzsüz) ve iri agrega oranı yüksek üretilmiş beton yol..... | 30 |
| Şekil 1.26. İyileştirme ile yol ömrünün uzatılması. | 31 |
| Şekil 1.27. Kaplamanın iyileştirmesi için gerekli şartlar..... | 32 |
| Şekil 1.28. (A) Plak üstünde enine boyuna çatlaklar ve çukurların tespiti, (B) tespit edilen hasarların tamiri ve (C) kaplama ile iyileştirme..... | 33 |
| Şekil 1.29. Kayma donatısı ve düşey deplasman oluşumu | 34 |
| Şekil 1.30. Yorulma çatlaklarına neden olan gerilmelerin oluşma mekanizmaları | 40 |
| Şekil 1.31. Derinlikle sıcaklık farklılıklarından oluşan büzülme kaynaklı gerilmeler .. | 41 |
| Şekil 1.32. Genleşme nedeniyle oluşan yansıma çatlağı mekanizması | 41 |
| Şekil 1.33. Trafik yükleri nedeniyle oluşan yansıma çatlağı mekanizması | 42 |
| Şekil 1.34. Beton kaplama altında oluşan boşluktan kaynaklı yansıma çatlakları..... | 42 |
| Şekil 1.35. Tekerlek izi oluşum şekilleri | 43 |
| Şekil 1.36. LTPP veri toplama yönteminin kısa bir özeti..... | 46 |
| Şekil 1.37. CALTRANS tesisinin çeşitli görüntüleri | 48 |
| Şekil 1.38. CRREL-HVS tesisinin görüntüsü..... | 49 |
| Şekil 1.39. Açık alanda, kendi içinde dairesel döngüleri olan M/Road HYT tesisi..... | 51 |
| Şekil 1.40. Asfalt kaplamada kritik gerilmeler | 60 |
| Şekil 1.41. Perez tarafından hazırlanan deney düzeneği | 63 |
| Şekil 1.42. HYT Tesisinde Greene ve arkadaşlarının yaptığı deneyde kaplama kalınlıkları | 65 |
| Şekil 1.43. Granüller temelin üstünde ve aşınma tabakasının hemen altında geogrid... | 68 |
| Şekil 2.1. HYT Tesisinin dışarıdan görünüşü..... | 71 |

| | |
|--|----|
| Şekil 2.2. Yükleme cihazının asfalt kaplama yapılması için ana kapıdan dışarıya çıkarılması..... | 72 |
| Şekil 2.3. KTÜ bünyesinde bulunan ve Türkiye'nin ilk ve tek HYT tesisi | 73 |
| Şekil 2.4. Otomasyon sisteminin panosu..... | 74 |
| Şekil 2.5. Tesisin önceki çalışmalarında kullanılan beton kaplama altında bulunan temel tabakası..... | 75 |
| Şekil 2.6 Daha önceki çalışmalarda yorulan beton plaklar..... | 76 |
| Şekil 2.7. Beton plakta yarım derzlerin kesimi..... | 77 |
| Şekil 2.8. Kesme temizlik işleminden sonra derzler..... | 77 |
| Şekil 2.9. Genişliği 0,5 cm olan kesilip temizlenmiş yarım derz..... | 77 |
| Şekil 2.10. Enine ve boyuna kesilen yarım derzler ile oluşan deney düzeneği..... | 78 |
| Şekil 2.11. Deneylein yapılacağı kısım ve geri dönüşüme gönderilen kısım. Kırmızı yarım derz uygulamaları..... | 79 |
| Şekil 2.12. Konkasörde kırılarak, KTÜ bünyesine geri getirilen malzeme..... | 79 |
| Şekil 2.13 İşaretlenmiş çatlaklar..... | 80 |
| Şekil 2.14. Tekerlek izi ve çatlaklar..... | 80 |
| Şekil 2.15. Ultrasonik tomografi cihazı ile yükleme öncesi alınan ölçümler..... | 81 |
| Şekil 2.16. Tekerlek takılan disk..... | 82 |
| Şekil 2.17. Yön değiştirilen tekerlekler..... | 82 |
| Şekil 2.18. Basınç hücreleri ve veri toplayıcı..... | 83 |
| Şekil 2.19. Yük altında basınç hücreleri..... | 83 |
| Şekil 2.20. Deneylelerde kullanılan basınç ölçer veri toplayıcısı..... | 84 |
| Şekil 2.21. Basınç hücrelerinin altına toz kauçuk dökülmesi..... | 84 |
| Şekil 2.22. Beton altında bulunan ve değer okuyamayan basınç hücresi..... | 85 |
| Şekil 2.23 Arazide çatlak tespiti..... | 87 |
| Şekil 2.24. Deneylelerde beklenen çatlaklar..... | 87 |
| Şekil 2.25. Sabitlenmiş LVDT'ler..... | 88 |
| Şekil 2.26. Duvara sabitlenmiş güzergah boyu LVDT'ler..... | 88 |
| Şekil 2.27. LVDT'lerin ucu sağa sola kayma yapmaması için açılan oyuklar..... | 88 |
| Şekil 2.28. LVDT'lerden elde edilen verilerin toplayıcısı..... | 89 |
| Şekil 2.29. Güzergah boyunca kauçuk izi..... | 89 |
| Şekil 2.30. Yüklemelerden sonra beton plaklar..... | 89 |
| Şekil 2.31. Tazyikli hava ile plaka ve derz içlerinin temizlenmesi işlemi..... | 90 |

| | |
|--|-----|
| Şekil 2.32. Hasır çelik donatılı plaklar ve yarım derzler..... | 91 |
| Şekil 2.33. Kontrol derzi olarak bırakılmış yarım derz..... | 92 |
| Şekil 2.34. Harç için kullanılan malzemeler..... | 93 |
| Şekil 2.35. Harcın hazırlanışı..... | 93 |
| Şekil 2.36. Harcın imalat aşaması..... | 94 |
| Şekil 2.37. Derz güçlendirme malzemesi..... | 94 |
| Şekil 2.38. İlk planlanan gerinim ölçerin çizimleri..... | 96 |
| Şekil 2.39. Gerinim ölçer yapımı..... | 97 |
| Şekil 2.40. Asfalt gerinim ölçer bitmiş hali..... | 97 |
| Şekil 2.41. Özel kalıp ve pullout düzeneği..... | 97 |
| Şekil 2.42. Kalıpta gerinim ölçer denemesi..... | 97 |
| Şekil 2.43. Pullout test düzeneğinde deneme..... | 98 |
| Şekil 2.44. Araç altında deneme..... | 98 |
| Şekil 2.45. Cihaz yerleştirilmesi..... | 98 |
| Şekil 2.46. Finişer ile asfalt dökümü..... | 98 |
| Şekil 2.47. Gerinim ölçerler..... | 98 |
| Şekil 2.48. Havaalanı yol ayırımında gerinim ölçerler..... | 98 |
| Şekil 2.49. Havaalanı yolunda işlek trafikte yerleştirilen gerinim ölçerlerin değer okuması..... | 99 |
| Şekil 2.50. Asfalt altında kalacak ölçüm cihazlarının plaklar üzerinde belirlenen yerleri..... | 100 |
| Şekil 2.51. Belirlenen yerlerin işaretlenmesi..... | 100 |
| Şekil 2.52. Ölçüm aletlerinin yerlerinin hassas aletler ile tespiti..... | 101 |
| Şekil 2.53. Asfalt içinde kalacak bütün ölçüm cihazları yerleştirildikten sonraki hali.. | 101 |
| Şekil 2.54. Asfalt içine yerleştirilen termokupllar..... | 102 |
| Şekil 2.55. Ölçüm cihazları..... | 102 |
| Şekil 2.56. Sıcak asfalt için alınan önlemler..... | 102 |
| Şekil 2.57. Asfalt kaplamanın yapımı için sistemin dışarıya çıkarılması..... | 102 |
| Şekil 2.58. Asfalt kalınlığını ayarlamak için sabit duvara yapılan kotlama çalışması... | 104 |
| Şekil 2.59. Robot ile asfalt dökümü sırasında ölçüm cihazlarına özen gösterilerek yapılan çalışma..... | 104 |
| Şekil 2.60. Tesisin içerisine asfalt kaplama yapımı..... | 105 |
| Şekil 2.61. Tesisin içerisinde asfaltın sıkıştırılması..... | 105 |

| | |
|---|-----|
| Şekil 2.62. Asfalt kaplama sonrası..... | 107 |
| Şekil 2.63. Asfalt üstü işaretlemeler..... | 107 |
| Şekil 2.64. Donatı bulma cihazı ile asfalt içinde ölçüm cihazlarının yerinin bulunması | 107 |
| Şekil 2.65. Doğu tarafı denge işlemi..... | 108 |
| Şekil 2.66. Batı tarafı denge işlemi..... | 108 |
| Şekil 2.67. Beton üstü ince asfalt kaplama güney tarafı yükleme çalışmaları..... | 109 |
| Şekil 2.68. Beton üstü ince asfalt kaplama kuzey tarafı yükleme çalışmaları..... | 109 |
| Şekil 2.69. Yükleme son aşamaları..... | 110 |
| Şekil 2.70. Tekerlek izi oluşumlarının takibi için alınan hassas ölçümler..... | 111 |
| Şekil 2.71. Tekerlek izi oluşumunun ölçümü ve şeklinin belirlenmesi..... | 111 |
| Şekil 2.72. Basınç hücreleri ile hem yüzeyde hem de asfalt içinde oluşan basınç gerilmelerinin ölçülmesi..... | 112 |
| Şekil 2.73. Veri toplama cihazı ile birim şekil değiştirme verilerinin kayıt edilmesi.... | 113 |
| Şekil 2.74. Deneyler sonunda veri toplama cihazının ekranı..... | 114 |
| Şekil 2.75. Zimer Mühendislik firmasına ait UT cihazı ile asfalt kaplamada ölçüm alınması..... | 115 |
| Şekil 2.76. Beton kaplama için hazırlanan 4 farklı model..... | 116 |
| Şekil 2.77. C3D8R eleman tipi | 117 |
| Şekil 2.78. Hasır donatı için T3D2..... | 117 |
| Şekil 2.79. SE’da oluşturulan model tekerlek basınçları ve sınır koşulları..... | 117 |
| Şekil 2.80. SE modellerinde kullanılan ağ şekli, derze yakın kısımlarda bulunan sık ağ | 119 |
| Şekil 2.81. SE metodu ile beton üstü asfalt kaplama modelleri..... | 119 |
| Şekil 3.1. Aydınlar kâğıdı üzerinde çatlaklar..... | 127 |
| Şekil 3.2. Çatlakların sayısallaştırılması..... | 127 |
| Şekil 3.3. Yükleme öncesi plakta mevcut çatlaklar..... | 127 |
| Şekil 3.4. Yükleme öncesi derz..... | 129 |
| Şekil 3.5. Derz ilerleme çatlağı..... | 129 |
| Şekil 3.6. Yükleme nedeniyle oluşan diğer derz ilerleme çatlakları..... | 130 |
| Şekil 3.7. Yükün bulunduğu yere göre plakta oluşan değişimler..... | 131 |
| Şekil 3.8. Deney düzleminin en kesiti..... | 131 |
| Şekil 3.9. LVDT’lerin yaklaşık olarak hareket şekilleri..... | 133 |
| Şekil 3.10. Örnek bir grafik inceleme..... | 134 |
| Şekil. 3.11. Kuzey güz. LVDT yüklemelerinin başlangıç ve 25,000 yükleme grafikler | 135 |

| | |
|---|-----|
| Şekil 3.12. Güney güz. LVDT yüklemelerinin başlangıç ve 25,000 yükleme grafikleri | 136 |
| Şekil 3.13. Donatılı plakta başlangıç ve 25,000 yükleme sonrası oluşan deplasmanlar..... | 139 |
| Şekil 3.14. Donatısız plakta başlangıç ve 25,000 yükleme sonrası oluşan deplasmanlar..... | 139 |
| Şekil 3.15. Derzdeki çatlağın ilerlemesi nedeniyle plakta oluşan değişim..... | 139 |
| Şekil 3.16. LTE hesaplanması için komşu plaklardan alınan deplasman değerleri..... | 143 |
| Şekil 3.17. Tekrarlayan eğrileri bozan veriler..... | 145 |
| Şekil 3.18 Gerinim grafik örnekleri..... | 152 |
| Şekil 3.19. Grafikte değerlerin oluşum şekli..... | 153 |
| Şekil 3.20. Polinom çizgisi ve değerlerin tespiti..... | 154 |
| Şekil 3.21. 8 cm asfalt kap. bulunan bütün gerinim ölçerlerin basınç gerinim değerleri..... | 156 |
| Şekil 3.22. 5 cm asfalt kap. bulunan bütün gerinim ölçerlerin basınç gerinim değerleri..... | 156 |
| Şekil 3.23. 8 cm asfaltta tekerlek altında kalan gerinim ölçerlerden alınan değerler..... | 158 |
| Şekil 3.24. 5 cm asfaltta tekerlek altında kalan gerinim ölçerlerden alınan değerler..... | 158 |
| Şekil 3.25. Tekerlekler arasında kalan gerinim ölçere gelen yükler..... | 160 |
| Şekil 3.26. 5 cm asfalt kap bulunan bütün gerinim ölçerlerin çekme gerinim değerleri..... | 162 |
| Şekil 3.27. 8 cm asfalt kap. bulunan bütün gerinim ölçerlerin çekme gerinim değerleri..... | 162 |
| Şekil 3.28. Tekerlek altından plak ucuna doğru azalan gerilmeler..... | 166 |
| Şekil 3.29. Donatısız ve ara yüzey güçlendirmesi bulunmayan plakta oluşan tekerlek izi..... | 167 |
| Şekil 3.30. Donatılı plakta oluşan tekerlek izi..... | 167 |
| Şekil 3.31. Asfalt ve beton plak arasında güçlendirme yapılan derzde oluşan tekerlek izi..... | 168 |
| Şekil 3.32. Geçiş sayısına göre oluşan kabarma miktarları..... | 170 |
| Şekil 3.33. Geçiş sayısına göre oluşan çökme miktarları..... | 170 |
| Şekil 3.34. Tekerlek izi oluşumlarının aşamaları | 171 |

| | |
|---|-----|
| Şekil 3.35. Asfalt kaplama üzerinden 100,000 geçiş sonrası oluşan deformasyon..... | 172 |
| Şekil 3.36. Asfalt kaplama üzerinden 100,000 geçiş (1,186,000 ESAL) sonra tekerlek izi..... | 173 |
| Şekil 3.37. 8 cm asfalt kaplamada 100,000 yüklemeye oluşan tekerlek izi..... | 173 |
| Şekil 3.38. Asfalt kaplamadan alınan numuneler..... | 174 |
| Şekil 3.39. 5 ve 8 cm asfalt kaplamaların alt yüzeyinde oluşan basınç değerleri..... | 175 |
| Şekil 3.40. Asfalt kap. başlangıç ve son yüklemelere göre oluşan basınç gerilmeleri... | 176 |
| Şekil 3.41. Donatısız ve derz ilerleme çatlakları oluşmamış plakta deplasman dağılımları..... | 178 |
| Şekil 3.42. Çatlak ilerlemeleri a. Hasır donatılı b. Çatlaksız c. Çatlaklı..... | 179 |
| Şekil 3.43. Plak altında oluşan çatlak ilerlemeleri. a. Hasır donatılı b. Çatlaksız c. Çatlaklı..... | 179 |
| Şekil 3.44. Donatılı plakta donatıda derz ilerleme çatlakları oluşmadan (A) önce ve (B)sonra oluşan gerilmeler..... | 180 |
| Şekil 3.45. Çatlak gelişimi (A) beklenen (B) gerçekleşen..... | 181 |
| Şekil 3.46. 8 cm asfalt kaplamada oluşan düşey yönde eksi deplasmanlar..... | 182 |
| Şekil 3.47. 5 cm asfalt kaplamada oluşan düşey deplasmanlar..... | 183 |
| Şekil 3.48. Donatılı plakta 8 cm asfalt kaplama alt bölgesinde oluşan çekme gerinimleri..... | 184 |
| Şekil 3.49. Donatısız plakta 8 cm asfalt kaplama alt bölgesinde oluşan çekme gerinimleri..... | 185 |
| Şekil 3.50. A. Güçlendirmeli plakta 8 cm asfalt kap. alt bölgesinde oluşan çekme gerinimleri..... | 185 |
| Şekil 3.51. Donatılı plakta 5 cm asfalt kaplama alt bölgesinde oluşan çekme gerinimleri..... | 185 |
| Şekil 3.52. Donatısız plakta 5 cm asfalt kaplama alt bölgesinde oluşan çekme gerinimleri..... | 185 |
| Şekil 3.53. Arayüzey Güçlendirmeli plakta 5 cm asfalt kaplama alt bölgesinde oluşan çekme gerinimleri..... | 186 |
| Şekil 3.54. BÜİAK ve Temel tabakalarda oluşan gerilmeler..... | 187 |
| Şekil 3.55. Donatısız plakta 5 cm asfalt kaplama alt ve üst yüzeyinde oluşan gerilmeler..... | 187 |
| Şekil 3.56. Donatılı plakta 5 cm asfalt kaplama alt ve üst yüzeyinde oluşan gerilmeler..... | 187 |

| | |
|--|-----|
| Şekil 3.57. A. Güçlendirmeli plakta 5 cm asfalt kap. alt ve üst yüzeyinde oluşan gerilmeler..... | 188 |
| Şekil 3.58. Donatısız plakta 8 cm asfalt kaplama alt ve üst yüzeyinde oluşan gerilmeler..... | 188 |
| Şekil 3.59. Donatılı plakta 8 cm asfalt kaplama alt ve üst yüzeyinde oluşan gerilmeler..... | 188 |
| Şekil 3.60. A. Güçlendirmeli plakta 8 cm asfalt kap. alt ve üst yüzeyinde oluşan gerilmeler..... | 189 |
| Şekil 3.61. Arayüzey güçlendirme plağı üzerinde oluşan gerilme değerleri..... | 189 |



TABLolar DİZİNİ

| | <u>Sayfa No</u> |
|--|------------------------|
| Tablo 1.1. Dünya üzerinde bazı tam veya küçük ölçekli HYT'lerin özellikleri | 52 |
| Tablo 1.2. Farklı Yüklere Dingil Eşdeğerlik Faktörleri | 58 |
| Tablo 1.3. SE metodu ile hesaplanmış çekme gerinimleri | 69 |
| Tablo 2.1. HYT tesisinin genel özellikleri..... | 74 |
| Tablo 2.2. HYT tesisinde uygulanan 1 yüklemenin arazi şartlarında karşılığı..... | 86 |
| Tablo 2.3. Tesise gelen asfaltın granülometresi | 86 |
| Tablo 2.4. C25 beton için malzeme özellikleri ve çeşitli parametreler | 118 |
| Tablo 2.5 AASHTO 1993 ESAL sayısına göre kalınlıklar | 120 |
| Tablo 3.1. Beton plaklarda yükleme öncesi tespit edilen çatlaklar..... | 126 |
| Tablo 3.2. Yükleme öncesi beton plaklarda gözle tespit edilen çatlakların oranları. | 126 |
| Tablo 3.3. Yarım derzlerin, devam kısmının çatlaması | 129 |
| Tablo 3.4. LVTD'lerde okunan en yüksek ve en düşük değerler..... | 137 |
| Tablo 3.5. LVTD'lerin değerlerinin ortalaması ve değişim yüzdeleri..... | 138 |
| Tablo 3.6. Yükleme sırasında oluşan LTE ve δ ave değerleri..... | 142 |
| Tablo 3.7. Ortalama LTE değerlerinin başlangıç ve 25,000 yükleme sonrası değerleri. | 142 |
| Tablo 3.8. Kuzey güz. bulunan LVDT'de oluşan en yüksek, en düşük ve fark değerleri..... | 146 |
| Tablo 3.9. Güney güzergahta bulunan LVDT'de oluşan en yüksek, en düşük ve fark değerleri..... | 146 |
| Tablo 3.10. BÜİAK ilk yüklemeler ve son yüklemelerde LVDT değerleri..... | 147 |
| Tablo 3.11. BÜİAK ilk yüklemeler ve beton planlarda son yüklemelerde LVDT değerleri..... | 148 |
| Tablo 3.12. BÜİAK ve beton planlarda ilk yüklemelerde oluşan değerler ve değişim.. | 148 |
| Tablo 3.13. Gerinim ölçerlerin, yerleri kısa adları ve veri toplama durumları..... | 151 |
| Tablo 3.14. Deneyler sırasında farklı tarihlerde sıcaklıklar..... | 151 |
| Tablo 3.15. 5 cm asfalt kaplamada yüklemeler ve oluşan gerinim en yüksek değerleri ($\epsilon \cdot 106$)..... | 155 |
| Tablo 3.16. 8 cm asfalt kaplamada yüklemeler ve oluşan gerinim en yüksek değerleri ($\epsilon \cdot 106$)..... | 155 |
| Tablo 3.17. Gerinim ölçerlerde oluşan ortalama basınç gerinimler..... | 158 |

| | |
|--|-----|
| Tablo 3.18. 5 cm asfalt kaplamada yüklemeler ve oluşan gerinim en yüksek değerleri ($\epsilon \cdot 10^{-6}$)..... | 161 |
| Tablo 3.19. 8 cm asfalt kaplamada yüklemeler ve oluşan gerinim en yüksek değerleri ($\epsilon \cdot 10^6$) | 161 |
| Tablo 3.20. Gerinim ölçerlerin ürettiği değerlerin ilk son ve ortalama değerleri..... | 163 |
| Tablo 3.21. Tekerlek altında kalan farklı derz tiplerinde oluşan çekme gerinimleri..... | 164 |
| Tablo 3.22. Geçiş sayılarına göre tekerlek izi takip noktaları..... | 169 |
| Tablo 3.23. Farklı derz tiplerinde oluşan ortalama kabarma ve çökme değerleri..... | 169 |
| Tablo 3.24. Tekerlek izi ölçümlerinde alınan en yüksek değerler..... | 172 |
| Tablo 3.25. Asfalt kaplama alt yüzeyinde oluşan basınç değerleri..... | 175 |
| Tablo 3.26. SE analizleri ile elde edilen düşey deplasmanlar | 177 |
| Tablo.3.27. Asfalt kaplama yapıldıktan sonra derz kısımlarında oluşan düşey deplasman..... | 184 |
| Tablo 3.28. SE analizlerinde elde edilen çekme gerinim değerleri..... | 185 |
| Tablo 3.29. 1 km donatısız beton yol 2018 birim fiyatlarına göre yaklaşık maliyeti.... | 189 |
| Tablo 3.30. 1 km hasır donatılı beton yol 2018 birim fiyatlarına göre yaklaşık maliyeti..... | 189 |
| Tablo 3.31. 1 km esnek kaplama yol 2018 birim fiyatlarına göre yaklaşık maliyeti.... | 190 |
| Tablo 3.32. 5 cm asfalt kaplama yapılması 2018 fiyatlarına göre yaklaşık maliyeti.... | 190 |
| Tablo 3.33. 8 cm asfalt kaplama yapılması 2018 fiyatlarına göre yaklaşık maliyeti.... | 190 |
| Tablo 3.34. 1 km beton yol için derz güçlendirme malzemesi yaklaşık maliyeti..... | 191 |
| Tablo 3.35. TrBB'nin mahalle (eski köy) yollarında uyguladığı 1 km asfalt kaplama yaklaşık maliyeti..... | 191 |
| Tablo 3.36 HYT tesisinde bulunan plakların 1 km'sinin yaklaşık maliyetleri..... | 191 |

SEMBOLLER DİZİNİ

| | |
|---------|---|
| AASHTO | : American Association of State Highway Officials |
| AC | : Asfalt Betonu |
| ACPA | : American Concrete Pavement Association |
| AFAD | : Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı |
| ALF | : Accelerated Loading Facility |
| APT | : Accelerated Pavement Test |
| ARMI | : Asphalt Rubber Membran Layer |
| BSK | : Bütümlü Sıcak Karışım |
| BUIAK | : Beton Üstüne İnce Asfalt Kaplama |
| CATRANS | : California Department of Transportation |
| CBR | : Kaliforniya Taşıma Gücü |
| CDP | : Concrete Damaged Plasticity |
| CS-SJ | : Concrete Support Semi Joint |
| ÇŞB | : Çevre Ve Şehircilik Bakanlığı |
| ECC | : Engineering Cementitious Composite |
| EPDM | : Etilen Propilen Dien Monomer |
| ESAL | : Equivalent Single Axle Load |
| FDOT | : Florida Department of Transportation |
| FHWA | : Federal Highway Administration |
| FWD | : Falling Weight Deflectometer |
| HYT | : Hızlandırılmış Yol Testi |
| IRC | : Indian Road Congress |
| KGM | : Karayolları Genel Müdürlüğü |
| LEF | : Load Equivalency Factor |
| LTE | : Load Transfer Efficiency |
| LTPP | : Long-Term Pavement Performance |
| LVDT | : Linear Variable Differential Transducer |
| LWD | : Light Weight Deflectometer |
| ME | : Mekanistik-Ampirik |
| MSB | : Milli Savunma Bakanlığı |

| | |
|---------------------|---|
| NCHRP | : National Cooperative Highway Research Program |
| PSPA | : Portable Seismic Pavement Analyzer |
| RAP | : Reclaimed Asphalt Pavement |
| RC | : Hızlı Kür Olan Bitüm |
| SE | : Sonlu Elemanlar |
| TÇMB | : Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği |
| TrBB | : Trabzon Büyükşehir Belediyesi |
| US-RC-SJ | : Unsupported Reinforced Concrete Semi Joint |
| US-SJ | : Unsupported Semi Joint |
| UT | : Ultrasonik Tomografi |
| δ_L | : Derze Yakın Yükün Bulunduğu Tarafında Oluşan Deplasman |
| δ_U | : Derze Yakın Yükün Bulunmadığı Tarafında Oluşan Deplasman |
| δ_{ave} | : Derzin İki Tarafında Oluşan Deplasmanların Ortalaması |
| δ_y | : Düşey Yönde Oluşan Deplasman |
| k_{at} | : Dingil Özelliklerini İfade Eden Katsayı |
| k_{wt} | : Tekerlek Özelliklerini İfade Eden Katsayı |
| k_{lt} | : Süspansiyon Sisteminin Özelliklerini İfade Eden Katsayı |
| k_{tp} | : Lastik Basıncından Gelen Katsayı |
| P | : Hesaplanacak Dingildeki Yük |
| P_0 | : Tek Dingilde Referans Yükü |
| α | : Hasar Tiplerine Göre Değişen Katsayı |
| L_x | : ESAL Değerine Çevirdiğimiz Yük |
| L_{18} | : 18 Ibs Yük (8.2 Ton) |
| L_{2x} | : Dingil Tipi (Tek Dingil: $L_{2x}=1$, Çift Dingil: $L_{2x}=2$, Üçlü Dingil: $L_{2x}=3$) |
| pt | : Nihai Servis İndeksi |
| S_N | : Üstyapı Sayısı (İnç Cinsinden) |
| Nf | : Yorulma Gerilmeleri Nedeniyle İzin Verilen Yük Tekrar Sayısı |
| Nr | : Tekerlek İzi Oluşumu Nedeniyle İzin Verilen Yük Tekrar Sayısı |
| ϵ_t | : Yatay Çekme Gerinimleri |
| ϵ_v | : Dikey Çekme Gerinimleri |
| $\epsilon_{Basınç}$ | : Basınç Gerinimleri |
| E_1 | : Sıcaklığa Göre Düzenlenmiş Esneklik Modülü |

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Ulaşım yapılarında hizmet ömrü boyunca tekrarlanan çeşitli gerilmeler (çevresel etmenler, trafik vb.) hasar oluşturmakta ve ekonomik ömrünün kısılmasına neden olmaktadır. İnsan nüfusunun hızlı artışıyla, mevcut ulaşım yapıları yetersiz kalmakta ve yeni ulaşım yapılarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu durum, inşa edilen yolların daha uzun ömürlü olmasını sağlama veya hasar gören yolların daha uygun (az maliyetli, uzun ömürlü) yöntemler ile iyileştirilmesi gerekliliğini doğurmaktadır. Bu gereklilik karayolu ulaşımında birçok başlıkta (malzeme, tasarım, işlevsellik, sürdürülebilirlik vb.) yapılan araştırmaların konusunu oluşturmaktadır. Araştırmaların genel amacı daha uzun ömürlü (ekonomik) daha emniyetli ve daha konforlu ulaşımı sağlamaktır. Ülkelerde karayolu ağlarının binlerce km olduğu hesaba katıldığında, araştırmalar neticesinde birim metrede düşük maliyetli ve uzun ömürlü yöntem bulunması, binlerce kilometre yolda yüksek oranda ekonomik faydalar sağlayacaktır. Türkiye'de 2018 yılı için KGM'ye (Karayolları Genel Müdürlüğü) ayrılan bütçe 18.1 milyar Türk Lirasının üstündedir. Bu bütçenin en az %60'ı yatırımlar için kullanılmıştır. Yaklaşık 1.5 milyar Türk Lirası ise mevcut yolların bakım onarımı için harcanmıştır [1]. Bu maliyetlerin düşürülmesi için daha az bütçelerle yapılan araştırmaların çoğaltılması gerekmektedir.

Yol yapılarının uzun vadede en maliyetli kısmını üstyapı kaplamaları oluşturmaktadır [2]. Bu nedenle karayolları araştırmalarının ciddi bir kısmı kaplamalar hakkında olmaktadır. Yol kaplamaları belirli bir süre hizmet verdikten sonra oluşan hasarlar nedeniyle onarıma, yeniden yapıma ya da iyileştirme (rehabilitasyon) yöntemleri ile genel bakıma ihtiyaç duymaktadır. Daha önce yapılan çalışmalarda hizmet süresinin 20 yıl olarak tasarlandığı ancak bakım ve iyileştirme yapılmamış yollarda yapı ömrünün ortalama 11 yıla kadar düştüğü tespit edilmiştir [3]. Son yıllarda, hasarlar nedeniyle önlem alınacak ulaşım yapısında yeniden yapım seçeneği maliyetli olduğundan genellikle bakım-onarım veya iyileştirme yöntemi yaygın olarak tercih edilmektedir. İyileştirme yönteminin doğru seçilmemesi nedeniyle, ulaşım yapısının kısa sürede tekrar bakım ihtiyacı duyacak hale gelmesi durumunda, sık sık iyileştirme/bakım maliyeti, bir kere yeniden yapım maliyetini geçebilir. Bu nedenle doğru ve faydalı iyileştirme yöntemlerinin seçilmesi

büyük önem arz etmektedir. Doğru iyileştirme yöntemleri kullanıldığında, kaplamaların az maliyetler ile uzun yıllar hizmet vermesi sağlanmaktadır.

Kaplamaların uzun ömürlü olması veya iyileştirme yöntemlerinin fayda-maliyet ilişkilerinin çıkartılabilmesi için deneysel ve/veya mekanistik araştırmalar sürdürülmektedir. Deneysel yöntemler genellikle laboratuvar ortamında kısıtlı imkân ve yapıdan alınan numuneler üzerine yapılmaktadır. Oysa ulaşım yapılarının özellikle iklimsel etkiler, trafik yükleri, tasarım kıstasları ve malzeme tiplerinin değişiklikleri gibi doğrudan dış faktörlere bağlı olması, deneysel çalışmaların tek başlarına yeterli olmasını imkânsızlaştırmaktadır [4, 5]. Bu nedenle yol kaplaması çalışmalarında mekanistik veriler oldukça önem kazanmaktadır. Kaplamalar hakkında mekanistik veri almak için ABD’de uzun vadeli veri toplayan LTPP (Long-Term Pavement Performance) adlı program kullanılmıştır. Bu program sayesinde ABD’de yapılan yolların belirli bölgelerinde gerilme, deplasman ölçerler ve benzeri ölçüm cihazları yerleştirilmiş, uzun yıllar boyunca oluşan hasarlar ile ölçüm cihazlarının verileri karşılaştırılarak performans kriterleri tespit edilmiştir [6, 7]. Elde edilen veriler ile yol kaplamaları hakkında ciddi bir birikime ulaşılmıştır. Ancak bu programda deneyler 25 yıla varan uzun sürelerde ancak yapılabilmektedir. Daha hızlı ve müdahale edilmesi kolay mekanistik deneylere ihtiyaç duyulduğundan LTPP’ye alternatif olarak hızlandırılmış yol testi (HYT) tesisleri de kullanılmaya başlanmıştır. HYT tesisleri, örnek bir yol kaplamasının devamlı trafik yükleri ile yüklenerek birkaç ay gibi görece kısa bir sürede onlarca yıllık oluşacak gerilme ve deplasmanların ölçülebildiği ve hasar tiplerinin tespit edilebildiği bir yöntemdir. Arazide veya hazırlanan tesislerde, dış faktörler, fiziki koşullar ve benzeri konular da araştırmaya dâhil edilebilmektedir [8, 9].

Yol kaplamalarının yapımını etkileyen birçok faktörün bulunması nedeniyle mekanistik çalışmaların, bölgelerin hatta şehirlerin şartlarına göre tekrar yapılması gerekmektedir. Örneğin birbirine komşu iki şehir olan Rize ile Erzurum illerinde yol kaplamasını etkileyen faktörler oldukça farklıdır. Rize ılıman bir iklime sahip ancak çok fazla yağış alan bir şehirdir. Rakım, kısa sürede deniz seviyesinden yüksek kotlara çıkar. Yerleşim dağlık araziler nedeniyle oldukça eğimlidir. Ancak nebati toprak yer yer derindir. Yatay ve düşey kurplar oldukça fazladır. Erzurum ise soğuk karasal bir iklime sahiptir. Gece gündüz arası sıcaklık farkı Rize’ye kıyasla yüksektir. Şehir, oldukça yüksek rakıma ve daha düz bir yapıya sahiptir. Nebati toprak kısmen Rize’ye göre daha azdır. Bu şartlarda iki şehrin yol kaplaması tasarımında dikkat edilecek hususlar oldukça fazla sayıda

farklılıklar içermektedir. İşte bu nedenle kaplama araştırmaları, mümkün mertebe uygulama alanlarının özelliklerine göre yapılmalıdır. Bu şekilde yapılmış araştırmalar dünyada benzer özelliklere sahip bölgelerde de yol yapımı için önem arz edecektir.

Türkiye’de en fazla beton yol ağı Doğu Karadeniz Bölgesinde bulunmakta ve bu yollar yaklaşık 30 yıldır bölgede hizmet vermektedir. Genellikle kent içi ve köy yollarında yapılmış olan bu yollar, dönemin asgari ihtiyaçlarını karşılamak için çoğunlukla genel teknik şartnameye uygun olarak yapılmamıştır. Zaman içerisinde her yol gibi bölgede bulunan beton yollar da çeşitli deformasyonlara maruz kalmıştır. Oluşan hasarlar nedeniyle yolun özellikle sürüş konforu azalmış, beton yüzeyinde sökülmeler ve derin çatlaklar tespit edilmiş, bazı kısımlarında da güvenli sürüşü engelleyebilecek tehlikeli durumlar oluşmuştur. Bu hasarlar önlem alınması ihtiyacını doğurmuştur. Bu noktada iki alternatif ortaya çıkmaktadır. Uzunluğu yaklaşık 15 bin km’nin üzerinde olan bu yolların sökülerek tekrar yapılması veya iyileştirme metotlarından biri uygulanarak bu yolların tekrar kullanılabilir hale getirilmesidir.

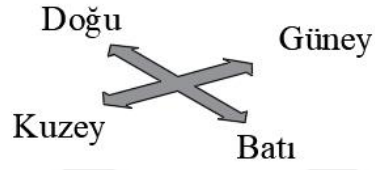
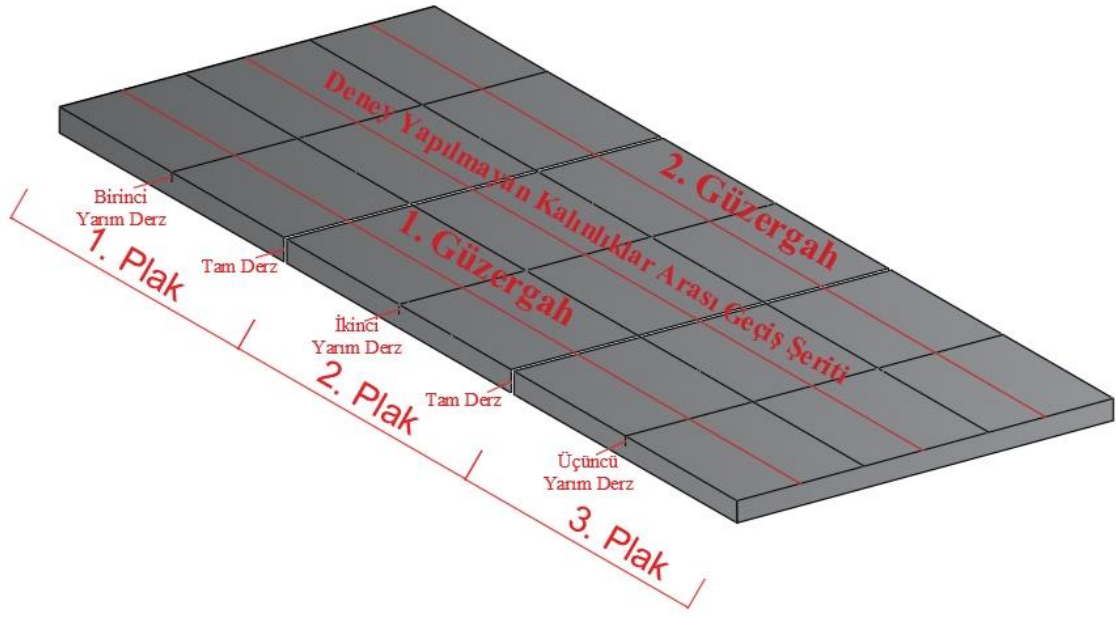
Araştırmalar, beton üzerine ince asfalt kaplama (BÜİAK) ile yapılan iyileştirme çalışmalarının ekonomik ve uzun ömürlü olduğunu göstermektedir [10-13]. Ancak BÜİAK hakkında araştırılan konularda genelde iki önemli hasar tipi üzerinde durulur ve tasarımlarda bu iki hasarın oluşumuna göre ekonomik ömür belirlenir. Bu hasarlardan birincisi yorulma çatlakları, ikincisi ise tekerlek izi oluşumlarıdır. Bu iki hasar durumu da ısıl değişmelerinden etkilenir. [14]. Tasarımın nihayetini belirleyen faktörlerin yanı sıra; beton yolun kalınlığı, derz tipi, derz genişliği, malzeme tipi, mukavemet değerleri, iklim şartları, trafik yükleri, ara yüzey elemanları, temel/alt temel özellikleri gibi faktörler, iyileştirme için kullanılacak asfalt tasarımının değişmesine neden olmaktadır. Bu nedenle bir yarı rijit (kompozit) kaplama türü olan beton üstü ince asfalt kaplama hakkında araştırılacak oldukça fazla konu ortaya çıkmaktadır. Özetle BÜİAK uygulaması yapılacak beton yolların, buldukları bölgenin şartları, trafik yük tipi ve beton yol tipine göre ince asfalt kaplama özellikleri seçilmesi gerekmektedir.

1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

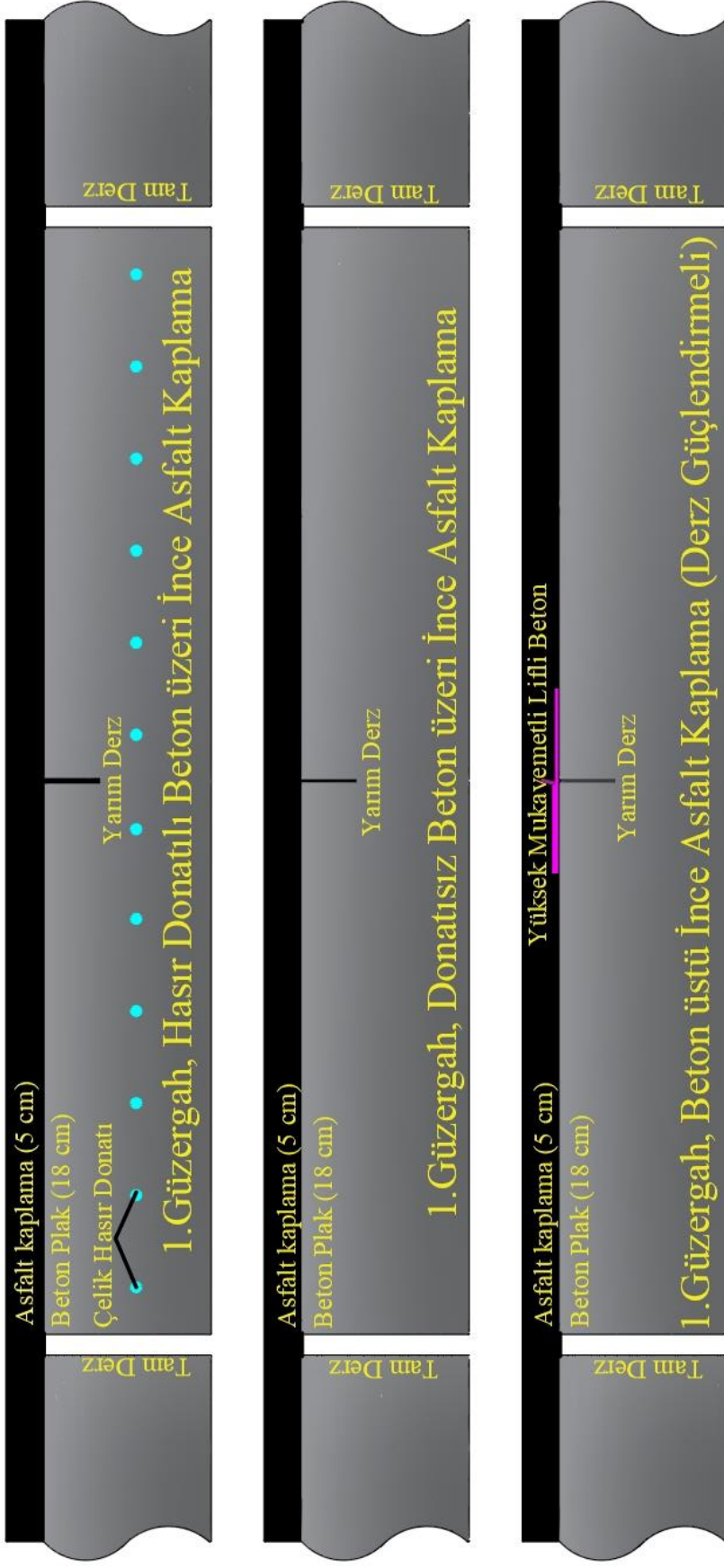
Bu alışmada, Dünya’da ve Türkiye’de uzun yıllar boyunca kullanılan veya mukavemet değerleri çeşitli nedenlerle düşük olan beton yolların iyileştirilmesi için, yapılacak ince asfalt kaplama kalınlığının HYT tesisi kullanılarak optimize edilmesi

amaçlanmıştır. Çalışma boyunca, BÜİAK kalınlığının trafik hacmi ile olan ilişkisinin belirlenmesi ana hedeflerin başında gelmiştir. Bu sayede mukavemet değerleri düşük veya uzun yıllar hizmet vermiş beton kaplamaların iyileştirilmesi araştırılmış, optimum ince asfalt kaplama kalınlığıyla yolun maliyetinin azaltılması ve ekonomik ömrünün uzatılması amacı güdülmüştür. Diğer yandan beton kaplama içerisinde hasır bulunmasının veya beton yolların yarım derz kısımları ile asfalt kaplama arasında ince ara yüzey elemanının kullanılıp kullanılmaması durumunda BÜİAK'nın ömrüne olan etkisi araştırılmıştır. Ayrıca, KTÜ'de (Karadeniz Teknik Üniversitesi) 2010 yılından beri hizmet veren HYT tesisinde oluşturmuş farklı BÜİAK kalınlıklarının yansıma/yorulma ve tekerlek izi oluşumu kriterleri ile ilgili olan ilişkileri de incelenmiştir. Son olarak HYT tesisinde elde edilen veriler, sonlu eleman metodu (SE) kullanılarak gerçeğe benzer modeller oluşturulmuştur. Bu modeller sayesinde önce gerilmeler daha sonra çatlak oluşumu ve ilerleyişi incelenmiştir. Bu çalışmadan elde edilecek sonuçların özellikle Doğu Karadeniz bölgesinde bulunan beton kaplamaların sürdürülebilirliği için ince asfalt kaplama ile iyileştirilmesi ve maddi açıdan kazanç sağlayarak uzun ömürlü ve konforlu yolların oluşturulması için gerekli bilgi birikiminin elde edilmesi hedefler arasındadır.

Bu çalışma kapsamında, Trabzon Büyükşehir Belediyesi (TRBB) tarafından bölgede kullanılan asfalt ve beton yolların ölçeklendirilmiş modelleri HYT tesisinin içerisinde inşa edilmiştir. Önce beton yol imalatı yapılmış ve bu yol uzun süre yorularak, bölgede kullanılan beton yolların modeli haline getirilmiştir. Yorulma işlemi sırasında deformasyonlar LVDT'ler (Linear Variable Differential Transducer) kullanılarak takip edilmiştir. Yorulma işleminin ardından beton yol üzerindeki çatlaklar incelenmiş ve farklı asfalt kaplama kalınlıkları ile kaplanmıştır. Kaplama yapılmış beton yollardan; birinci plak, hasır donatılı beton yol, ikinci plak derzde güçlendirme olmayan beton yol ve üçüncü plak ise yarım derz bölgesinde yüksek mukavemet değerine sahip fiber glass ile güçlendirilmiş ince ara yüzey bulunan beton yol olarak ayarlanmıştır. Bu farklı üç tip plak için farklı 2 tip kalınlık denenmiş, toplamda Şekil 1.1 ve 1.2'de görülen 6 farklı plak için sonuçlar karşılaştırılmıştır. HYT tesisinde yüklemeler yapılarak asfalt altında kalan derzler potansiyel yansıma çatlağı bölgeleri olduğundan devamlı takip edilmiştir. Kaplama tipleri ekonomik olarak da karşılaştırılarak en uygun sonucu veren kaplama tipi bulunmaya çalışılmıştır. Hızlandırılmış yol testi ile yapılan yüklemeler sayesinde plaklarda oluşan düşey deplasman ve birim şekil değiştirmeler yükleme sayısına göre takip edilmiştir.

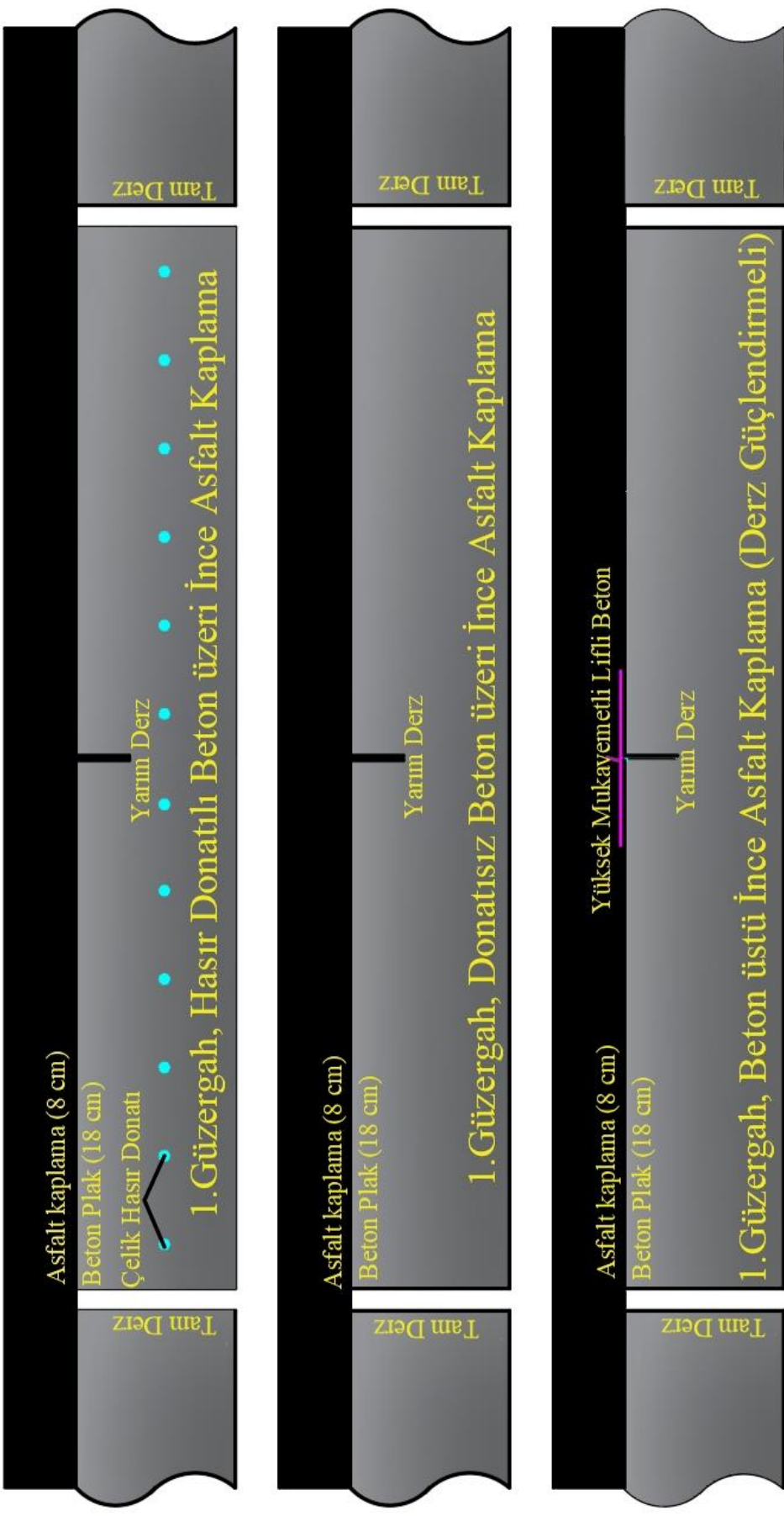


Şekil 1.1. Deneyleer için hazırlanan beton plaklar



Şekil 1.2. Deneylelerin yapıldığı kaplama modelleri. (a) Asfalt kalınlığı 5 cm (b) Asfalt kalınlığı 8 cm

Şekil 1.2'nin devamı



(b)

1.3.Çalışmanın Literatüre Katkısı

Doğu Karadeniz Bölgesi Türkiye'nin en uzun beton yol ağına sahip bölgesi olup, bu çalışmada beton yol modeli Doğu Karadeniz Bölgesinde mevcut bulunan beton yolların özelliklerine göre seçilmiştir. Bölge genel olarak yağışlı, engebeli yapıya sahiptir. Bölgede kullanılan beton yolların birçoğu köy ve belediye yollarından oluşmaktadır. Bu yollar çeşitli nedenlerle güçlü alttemel ve temel yapısına sahip değildir [15, 16]. Genellikle yarım derz ile imal edilmekte olan bu yollarda, donatılı yol çok az olup, genellikle donatısız derzli beton yollar bulunmaktadır. Donatılı olarak imal edilen beton yollarda da en sık kullanılan donatı tipi 150*150 mm. açıklıklara sahip Ø 6 hasır donatılardır.

Dünyada HYT tesislerinin elde ettikleri veriler, mekanistik-ampirik çalışmalar olarak oldukça önem arz etmektedir. Son yıllarda mekanistik-ampirik çalışmaların sayısı hızlı bir şekilde artmaktadır [17, 18]. Ancak Türkiye'de gerek HYT araştırmaları gerekse mekanistik-ampirik çalışmalar yeteri sayılara ulaşmamıştır. Ayrıca ulaşım yapıları özellikle üstyapı kısmı ile ilgili çalışmalarda değişken sayısının oldukça fazla olması (kaplamalarda, sıcaklık, malzeme, kalınlık, gradasyon, trafik yükü, ara yüzey malzemeleri, ara yapıştırıcılar, yük sıklığı vb.) çalışılacak konu sayısını fazlasıyla artırmaktadır. Bunun yanı sıra ülkelere hatta bölgelere göre farklılık gösteren iklim ve kullanılan yol malzemeleri bu araştırma sayısını daha da çok çoğaltmaktadır. Çalışılacak konu sayısının fazlalığı literatürde halen daha büyük bir boşluk oluşturmaktadır [19-21]. Dünyada HYT tesislerinin sayısının azlığı nedeniyle bu boşluk hızlı bir şekilde dolamamaktadır. Bunun yanı sıra HYT tesislerinin farklı tasarım ve özellikleri yeni farklı bilinmeyenler oluşturmaktadır. Türkiye'de tam ölçekli olarak ilk ve tek olan ve KTÜ bünyesinde bulunan HYT tesisi, kendine has özellikleri ile bölgenin ikliminde, bölgede bulunan malzemeler ile yapılan yollarda bölge ve dünya için faydalı olacak araştırmalara devam etmektedir. Bu çalışma, Türk bilim insanının da HYT tesisi kullanma tecrübesini artırmakta, böylelikle Dünya'da HYT çalışmaları hakkında literatüre Türkiye'den katkı sağlamaktadır. Bölgede veya ülke genelinde kullanılacak iyileştirme amaçlı ince asfalt kaplamalarının projesi ve teknik şartnameleri için de tecrübe ile elde edilmiş bilgiler ortaya koymaktadır. Çalışmanın bir parçası olan sonlu eleman metodu, mekanistik-ampirik verilere göre modellenmiştir. Modellerden elde edilecek veriler, benzer modelleri kurmak isteyen araştırmacılar için altyapı oluşturacaktır.

1.4. İyileştirme Yapılacak Beton Yolların Değerlendirilmesi

Beton üstü ince asfalt kaplama yapılmadan önce, mevcut beton kaplamanın durumu, performansı ve sınırları hakkında bir değerlendirme yapılmalıdır. Değerlendirme iki temel başlık altında yapılır. Bunlar; yapısal ve işlevsel (fonksiyonel) değerlendirme olarak adlandırılır. Eğer iyileştirme yapılmasına karar verilmişse, detaylı incelemeler ile beton kaplamada görülen hasarların ileride sorun yaratıp yaratmayacağı ve önlem alınması gerekip gerekmeyeceği düşünülmelidir [11]. Bu nedenle mevcut kaplama ve diğer tabakaların tespiti ve özelliklerinin incelenmesi, kaplamanın yerinde davranışının incelenmesi, kaplama türüne göre sorunlarının incelenmesi, kaplamanın yüklemeye-taşıma kapasitesinin incelenmesi ve kot farklılıkları, sürtünme katsayısı gibi diğer işlevsel aksaklıkların incelenmesi gerekmektedir [20].

Değerlendirme Şekil 1.3'te görüldüğü gibi aşamalı yapılır. Öncelikle tarihsel verilerin incelenmesi gerekir. Tarihsel veri olarak, beton yolun uygulama projesi, yapım teknik şartnameleri ve yapım sırasında veya daha sonra uygulanan deney ve sonuçlarına ulaşılır. Ayrıca servis ömrü boyunca oluşan geçmiş hasar kayıtları ve çözüm yöntemleri ile mevcut ise trafik yoğunluğu yük tipi gibi bilgiler de incelenir. Tarihsel verilerin incelemesi bittikten sonra ilk arazi gözlemlerini yapmak için yol kaplamaları incelenir. Bu noktada arazide drenaj, yüzey soyulmaları, gözle görülür çukur ve çatlaklar ve oturmalar incelenerek kayıt altına alınır. Üçüncü aşamada ise yol, ilk değerlendirme aşamalarından elde edilen verilere göre bölümlere ayrılır. Bölümler genellikle oluşan hasar tipleri ve çözüm önerilerine göre şekillendirilir. Böylelikle ileri inceleme ve çözüm önerileri için kolaylık sağlanır. Bölümlere ayrılmış yollarda artık hem işlevsel hem de yapısal değerlendirme daha kolay yapılır. Dördüncü aşamada işlevsel ve yapısal değerlendirme için ileri inceleme yani deneyler yapılır. İleri incelemede tahribatsız deneylerin öncelikle kullanılması tercih edilir. Ancak gerek görülürse numune alınması gibi yöntemler de değerlendirilir [11, 21, 22].



Şekil 1.3. İyileştirme çalışması öncesi yolun değerlendirilmesi [20].

Bu çalışmada mukavemet değeri düşük veya yorulmuş beton yollar çalışılacağından, gerek arazide gerekse HYT tesisi içerisinde bulunan beton yollar hakkında incelemeler yapılabilmesi için deformasyon türleri ile ilgili bazı bilgiler aşağıda verilmiştir. İyi tasarlanmış rijit kaplamalar uzun yıllar, plaklar arasındaki derzler konulan derz dolgu malzemelerinin yenilenmesi hariç bakım onarım ihtiyacı duymadan hizmet verebilirler [23-26]. Rijit kaplamaların mukavemet değerleri her ne kadar esnek kaplamaların değerlerine göre yüksek olsa da yapıldığı andan itibaren çeşitli nedenlerden dolayı gerilmeler ve deformasyonlar oluşabilmektedir [24, 25]. Bu deformasyonların ve gerilmelerin temel kaynakları şunlardır;

- Kötü tasarım, kötü imalat (işçilik)
- Kullanılan malzemelerde teknik yetersizlikler
- Kullanılan malzemelerin özelliklerinin iyi bilinmemesi
- Trafik yükleri (tekerlek yükleri ve lastik basınçları)
- Tekerler arası mesafe
- Teker yüklerinin plak üzerindeki konumu
- Zemin reaksiyonu
- Çevresel etkenler, donma çözülme bozulmaları
- Kimyasal bozulmalar, tuzlama çalışmaları ve diğer etkenler [27-29].

Yukarıda listede bulunan hasar türlerine maruz kalan beton yolların tasarımını yapmak oldukça zor olmaktadır. Bununla birlikte yukarıda verilen gerilme ve deformasyonların nedenleri kendi içlerinde de değişmektedir. Örneğin plağın çeşitli nedenlerden dolayı kırılması zemin desteğinin olmamasına neden olmaktadır. Gerilmelerin modellenmesinde bu zorluk betonda oluşacak deformasyonların da öngörülmesini zorlaştırmaktadır [27]. Hasar ile ilgili tetkike, sebep sonuç ilişkisi irdelemeleri ile başlanmalıdır. Probleme neden olabilecek husus veya hususlar araştırılmalıdır [29].

1.4.1. Betonun Kırılma Mekanığı

Basit kompozit davranışı göstermediği için beton, diğer kompozitlerden farklıdır [30]. Bu nedenle betonun, üç fazlı heterojen bir malzeme olduğu kabul edilir. Bu fazlar; agrega, çimento ve agrega-çimento bağlantısı (geçiş bölgesi) olarak tanımlanır. Betonda başlayan mikro çatlakların nerede ortaya çıkacağı önemlidir. Zira beton tasarımında çimento hamuru ve agrega özelliklerini değiştirebilme kabiliyetimiz daha fazla olduğundan, tasarımda genelde çimento hamurunda çatlakların oluşması istenilir. Geçiş bölgesinde çatlak oluşmadan, çimento hamurunda çatlak oluşturabilen betona yüksek performanslı beton denir [30]. Aksi durumlar, beton tasarımdan ziyade malzeme eksikliğinin veya uygulama hatalarının göstergesidir [31]. Doğu Karadeniz Bölgesi'nde daha önce alınan numunelerde agrega kırılmasına veya agrega etrafında kırılmaya yani geçiş bölgesi kırılmasına oldukça sık rastlanılmıştır [15].

1.4.2. Kaplamada Yapısal ve İşlevsel Performans Değerlendirmesi için Hasarlar

Beton üzerinde oluşan deformasyonları çeşitli şekilde sınıflandırmak mümkündür. Örneğin oluşma vaktine göre; erken evrede oluşan deformasyonlar ve zaman geçtikçe oluşan deformasyonlar şeklinde sınıflandırılabilir [32, 33]. Beton yollar, esnek kaplamalar gibi oluşan her hasarda acil bakım onarım ihtiyacı duymazlar. Hasarlar esnek kaplamada olduğu gibi hızla büyümmez. Hatta ekonomik ömrü boyunca bazı hasarların oluşması normal karşılanır ve hasarların, performans etkilerine göre değerlendirilmesi yapılır.

İyileştirme kavramı kaplamanın performansı ile alakalıdır. Kaplama performansının çeşitli hasarlar nedeniyle artık belirli limitlerin altına düştüğü dönemlerde iyileştirme

yapımı gündeme gelir [24]. Bu nedenle iyileştirme öncesi performans değerlendirmesinin de yapılabilmesi için beton yollar, yapısal hasarlar ve işlevsel hasarlar olarak incelenmelidir. Yapısal performans, tasarlanan üstyapının ömrü boyunca trafik yüklerine ve çevresel faktörlere karşı koyabilmesine denir. Bu nedenle yapısal hasar olarak genellikle yüklemelerden kaynaklı hasarlar görülür. İşlevsel performans, sürüş kalitesi, yüzey sürtünmesi, gürültü ve geometri gibi faktörlere göre ölçülen performans tipidir. Yani sürücünün belirlenen hız koşullarında konforlu ve güvenli sürüş sağlamasını irdeleyen performans tipidir. İşlevsel hasar ise, sürüş kalitesini azaltan kaplama yüzeyi bozulmalarını kapsamaktadır. Yapısal ve işlevsel hasarlar aynı sorunun kökeninden gelebilirler. Çoğu kez yapısal hasarlar, sürüş konforunu da azaltacağından işlevsel hasar da sayılabilmektedir [29]. Hasarlar arttığında yeniden yapım maliyetleri oldukça yüksek olduğundan genellikle iyileştirme tercih edilmektedir [15, 34].

Transportation Research Board tarafından hazırlanmış hızlandırılmış yol testlerinden elde edilen veriler üzerine oldukça kapsamlı raporlar mevcuttur. Raporlarda asfalt kaplamalar için başarısızlık ölçütü olarak yorulma çatlakları için 2.5 m/m^2 , tekerlek izleri için ise 1.5 cm uygun görülmekte fakat aynı raporda dünyada bu konuda kesin bir ölçütün belirlenemediği ve bu konuda geniş çaplı çalışmalara ihtiyaç duyulduğundan da bahsedilmektedir [35]. Beton üstü ince asfalt kaplamada da en üst tabaka asfalt olduğundan genellikle hasarlar asfalt tabakasında görülmektedir. Bu nedenle bu kriterler değerlendirilebilir. Ancak beton için aynı durum geçerli değildir. Beton yollar çatlaklar olmasına rağmen sağlıklı şekilde hizmet verebilmektedir. Örneğin bu çalışmada incelenen Doğu Karadeniz Bölgesinde üzerinde çeşitli nedenlerle çatlaklar olan beton yollar 30 yılı aşkın süredir hizmet vermektedir [15, 16, 36]. Bu bağlamda özellikle dingil sayısı-birim şekil değiştirme ilişkilerinin incelenmesi tavsiye edilmektedir [35, 37]. Şekil 1.4'te yapısal ve işlevsel (yüzey) bozulmaların listesi verilmektedir [38]. Bazı hasar türleri hakkında detaylı bilgiler ise aşağıda açıklanmaktadır.

Beton Yollar

İşlevsel Bozulmalar

- * Sürtünme Direnci Kaybı
- * Derz Bozulmaları
- * Alkali Silika reaksiyonu (ASR)
 - * Gürültü
 - * Sertlik
- * Plastik Büzülme
- * Isıl Büzülme
- * Uluslararası Pürüzlülük İndeksi (IRI)
- * Diğerleri

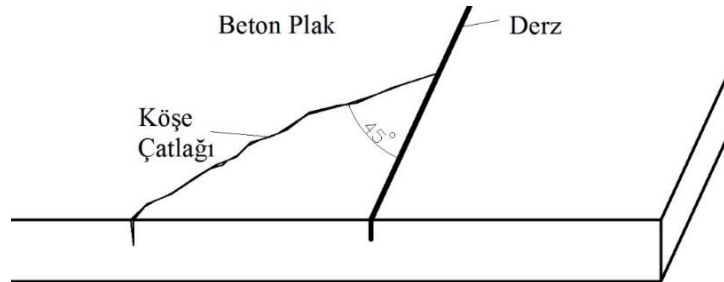
Yapısal Bozulmalar

- * Köşe Çatlakları
- * Derz Bozulmaları
- * Boyuna Çatlaklar
- * Pompalama/Faylanma
- * Malzemeyle ilgili bozulmalar (MRD)
 - * Enine Çatlaklar
- * Taban Zemin/Alt Temel Koşulları
- * Diğerleri

Şekil 1.4. Yapısal ve işlevsel (yüzeysel) hasar türleri

1.4.2.1. Köşe Çatlakları

Köşe çatlakları, Şekil 1.5'te görüldüğü gibi beton plakların köşelerine denk gelen kısımlarda, genellikle trafik yönünde ve yaklaşık 45° açı ile oluşan çatlaklardır. Çatlak genişliği 13 mm'den az olan çatlaklar hafif şiddetli olup iyileştirme için dikkate alınmamaktadır. Çatlakların genişliği 13 mm'den daha büyük olan çatlaklar ise orta ve yüksek şiddetli kabul edildiğinden iyileştirme ihtiyacı görülmektedir [23]. Bu çatlaklar yük altında göçmeler şeklinde oluşmakta ve genellikle kaplama veya alt tabakaların eskiliği, aşırı tekrarlı yükleme ve çeşitli nedenlerle üstyapıda kaplama altında boşalmalardan kaynaklanmaktadır. Söz konusu çatlaklara homojen, yeterli mesnetlenmenin sağlandığı, tekrarlı yük-kalınlık tasarımın dikkate alındığı yollarda rastlanma ihtimali oldukça düşüktür [29].



Şekil 1.5. Köşe çatlağı görünümü

1.4.2.2. Enine Çatlaklar

Enine çatlaklar, beton kaplamalarda çok sık rastlanan bir çatlak türü olmasına rağmen, yapısal performans açısından etkisi ilk oluştuğu dönemde az hissedilir. Zamanla önlem alınmazsa faylanma ve pompaj gibi etkiler ile birleşerek yapısal hasarı artırarak performansı etkiler. Ayrıca enine çatlaklar sürüş konforunu (ses ve sarsıntı) azaltacak boyuta geldiğinde işlevsel performans açısından da değerlendirilmesi gerekir. Enine çatlakların çok çeşitli nedenleri olabilir. Aşırı yüklenme, yetersiz derz, derzlerde yük iletiminde eksiklik, homojen olmayan temel, hacimsel değişiklikler, çeşitli nedenlerden dolayı plakta oluşan gerilmeler (kıvrılma, yamulma vb.) bu nedenlerden bazılarıdır [29].

1.4.2.3. Boyuna Çatlaklar

Boyuna çatlaklar, Şekil 1.6 ve 1.7’de görüldüğü gibi trafik boyunca oluşan derzlere dik çatlaklardır. Boyuna çatlaklar dar olmaları durumunda yapısal performansı fazla etkilemezler. Ancak çatlak genişlemeye devam ediyorsa veya genişlik belirli bir seviyeye ulaşmışsa (13 mm ve üstü) değerlendirilmelidir [23]. Özellikle çatlak nedeni iyi araştırılmalıdır. Aksi halde Şekil 1.7’de görüldüğü gibi ince asfalt kaplama gibi iyileştirme tabakalarında yorulma çatlağı olarak görülebilir ve iyileştirme tabakasının ömrünü kısaltabilir. Boyuna çatlaklar da enine çatlaklar gibi birçok nedenden kaynaklanabilir. Donmadan kaynaklı kabarmalar, zeminin şişmesi, iyi sıkışmaması veya homojen yapıda olmaması boyuna çatlaklara neden olabilir. Ayrıca geniş yollarda yeterli boyuna derz yapılmaması veya boyuna derzlerin donatı ile aşırı güçlü yapılması boyuna çatlaklara neden olabilir [29].



Şekil 1.6. Trabzon Bulak Mah. 30 yıldır kullanılan beton yolda boyuna çatlaklar



Şekil 1.7. Trabzon İli Çaykara İlçesi Taşören Mahallesi eski beton üzerine yapılan asfalt kaplamada boyuna çatlak oluşumu

1.4.2.4. Parçalanmış Plaklar

Enine ve boyuna çeşitli çatlakların Şekil 1.8’de görüldüğü gibi beraber görüldüğü ve bu nedenle beton plağın birkaç parçaya ayrıldığı hasar tipidir. Bu hasar tipinin birçok nedeni vardır. Ancak en sık görülenler aşırı yükleme veya plak kalınlığının yetersiz olmasından dolayı oluşan yorulma çatlaklarıdır.



Şekil 1.8. Trabzon Çilekli Mahallesi, ince beton kaplamada parçalanmış plak hasarı

1.4.2.5. Durabilite Çatlakları ve Konforsuzluğa Neden Olan Bozulmalar

Beton yolun hizmet hayatı boyunca kalıcı ve dayanıklı olması istenilir. Ancak tasarımsal olmayan genelde seçilen malzemelerde oluşan olumsuzluklar gibi nedenlerden dolayı beton kaplamalarda özellikle yüzeylerde çatlaklar ve soyulmalar oluşmaktadır. Bu tarz hasarlara örnek olarak agrega durabilitesinden kaynaklı alkali-silika reaksiyonu, agregaların dona karşı hassasiyeti (D çatlama) gibi nedenler veya agreganın cilalanması,

dokulanması örnek olarak verilebilir. Bu hasarların neredeyse tamamı işlevsel hasar olup, genelde yapısal performansta azalmaya neden olmazlar. Durabilite çatlaklarında parçalar 0.1 m^2 bölümlere ayrıldıysa önlem alınması gerekmektedir. Daha erken sürelerde de önlem alınabilir ancak en geç 0.1 m^2 parçalara ayrılmasına kadar beklenmesi gerekir [23, 29].

1.4.3. Oluşum Nedenlerine Göre Hasarlar

Yukarıda verilen hasar sınıflandırılmasının dışında bir diğer sınıflandırma türü de oluşum nedenlerine göre sınıflandırmadır. Buna göre beton kaplamalarda oluşan hasarlar aşağıda sıralanmıştır.

1.4.3.1. Büzülme Çatlakları

Isı ve nem farklılıkları nedeniyle beton plaklar büzülmetedir. Bu büzülme çeşitli nedenlerden dolayı engellendiğinde gerilmeler oluşmakta, bu gerilmeler büzülme çatlaklarına neden olmaktadır. Beton plakların büzülmesini engelleyen faktörler çeşitli nedenlerden kaynaklanabilir. En sık rastlanan engeller şunlardır;

- Alttemelin daha rijit olması ve plak ile beraber hareket etmemesi
- Zemin sürtünmesinden oluşan kuvvetin yüksek olup plağı tutması
- Yeterli uzunluklarda derz bırakılmaması (Yüksek plak boyu/eni)
- Betonun ağır olması ve oluşan gerilmelerin bu ağırlık nedeniyle esneme yapamaması
- Beton kürünün yeterli veya doğru yapılamaması
- Beton kalınlığının fazla olması ve bu nedenle beton iç ısısının dış yüzeye göre çok olması
- Büzülmenin engellenmesi için bırakılan derzlerin yeterli kesilmemesi veya aşırı donatı ile genişleme hareketinin engellenmesi [23, 27].

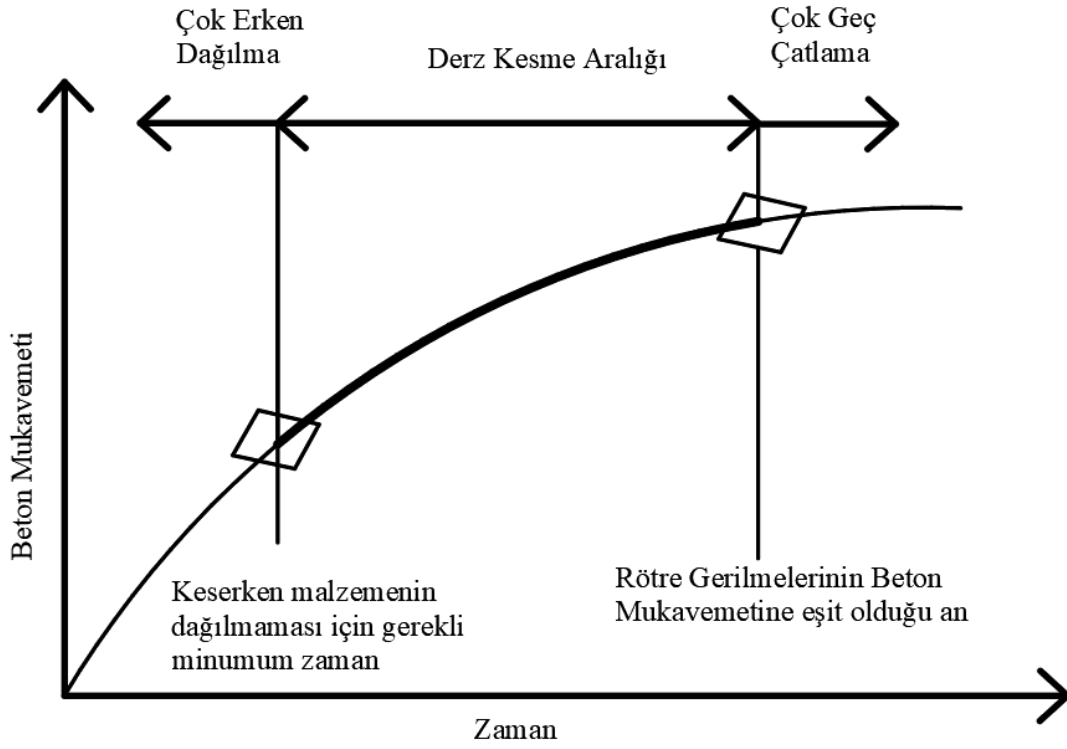
1.4.3.2. Erken Oluşan Çatlaklar

Beton priz almadan önce oluşan çatlaklara erken oluşan çatlaklar denir. Bu çatlaklara birçok etmenin karışık halde neden olması ve denetim altında tutulması fazlasıyla zor olduğundan, önlenmesi için tedbirlere uyulması oldukça önemlidir. Bu çatlaklar belirli

yerlerde değil, plağın her yerinde görülebileceği için denetim dışı çatlaklar veya rastgele çatlaklar olarak da adlandırılır [39]. Bu çatlak tipi iki alt başlık altında toplanır. Birincisi plastik-büzülme çatlakları, ikincisi ise kılcal çatlaklar olarak geçmektedir. Benzer çatlaklar bu çalışma kapsamında HYT tesisinde bulunan betonlarda da görülmüştür.

Plastik büzülme çatlakları, genellikle plak yüzeyinde oluşan derin olmayan, rastgele ve çoğunlukla kısa çatlaklardır. Beton dökümü sırasında plağın üst kotlarından suyun bir sebeple ortamdaki ayrılmasından kaynaklanır. Su, yüksek sıcaklık, rüzgâr, beton ısısının çok olması, su oranının az olması ve kürün yapılmaması (veya eksik yapılması), betonun altında bulunan temel veya zeminin beton suyunu çekmesi gibi nedenlerden dolayı ortamdaki uzaklaşabilir. Suyun plak üst kotlarında ortamdaki ayrılması gerilmelere neden olmakta ve plağın diğer kısımlarının bu gerilmeleri engellemesi ile çatlaklar oluşmaktadır. Bu çatlakların oluşumunu önlemek için, beton dökülmeden önce zeminin ıslatılması, beton plağın rüzgârdan veya güneşten korunması, agrega ve karışım suyunun soğuk tercih edilmesi, kürün yeterli yapılması gibi yöntemler kullanılabilir. Kılcal çatlaklar da beton yüzeyinde oluşan derin olmayan çatlaklardır. Oldukça ince olduklarından seçilmeleri zordur. Düzensiz ve petek şeklinde oluşur. Kılcal çatlaklar, plastik büzülme çatlaklarından daha sonra (genellikle beton mukavemet kazanırken) oluşurlar. İki çatlak tipinin de oluşma nedeni aynıdır. Bunun yanı sıra ani sıcaklık değişimleri bu çatlakların nedenlerinden biridir. Bu çatlaklara maruz kalmamak için betonu kür ederken kür suyunun betondan 11 ° C sıcaklık farkı olmamasına dikkat edilmelidir. Beton hızlı mukavemet kazanacaksa çok sık ıslanma/kurumaya maruz bırakılmamalıdır. Betonun perdelanması çok yaş dönemlerde yapılmamalı ve agrega çok tozlu kullanılmamalıdır. [23, 27].

Yukarıda verilen nedenler dışında erken oluşan çatlaklara neden olan başka etkenlerde bulunur. Bu etkenlerden en önemlisi derz kesimleridir. Hem enine hem boyuna derz kesimleri çatlak oluşumuna müsait zayıf bölgeler oluşturur. Derzler ayrıca kesilme zamanı ile çatlak oluşumunu etkilerler. Derzlerin kesimi, minimum dayanıma ulaşma zamanı ile rötre kısıtlamalarından kaynaklanan gerilmelerin beton mukavemetine eşit olduğu ana kadar kesilmelidir. Bu zaman aralığına Şekil 1.9'da bulunan grafikte görüldüğü üzere kesme penceresi denilir. Çok erken derz kesmek sıklıkla, çok geç kesilmesi ise kontrolsüz çatlakların oluşmasına neden olabilir. Ayrıca derz kesiminin zaman aralığı, hava koşulları, beton karışım tasarımı, agrega boyutu ve sertliği, bıçak tipi ve boyutu, kürlenme gibi etkenlere bağlı olarak değişebilir [40].



Şekil 1.9. Derz kesme zaman aralığı [40].

1.4.3.3. Büzülmeye Bağlı Olmayan Çatlaklar

Bu çatlaklar yol yapısından kaynaklı hasarlar olarak değerlendirilir. Bu çatlakların en sık rastlanılan nedenleri şunlardır;

- Alttemelde beklenmeyen oturmalar boşalmalar veya kaymalar. Özellikle su drenajının iyi olmadığı alttemelerde rastlanılan bir durumdur. (Şekil 1.10)
- Zeminin şişme veya dona karşı dayanıksızlığının tasarım kriteri olarak değerlendirilmemesi.
- Yeraltı sulardan veya başka kaynaklardan zemine veya plağa etki eden sülfat etkisi.
- Derzlerin yeterli yapılmaması veya derz bölgelerinde dolgu malzemesinin dışarı çıkarak zamanla bu alanlardan dışarıya ince taneli alttemel malzemesinin çıkması (Pompaj hasarı)
- Beklenmeyen darbe yükleri. (Kaya düşmesi Şekil 1.11)
- Betonun 28 günlük prizi beklenmeden aşırı veya ağır yüklenmesi [23].



Şekil 1.10. Dernekpazarı Zincirlitaş Mah. alttemelde drenaj eksikliği nedeniyle kaymalar



Şekil 1.11. Trabzon Çaykara İlçesi Uzungöl mahallesinde yola düşen kayalar

1.4.3.4. Yüzeyde Oluşan Hasarlar

Beton plakların yüzeyinde oluşan hasarların bir kısmının nedeni yukarıda verilen çatlakların oluşma nedenleri ile aynıdır. Bunun yanı sıra tasarımsal sıkıntılar özellikle agrega tipinin yanlış seçilmesi, dozaj yetersizliği, karbonatlaşma, segregasyon veya beton mukavemetinin düşük olması gibi durumlar da yine yüzeyde oluşan hasarların temel nedenlerindedir. Bu hasarlar, betonun mukavemetini düşürdüğü gibi, yüzeyde konforsuz sürüşe (sarsıntılı ve sesli) hatta kazalara neden olabilecek emniyet sıkıntılarında neden olmaktadır.

Kayma direncinde azalmalar:

Beton plakların yüzeyleri, trafik yükleri etkisiyle zamanla aşınmaktadır. Düşen kayma direnci yol emniyetini de etkilemektedir. Bu nedenle dikkate alınması gerekmektedir. İmalat yapılmadan önce, agreganın cilalanma direnci yüksek olmalı, köşeli biçimli taş kullanılmalı, mümkün mertebe agrega çapı büyük seçilmeli, aşınmaya karşı durabilitesi yüksek agrega seçilmeli ve yeterli dozaj kullanılmalı hususlarına dikkat edilmelidir [23].

Talaşlanmalar:

Beton yapımı sırasında, karışımda bulunan malzemelerden kalın olanları çeşitli nedenlerden dolayı dibe çökebilir. Kalan ince agrega, çimento ve su ise en üste kalır. Bu durum beton yüzeyinde ince ve aşınmaya karşı güçsüz bir tabaka oluşmasına neden olur. Bu tabaka, trafik yükleri ile birlikte aşınmaya maruz kaldığında, plaktan tozlar sökülme ve bu tozlanmaya talaşlanma denilmektedir. Beton yol yapımı sırasında, plaklarda çok fazla işlem yapmak, vibrasyonu fazla kullanmak, aşırı sulu çimento kullanmak bu sıkıntının temel nedenleridir [23].

Soyulmalar:

Zamanla beton içerisine giren suyun donma çözülme sırasında oluşturacağı basınç ve çekme kuvvetleri çimento hamuru ile agrega arasındaki bağı zayıflatmakta ve özellikle kaba agregaların ayrılmasına neden olmaktadır. Bu olaya soyulma denilmektedir. Eğer yeterince hava sürüklenmesi sağlanırsa (Hava sürükleyici katkı malzemeleri ile) betonda oluşacak donma çözülme gerilmeleri azaltılır. Betonun geçirgen olması, çeşitli nedenlerden dolayı çatlaklar oluşması, donma çözülmenin sık rastlandığı yerlerde olması gibi nedenler soyulmayı etkiler [23].

Yassı Harç Oluşumu:

Beton yollarda genellikle iri agrega kullanılması tavsiye edilir. Ancak iri agregaların yüzeye yakın yerde olması durumunda üzerinde bulunan, su çimento ve ince agrega karışımları ince yassı bir harç oluşturur. Bu yassı harç kısa sürede koparak minik çukurların oluşmasına neden olur. Bu çukurlar başka hasarlarında başlangıç nedeni olabilir. Yassı harç engellemek için kaba agregaların plak içerisinde homojen dağılması sağlanmalıdır. Ayrıca yassı agregalar yassı harç oluşumuna oldukça müsaittir. Bu nedenle Şekil 1.12’de görülen yassı agrega kullanılmasından da kaçınılmalıdır. [23]



Şekil 1.12. Trabzon İlinde beton yollardan alınan numunelerde görülen yassı agrega

Kabarcıklar:

Beton karışımı hazırlanırken, gradasyon ve çimento doz miktarı iyi ayarlanmamışsa boşluklar oluşur. Bu boşluklar betonun yola uygulanması sırasında yüzeye yakın yerlerde hava veya viskoz su olarak hapsolabilir. Daha ileri dönemlerde bu boşluklar tamiri zor güçsüz alanlar oluşturabilir. Eğer gerekli önlemler alınmamışsa trafik yüklemeleri sırasında bu boşluklar parçalanarak derin boşluklar hatta birleşerek çukurlar oluşturabilir.

Malzemenin aşırı yüksek slampli olmaması, iyi dozaj ve gradasyon kullanılması, çok fazla vibrasyondan kaçınılması gibi yöntemler ile bu hasar tipi engellenebilir [23].

Çukurlar:

Yukarıda verilen nedenlerden herhangi birinden kaynaklanan çukurlar zamanla büyüyerek 6 ile 100 mm arasında daha büyük konik çukurlara dönüşebilmektedir. Bu çukurlar genellikle fiziksel veya kimyasal nedenlerden dolayı oluşabilir. Çukurlar eğer önlem alınmamışsa, etrafındaki kaba agreganın trafik yükü nedeniyle kopmasıyla sürekli artmaktadır. Fiziksel veya kimyasal nedenler genellikle içsel basıncı artırmakta bu da agregaların kopmasını sağlamaktadır. Beton mukavemetinin yüksek tutulması, iyi kür yapılması, su/çimento oranının uygun alınması çukur oluşumunu önemli düzeyde engellemektedir [23].

Yüzeyde drenaj problemi (su birikintileri):

Yol kaplamalarında su kalmaması için minimum %2 oranında verilen enine eğim, çeşitli nedenlerden, özellikle işçilik hatalarından, verilemez ise su yüzeyde birikmektedir. Ayrıca zamanla oluşan oturmalar veya yukarıda nedenleri verilen çukur hasarları da yüzeyde su kalmasına neden olmaktadır. Su tekerlek ile beton plağın arasına bir film şeridi gibi girmekte ve tekerleğin sürtünmesini azaltarak emniyetsiz sürüşe neden olmaktadır. Bu olaya hidroplaning denir [41]. Yukarıda verilen yüzey hasarlarının birçoğu hidroplaning etkisini artırmaktadır. Özellikle Doğu Karadeniz Bölgesi gibi Türkiye'nin en fazla yağış alan bölgelerinde beton yol kaplama tasarımında bu etki göz önüne alınmalıdır. Hidroplaning etkisini azaltmak için hassas işçilik ile %2 enine eğim iyi yapılmalıdır. Düşey ve yatay kurplarda enine eğimin değişimleri dikkatlice verilmelidir. Beton dökümü sırasında kalıpların oynatılmaması gerekmektedir. Dikkatlice perdahlama yapılmalı ve vibrasyon ile oluşan segregasyona dikkat edilmelidir.

1.5. Doğu Karadeniz Bölgesi Genel Özellikleri ve Bölgede Yolların Durumu

Bu araştırma kapsamında, Doğu Karadeniz Bölgesinde bulunan beton yollar (Rize ve Trabzon İllerinde) model olarak seçilmiştir. Çalışmaya ait verilerin daha iyi analiz edilebilmesi için bölgenin ve bölgede bulunan beton yolların özelliklerinin incelenmesine gerek görülmüştür. Arazi incelemelerinde bölgede 20-30 yılı aşkın süredir hizmet veren beton yollarda ciddi hasarlar tespit edilmiştir. Şekil 1.13-1.16'da verilen örneklerde

görülebileceği gibi beton yollarda iyileştirme çalışmalarının yapılmasının faydalı olacağı tespit edilmiştir.



Şekil 1.13. Of Kavakpınar Mah. cilalanma nedeniyle emniyetsiz sürüşe neden olan yol



Şekil 1.14. Of İlçesi, yağışlarda drenaj eksikliği ve hidroplaning



Şekil 1.15. Beşikdüzü, Aksaklı Mah. Yolda boyuna çatlaklar, soyulmalar, talaşlanmalar



Şekil 1.16. Ortahisar Kavala Mah. parçalanmış plak, enine ve boyuna çatlaklar

Beton yolların durumunu daha net anlayabilmek için daha önceki çalışmalarda Şekil 1.17-1.19'da görüleceği gibi numuneler alınmıştır. Trabzon ve Rize İllerinden alınan beton ve BÜİAK numunelerinin laboratuvarda özellikleri incelenmiş ve basınç dayanım testine

sokulmuştur. Sonuçlar irdelendiğinde; beton mukavemetinin düşük olduğu, yanlış imalatlar yapıldığı, malzeme seçiminin kötü olduğu gibi sonuçlara ulaşılmıştır. Yapılan beton ve ince asfalt kaplamaların belirli bir standart dâhilinde değil, genellikle dönemin asgari ihtiyacını gidermek için projersiz ve şartname olmadan yapıldığı tespit edilmiştir. Beton kaplamalar genellikle 12 cm ile 25 cm arasında değişken kalınlıklara sahiptir. Özellikle son 15-20 yıldır yapılan yollar 18 cm ve üstü olduğundan deneylerde kullanılan beton yol kalınlığı 18 cm alınmıştır. Bölgede devletin malzeme yardımı yaparak vatandaşın işçiliğini yaptığı yollarda mukavemet değerleri oldukça düşüktür (Özellikle 1995 öncesi imal edilen yollar). Ancak devletin veya yüklenici firmanın işçilik yaptığı yollardan alınan numunelerde genellikle C 20/25 beton basınç dayanımı tespit edilmiştir [15, 42].



Şekil 1.17. Rize İli İyidere İlçesi Denizgören Köyünden alınan BÜİAK numuneleri



Şekil 1.18. Trabzon İlinden alınan beton numuneler



Şekil 1.19. Rize İlinden alınan BÜİAK numuneler

Doğu Karadeniz Bölgesi, Türkiye'nin en çok yağış alan bölgesidir. Yağış miktarı bazı kesimlerde yılda 2000-2500 mm civarında olmaktadır [43]. Bu durum sık sık drenaj yapıları eksiklikleri nedeniyle yollarda hasarların oluşmasına sebebiyet vermektedir. Şekil 1.20 ve 1.21'de görüldüğü gibi beton plak alt tabakalarına veya beton ile asphalt arasına giren su, kaplamaların kısa zamanda zarar görmesine neden olmaktadır. Doğu Karadeniz Bölgesinde yerleşim ve nüfus dağınıktır. Topografyanın sert oluşu, tarım arazisinin azlığı yerleşim yerinin dağınıklığıyla beraber yüksek eğime sahip, düşey ve yatay kurpların çok fazla olduğu yolların yapılmasına neden olmuştur [44]. Türkiye'nin en uzun yol ağına sahip bölge Doğu Karadeniz Bölgesidir. Rize ili km² başına Trabzon ili ise nüfus başına en uzun yol ağına sahip illerdir [45]. Bu durum yollara ayrılan bütçenin yetersiz kalmasına dolayısıyla eksik bakım onarım çalışmalarına neden olmaktadır. İyi derece bakım onarım görmeyen yollarda bir süre sonra kalıcı hasarlar oluşmaktadır. Topografik yapı ve yağış çok sık heyelan ve yüzey akmaları ile yollarda hasar oluşumunu hızlandırmaktadır. Afet ve Acil Durum Müdürlüğü (AFAD) tarafından yağış ve topografik yapı nedeniyle sadece Trabzon ilinde ulaşım yapılarında tespit edilen 5 yıllık (2010-2015 yılları) hasar tutarı 78,560,015.87 TL'dir. Bu meblağ, büyük sayılmayan yerel birkaç noktada oluşmuş hasarları kapsamamaktadır [46].

Doğu Karadeniz Bölgesi köy ve belediye yollarında sanat yapıları, alttemel ve temel yetersizlikleri bulunmaktadır. Yol ağının çok uzun olması ancak ayrılan bütçelerin yol kilometresi yerine birim nüfus üzerinden ayrılıyor olması bu durumun en önemli nedenlerindedir. Ayrıca drenaj yapıları, heyelan malzemeleri veya bitkiler tarafından

devamlı tıkanmaktadır. Bölgede fındık, çay tarımı ve orman kesimleri yapılmaktadır. Tarımsal ürünler ve orman emvalinin taşınması bölgedeki köy ve belediye yolları üzerinden gerçekleştirilmektedir. Bu taşıma işlemleri ağır tonajlı araçlar ile yapılmaktadır. Doğu Karadeniz Bölgesinde köy ve mahalle yolları hakkında çeşitli örnekler Şekil 1.20-1.25 olarak aşağıya eklenmiştir.



Şekil 1.20. Of ilçesinde yol altında su nedeniyle oluşan akma ve boşalan yol kaplamasının kopması. Temel ve alttemel eksikliği ve suyun doğru tahliye edilmemesi ile oluşan hasar



Şekil 1.21. Vakfikebir, Şenocak Mah. dolan yol kenarı hendeği yüzünden, 2-3 cm kalınlığında yapılmış BÜİAK plakları arasına giren su ve yolda yaşanan kopmalar



Şekil 1.22. Trabzon Şalpazarı İlçesi, Çarlaklı Mah. beton yolu en az 20 sene önce inşa edilmiş ancak ağır taşıt yükü ve hatalı tasarım nedeniyle oluşan parçalanmış plak



Şekil 1.23. Rize İyidere İlçesi, Denizgören köy yolu, Beton üstü ince asfalt kaplamada yorulma (yansıma) çatlakları ve asfaltın çok ince olduğu yerlerde yük ve çevre etkisi ile kopmalar



Şekil 1.24 Beşikdüzü İlçesi, Akköse Mah. BÜİAK’da yorulma çatlakları

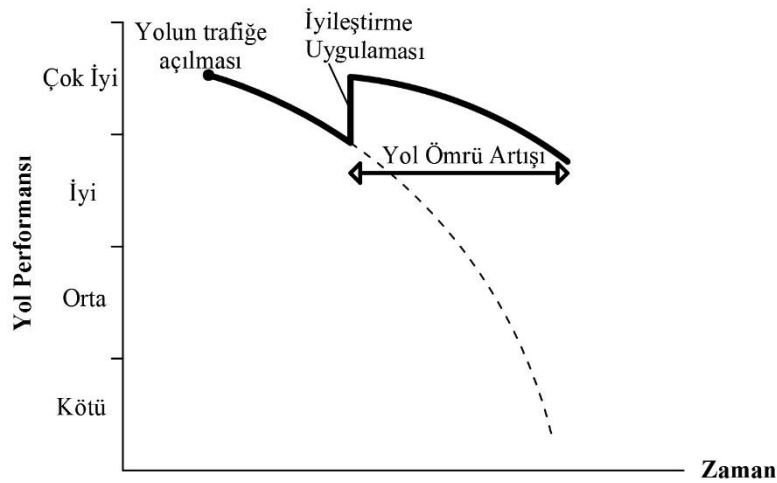


Şekil 1.25. İyidere Kalecik Köyü, işçiliği vatandaşlar tarafından yapılan, en az 25 yıldır hizmet veren, tasarımda kırılmamış (pürüzsüz) ve iri agrega oranı yüksek olarak üretilmiş beton yol

1.6. Beton Yollar Üzerine Yapılan İyileştirme Kaplamaları

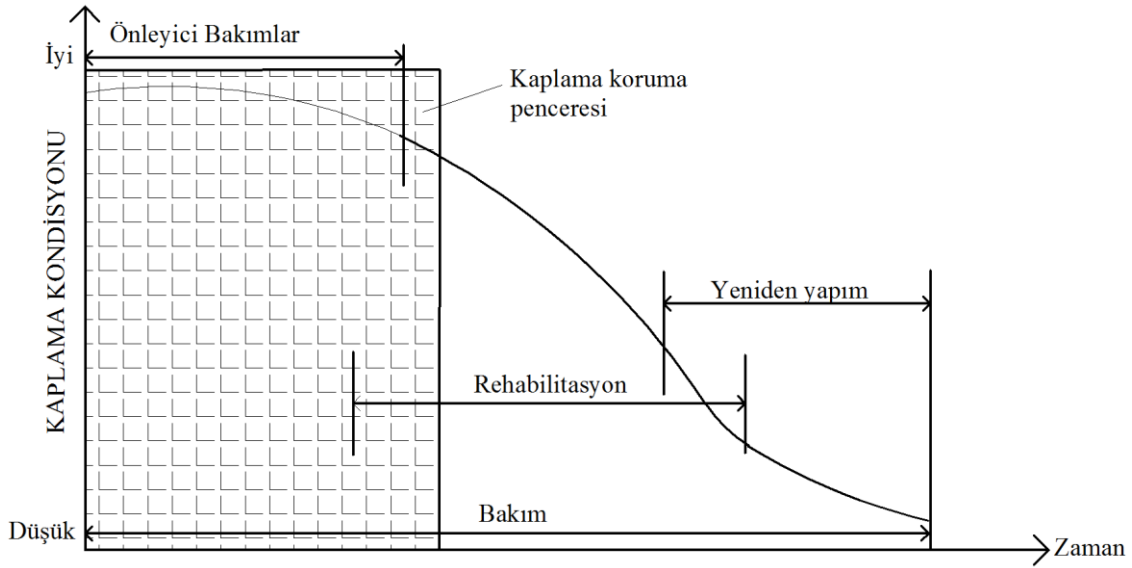
Beton yolda çatlakların, yukarıda detaylı anlatıldığı gibi yorulma, ısıl etkiler, yüzeysel gerilmeler, alt tabakalarda yeterli destek alınamaması (kötü drenaj, taşıma gücünün yetersiz olduğu tasarımlar, oturmalar) ve çeşitli süreksizliklerden (eski çatlaklar ve derzler) kaynaklı olduğu görülmektedir [47]. Oluşan bozulmaların artması durumunda ve zamanında müdahale edilmediğinde yol kaplamasının tamamında (temel ve alttemel dâhil) çok masraflı imalatlarla yeniden yapımı gerekmektedir. Oysa zamanında bakım ve gerekli görüldüğü yerlerde iyileştirme çalışmaları, yol bozulmalarını tamir eder ve yolun

performansını tekrar artırır [20]. FHWA (Federal Highway Administration) tarafından beton üstü asfalt kaplama ile yapılan iyileştirme ile ilgili yayınlanan rehber raporunda yol kaplamalarının iyileştirilmesi, yolun sürüş konforunun iyileştirilerek yapısal ve işlevsel ömrünün uzatılması olarak tanımlanmıştır [11, 20]. İyileştirme kavramı yolun korunması kavramını da kapsamaktadır. Korunma kavramı ise alınan önlemleri içermektedir. Koruma uzun vadede yapılan bir program olup, hasar görmüş veya sürüş konforunda azalmalar başlamış yollarda uygulanmasında sorun giderici bir özelliği yoktur. İyileştirmede ise yeni bir imalat yapılmaktadır [48]. Beton yollar ilk yapıldığı andan itibaren hasar oluşabilecek kaplama türleridir. Bu hasarlar belirli bir seviyeye geldiğinde yapısal ve işlevsel değerlendirmeler yapılır. Bu değerlendirmeye göre beton yolların yeniden yapılması veya iyileştirme yöntemleri ile tekrar kullanılabilir hale getirilmesi gündeme gelir. Yeniden yapım birkaç nedenden dolayı tercih edilmez. Birinci neden, eski kaplamanın kaldırılarak genellikle depo alanlarına atıl hale getirilmesidir. Bu durum sürdürülebilirlik ilkesi gereği, gelecek nesillere kaynakların korunmasına aykırıdır [49]. İkincisi ise yeniden yapım maliyetinin oldukça yüksek olmasıdır [15, 32]. Yeniden yapım maliyeti, eski betonun sökülmesi, taşınması, hasar oluşturan nedenlerin incelenmesi, önlemlerin alınması ve yeni betonun yapılmasını içerir. İyileştirme yöntemleri aslında yeniden yapım metotlarının ucuz ve kolay uygulanabilir bir alternatifidir. Şekil 1.26'da görüleceği gibi iyileştirme ile yol yeniden yapılmış gibi performansı artmakta, zamanında yapıldığında düşük maliyetli olmakta ve en önemlisi yolun performansında gerçekleşen azalma daha uzun vadede oluşmaktadır [50, 51].



Şekil 1.26. İyileştirme ile yol ömrünün uzatılması [48].

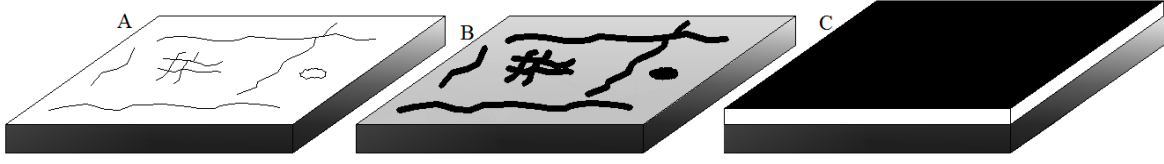
Yıllar içerisinde belirli bozulmalara uğrayan beton yolların günümüzde iyileştirme yöntemleri uygulanarak ekonomik ömrü uzatılmaktadır. Şekil 1.27’de kaplamanın performansının iyileştirme ile uzatılması anlatılmaktadır. Şekle göre iyileştirme çalışmaları, yeniden yapım çalışmalarını ertelemekte ve yolun kondisyonunu iyi durumda tutmaktadır [11, 52]. Birçok uygulamada beton yolların iyileştirme amaçlı üzerinin kaplanması, 30 yılı aşkın sürelerde hizmet süresini artırmaktadır [38].



Şekil 1.27. Kaplamanın iyileştirilmesi için gerekli şartlar [52].

1.6.1. İyileştirme Kaplaması Uygulaması Öncesi Yapılan Tamir

İyileştirme öncesi yapılan tamir işleri, yapılan iyileştirme çalışmalarının ömrünü 5-30 yıl arası uzatmaktadır [10, 11]. Aksi halde zeminin plağı desteklememesi, plaklar arası yük aktarımının yetersiz olması, çatlakların artması, oturmanın devamı, drenaj problemleri ve benzeri birçok problem, ince asfalt kaplama yapıldıktan sonra da devam ederek iyileştirme tabakasının istenildiği kadar uzun ömürlü olmasını engellemektedir. Bu nedenle dünya üzerinde bazı tamir metotları uygulanmaktadır. Beton yollarda oluşan çatlakları sızdırmaz hale getirmek, çatlakların büyümesini engellemek, oluşan oturmaları doldurmak ve modifiyeli/modifiyesiz ince asfalt veya benzeri malzemeler ile ara tabaka yapmak bakım onarım türleri arasındadır [11, 53]. Şekil 1.28’de basit olarak iyileştirme çalışmasının nasıl yapıldığı anlatılmaktadır. Buna göre ilk önce değerlendirme sonra tamir ve en son iyileştirme kaplaması yapılması sırası izlenmektedir.

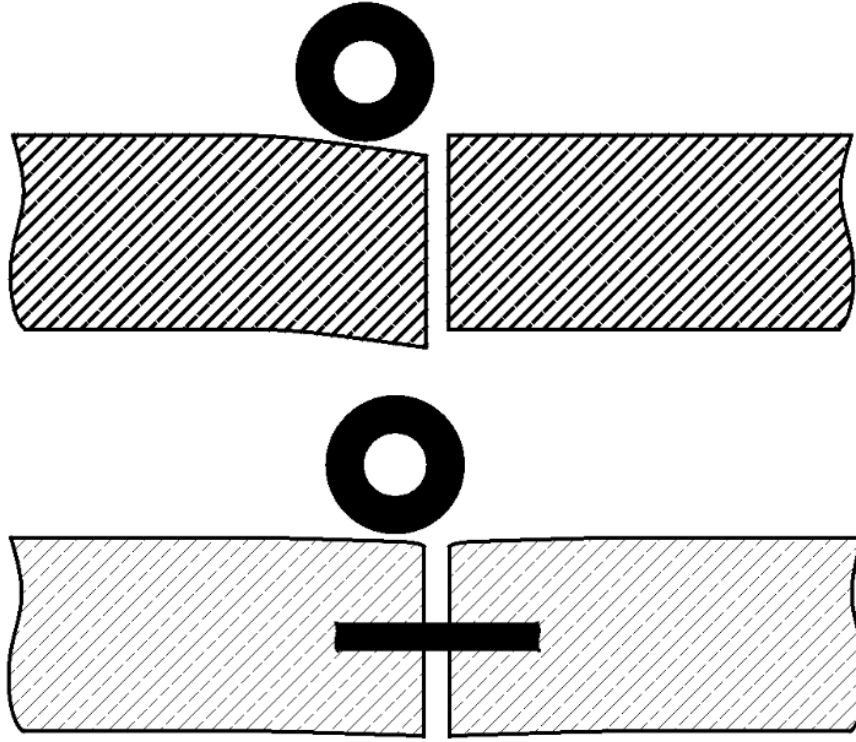


Şekil 1.28. (A) Plak üstünde enine boyuna çatlaklar ve çukurlar tespiti (B)tespit edilen hasarlar tamiri (C)kaplama ile iyileştirme

İyileştirme kaplaması yapılmadan önce en sık tercih edilen tamir yöntemleri şunlardır;

- Beton plak altının desteklenmesi: Kötü yük aktarımları, pompaj, su nedeniyle alt temelde akmalar ve tahmin edilmeyen oturmalar nedeniyle beton plak altında tehlikeli boyutlarda boşluklar oluşabilir [54]. Özellikle oluşan boşlukların veya ileride oluşabilecek daha büyük boşlukların önüne geçilmesi için yapılmalıdır. Beton plak altına “Slab Jacking” adı ile de bilinen basınçlı beton püskürtülerek plak kaldırılması ile çözüm üretilebilir [55].
- Lokal plak tamiri: Bazı durumlarda, plakların belirli bölgesinde fazla gerilmeler oluşur. Bu gerilmeler neticesinde yoğun çatlaklar veya çukurlar oluşabilir. Bu durumda yüzeysel beton plak tamiri veya derin beton plak tamiri yapılması gerekmektedir. Yüzeysel yapılan çalışma yama çalışması diye de adlandırılır. Bu tamir türünde genellikle beton veya katkılı beton kullanılmaktadır. Ancak bazı durumlarda modifiyeli asfalt gibi malzemeler ile de yapılması gerekebilir. [56]
- Drenaj tamiri: Drenaj bütün yol kaplama tipleri için oldukça önemlidir. Çalışmalar göstermiştir ki iyi bir kenar drenaj sistemi olan beton yollarda pompaj, faylanma ve derz sapmaları engellenmektedir [57]. Mevcut beton yollarda yeniden drenaj sistemi yapmak zor ve maliyetlidir. Bu nedenle genellikle eski sistemin güçlendirilmesi veya eski sistemin üzerinden yükün hafifletilmesi yöntemleri izlenmektedir. Hendekler, kenar drenajları, gömleklemeler ve benzeri yapılar, drenaj için kullanılan sistemler olup 2 yılda bir bakım yapılması faydalıdır [58, 59].
- Derzler arası yük transferinin artırılması: Beton yollarda yapılan enine ve boyuna derzlerin olduğu yerlerde yük aktarımı olmadığında pompaj veya köşe çatlakları hatta kırılmaları görülebilir. Yarım derz yapılan beton

yollarda derz altında kesilmeyen kısım yük iletimini sağlamaktadır. Ancak zamanla bu noktalarda da çatlaklar oluşmakta ve tam derze dönüşmektedir. Bu süreçte de çatlayan iki yüzeyin agregalarının kenetlenerek (interlock) bir süre daha yük aktarımı yaptığı bilinmekte ancak devamlı yüklemeler ve oluşan sürtünmeden dolayı kalınlığı artan çatlak, bir süre sonra kenetlenmeyi bitirmekte ve yük aktarımını azaltmaktadır. Birçok çalışma kayma donatılarının derz arası yük transferi sorununu ortadan kaldırdığını göstermiştir [60]. Şekil 1.29'da dowel bar kullanımının faydası görülmektedir.



Şekil 1.29. Kayma donatısı ve düşey deplasman oluşumu [11]

- Plak temizliği: Beton plak üzerinde asfalt kaplama yapılmadan önce detaylı bir temizlik yapılması ve üzerinden toz ve birikintilerin uzaklaştırılması gerekir. Temizlik basınçlı hava veya su ile yapılabilir ancak temizlik sonrası asfalt uygulama yapılacağı zaman plakların kuru olması gerekir. [61]
- Kırılmış plak teknikleri: Bazı durumlarda plaklar oldukça fazla çatlak hatta kırıklara sahip olabilir. Böyle durumlarda çatlakların tamiri yerine daha

fazla kırma ve sonra sıkıştırma işlemine gidilerek yorulma çatlakları engellenmeye çalışılır. Bu yöntem iki türlü yapılabilir. Birinci yöntem “Crack and Sealing” diye bilinen yöntemdir. Bu yöntemde plak 30-60 cm aralığında küçük parçalara bölünür. Daha sonra silindir ile sıkıştırarak parçaların kenetlenmesi sağlanır. Bu yöntem özellikle sıcaklık farklarının geniş plaklarda sorun olduğu yerlerde yapılır. Plaklar ufaldıkça sıcaklıktan etkilenmesi azalacağından yorulma çatlakları engellenmiş olur. [62,63]. İkinci yöntem ise ufalandırma (Rubblization) yöntemidir. İlk yöntemle benzer bir yöntemdir ancak kırılan parçalar mümkün mertebe ufak hale getirilir. Üst yüzeylerde parçalar 5-8 cm alt yüzeylerde ise 20-25 cm boyutlarına kadar kırılır. Parçalar ufak ve iyi sıkışmış olduğundan yorulma çatlakları oluşturacak büyük gerilmeler engellenir [63].

1.7. İnce Asfalt Kaplama ile İyileştirme Yapılması

Eski beton kaplama üzerine ince asfalt kaplama yapılması, genel ve gelişmiş bir bakım çalışmasıdır. Ancak eski yolun tamamen bozulmaması ve halen daha kullanılabilir olması nedeniyle iyileştirme (rehabilitasyon) diye de adlandırılır [11]. Eski beton kaplamaların üzerine ince asfalt kaplama yapılmasının önemli sebeplerinden bazıları: Yol kaplamasının servis ömrünü uzatmak, kaplama bozulmalarının önüne geçecek genel bir bakım yapmak, kaplamanın sürüş konforunu artırmak veya yüzey pürüzlülüğünü ayarlayıp sesi azaltmak, kayma direncini ve mevcut beton yolların yük taşıma kapasitesini artırmak olarak verilebilir [11, 13, 64, 65]. Ayrıca beton üstü ince asfalt kaplama fayda-maliyet açısından ve hızlı yapılabildiğinden en iyi iyileştirme türlerinden biridir [23-25, 66]. Almanya, İspanya ve Fransa'da karayollarının % 30-%50'si iyileştirilmiş beton yollardan oluşmaktadır [67, 68]. Çin'de yapılmış 70 bin km'den fazla beton yolun ileriye dönük ince asfalt kaplama ile iyileştirme çalışmaları ile korunacağı belirtilmiştir [13]. Yapılan beton üstü ince asfalt kaplama uygulamalarına bakıldığında, yüksek standartlı beton yollar uygulandığı görülmektedir. Dünya genelinde kabul edilmiş bir iyileştirme metodu bulunmamaktadır. Bu nedenle halen daha beton üstü ince asfalt kaplama ile ilgili literatürde büyük bir boşluk vardır [21, 69]. Araştırmacılar, farklı arazi tipleri için bu kaplama tipi ile ilgili şu bilgileri toplamaya devam etmektedirler:

1. Her türlü yol ağı için en iyi uygulama tasarımının belirlenmesi

2. Beton üstü ince asfalt kaplamalarda arazi performansları (İklimsel ve yapısal)
3. Beton üstü ince asfalt kaplamalarda oluşan yorulma çatlaklarının çözümleri
4. Beton ile asfalt kaplama arası derz güçlendirme malzemelerinin performans bilgileri
5. Asfalt kaplamada tekerlek izi vb. deformasyonlara çözüm önerileri [11, 67, 70]

Özetle BÜİAK uygulamaları öncesinde gerek varsa tamir işlemleri yapılmalıdır [11, 55]. Daha sonra beton yüzeyin üzerinin süpürülmesi veya hava püskürtülerek temizlenmesi gerekmektedir [21, 22, 61]. Temizlenen yüzey ile asfalt arasındaki bağı artırılması için zift gibi yapıştırıcı malzemelerin kullanıldığı görülmüştür. Bu malzemelerin asfalt ile beton arasındaki bağı güçlendirerek ekonomik ömrü uzattığı sonuçlarını veren çalışmalar bulunmaktadır [66, 71-73]. Ayrıca asfaltın modifiyeli olmasının veya geogrid gibi bazı ara yüzeylerin kullanılmasının da ekonomik ömre olan katkısı görülmüştür [71-75]. Ancak bunun aksini gösteren araştırmalar da bulunmaktadır. Yani zift kullanımının veya ara yüzey kullanımının maliyeti arttırdığı, fakat iyileştirme tabakasının ömrünü yeterince uzatmadığı sonuçları bulunmaktadır [13, 65, 76-80].

Beton üstü ince asfalt kaplama tasarımında birçok etken değerlendirilmeli ve buna göre tasarım yapılmalıdır. Bu etkenlerden bazıları şunlardır;

- Tekerlek izi oluşumuna dayanıklı
- Yorulma etkisine karşı dayanıklı
- Sökülmelere karşı dayanıklı
- Sürüş sırasında sesi engelleyebilen
- Düşük sıcaklık veya trafik yüklerinden kaynaklı çatlaklara dayanıklı
- Kaymaya karşı dirençli

Tasarım sırasında bu hususların yol tipine göre dengesinin kurulması gerekmektedir. Yol tipi, trafik yükleri, iklim koşulları ve benzeri konulara göre nasıl bir yol tasarlanması istenildiği düşünülmeli ve bu yola göre yukardaki maddelerden bir denge oluşturulmalıdır. Örneğin kullanılacak asfalt seçilirken, çok katı seçildiğinde tekerlek izi oluşumuna karşı daha dayanıklı olabilir. Ancak bu durumda yorulma çatlaklarına karşı dayanımı düşer. Tam tersi şekilde çok yumuşak bir malzemede yorulma çatlaklarına dayanıklı olabilir ancak tekerlek izi oluşumu artabilir [11].

Beton yolların şartlarına göre üzerine yapılacak asfalt kaplamanın kalınlığını net belirleyen abak veya formüller geliştirilememiştir. Bu konuda araştırmalar devam etmektedir. Ancak arazi uygulamacıları beton üstü asfalt kaplama uygulamalarını

kullanılmaktadırlar. Bu nedenle kullanılan kalınlıklar ile ilgili çeşitli sıkıntılar ortaya çıkmaktadır. Uygulamacılar kalınlık tayini için özellikle ABD’de iki yöntem kullanmaktadır. Bunlardan birincisi “1993 AASHTO Design Guide/DARWIN” adlı basit bir programdır. Bu program beton üstü ince asfalt kaplama yapılacak yol hakkında bilgiler girildikten sonra sonuçları hesaplamaktadır [81]. ABD’de birçok eyalet verilen sonuçları yeterli bulmamakta hatta minimum kalınlığı programa göre seçmemektedir. İkinci yöntem ise ABD’de birçok eyaletin kullandığı bir yöntemdir ve geçmiş deneyimlerine göre yol yapılacak yerin çevresel faktörleri ve trafik verileri kullanılarak belirlenen kalınlık metodudur. Bu metotta maliyet de önemli bir faktör olarak değerlendirilmektedir. [21].

1.8. BÜİAK Ömrünü Belirleyen Faktörler

BÜİAK kaplamalarda rijit kısım esnek kısma göre daha yüksek mukavemetli olmasından dolayı, oluşan gerilmelere karşı dayanıklı yapı olarak karşımıza çıkmaktadır. Rijit kısmın esnek kaplama altında kalıyor olması ve yükün alta doğru yayılarak dağılması da bu durumu destekler. Bu nedenle BÜİAK kaplamalarında genellikle kritik olan kısım asfalt kaplama kısmıdır. Yani başka bir ifade ile asfalt kaplama genellikle BÜİAK ömrünü belirlemektedir. Bu nedenle asfaltta oluşabilecek gerilmeleri bilmek BÜİAK ömrünü belirleyen faktörlerin tespiti için önemlidir. Huang 2004 yılında yaptığı çalışmada, kaplamada meydana gelen genel hasar tiplerini; tekerlek izi, yorulma çatlakları ve ısıl çatlaklar olarak sınıflandırmıştır. Bunların içinden tekerlek izi hasarı yolda en yaygın olarak karşılaşılan hasar tipidir [19]. Trafik yükleri nedeniyle kompozit kaplamada oluşan aksel gerilmeler asfalt yüzeyine yakın bölgelerde basınç ve çekmelere neden olmaktadır. Kaplamada asfalt kalınlığının orta kısmına doğru düşey gerilme (σ_z) basınç olarak bulunurken, diğer yönlerdeki gerilmeler (σ_x , σ_y) basınç durumundan çekme durumuna geçer. Asfalt kaplamanın alt yüzeyinde ise yatay gerilmeler (σ_x , σ_y) çekme iken, düşey gerilme (σ_z) basınç halinde bulunur. Asfalt kaplamada meydana gelen basınç gerilmeleri malzemenin kaymasına, asfaltın sıkışmasına ve yolda tekerlek izi oluşumuna, asfalt kaplamada meydana gelen çekme gerilmeleri ise genelde alt kısımlarda yorulma çatlaklarına sebep olmaktadır. Ölçülen maksimum gerilmeler genellikle tam tekerlek altına denk gelen alanda oluşmaktadır [82].

Bu çalışmanın HYT tesisinde yürütülen deneysel kısmında birim şekil değiştirme (gerinim) ölçerlerden ve basınç hücrelerinden alınan gerilme değerleri bu bilgiyi

doğrulamıştır. Gerilmeler kaplamanın derinliğinin ve tekerlek yatay mesafesinin artmasına ters orantılı olarak azalabilmektedir [82, 83]. Tekerlek yükü nedeniyle asfalt kaplamalarda tekerleğin değdiği kesitte basınç gerilmeleri oluşur. Basınç gerilmeleri tekerlek izinin oluşum nedenidir. Asfaltın alt kısmında ise çekme gerilmeleri oluşur. Çekme gerilmeleri de yorulma çatlaklarına neden olmaktadır. [82, 84].

Bu çalışmada, asfalt için yorulma çatlaklarına sebep olan çekme gerilmelerinin neden olduğu gerinimler ve tekerlek izi oluşturabilen basınç gerilmeleri kayıt edilmiştir. Bu nedenle yorulma çatlaklarının ve tekerlek izi hasarlarının aşağıda biraz daha detaylı incelenmesi gereği duyulmuştur. Ayrıca yarım derzlerin her iki tarafında bulunan LVDT'ler kullanılarak plakların düşey deplasmanı ve yük aktarma verimliliği (LTE – load transfer efficiency) ölçülerek, özellikle yorulma çatlaklarına etkisi irdelenmiştir.

1.8.1. Yarım Derzler ve LTE

Beton plaklar çevredeki sıcaklık ve nem değişimlerinden etkilenecek büzülme veya genişleme ihtiyacı duymaktadır. Büzülmenin veya genişlemenin kısıtlanması durumunda ortaya çıkan gerilmeler çatlaklara neden olmaktadır. Derzler beton plaklarda gerilmelerin kontrollü bir şekilde giderilmesine yardımcı olur [85]. Böylelikle plaklarda kontrolsüz çatlak oluşumu engellenir ve kaplamanın uzun ömürlü olması sağlanır [86]. 3 çeşit derz vardır: yapım derzi (tam derz), büzülme derzi (yarım/yalancı derz) ve izolasyon derzi [87]. Bu çalışma kapsamında Doğu Karadeniz Bölgesinde en sık rastlanan derz türü olan ve Şekil 2'de görülen yarım derzler kullanılmıştır. Uygulaması kolay ve ekonomik bir yöntem olan yarım derzler genellikle plağın kalınlığının 1/3 ile 1/6'sı arasında kesilir [60, 88, 89]. Yorulma gerilmeleri zamanla yarım derzlerin kesilmemiş kısımlarında çatlaklar oluşturur [90]. Derzler ile ayrılan iki plak arasında yük aktarımı oldukça önemlidir. Yük aktarımı yeterince olmadığında yükün bulunduğu taraf düşey yönde daha fazla deplasman yapmakta, bu durum hem sürüş konforunu hem de emniyetli sürüşü olumsuz etkilemektedir. Ayrıca yük aktarımının iyi olmadığı derzlerde plakların devamlı yaptığı aşağı yukarı hareketler bir süre sonra yorulma gerilmelerine veya pompaj gibi etkilere neden olmaktadır. Derzlerde yük aktarımı, kayma donatıları, agrega kenetlenmesi ve plaklar ile zemin arasındaki sürtünme ile sağlanır [60, 91].

LTE yükün bulunduğu plaktan, komşu plağa ne kadar yük aktarıldığını gösterir. Dünya genelinde LTE hesaplama ile ilgili çeşitli formüller vardır. Ancak en çok kullanılan iki tanesi şunlardır:

$$(\%)LTE = \frac{\delta_U}{\delta_L} \times 100 \quad (1.1)$$

$$(\%)LTE = \frac{2 \cdot \delta_U}{\delta_U + \delta_L} \times 100 \quad (1.2)$$

δ_L = Yük derze yakınken yükün olduğu tarafta oluşan deplasman

δ_u = Yük derze yakınken yükün olmadığı komşu tarafta oluşan deplasman.

Ayrıca derzde oluşan ortalama deplasman da önemli bir kriterdir. (δ_{ave}), değerlendirme yapılırken LTE ile birlikte incelenmesi gerekir.

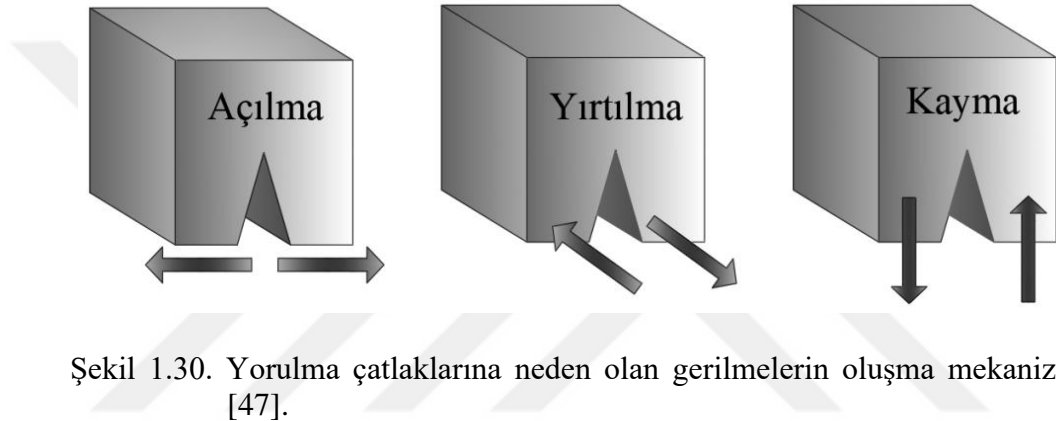
$$\delta_{ave} = (\delta_U + \delta_L)/2 \quad (1.3)$$

LTE değerleri hangi değerlere ulaştığında plakların bakım, onarım, iyileştirme veya yeniden yapım ihtiyacı duyduğu ile ilgili çok çeşitli çalışmalar vardır. Bu çalışmaların bazıları özel kriterlere göre (Sertlik, sıcaklık, plak kalınlığı vb.) değerlerinin değiştiğini göstermektedir. Ancak ACPA (American Concrete Pavement Association) , FHWA gibi kuruluşların yaptığı çalışmalar göstermiştir ki LTE değerleri %60'ın altına düştüğünde plaklar için artık önlem alınması gerekmektedir [91-93]. Başka bir çalışmada bu değer %65 mertebelerinde başlatılır [94]. Aynı şekilde Frabizzio ve Buch (1999) bu değer için %70 mertebelerini sınır görerek tehlikeli bölgeye giriş sayarlar ve %65 mertebelerinde önlem alınması gerektiğini belirtirler [95]. Prozzi vd. LTE değerlerini bir alana sıkıştırmak yerine %35'lik azalmanın oluşan gerilmeleri iki kat artıracak ve bu nedenle LTE'de %35 azalmaya müsaade edilmemesi gerektiğini belirtirler [96].

1.8.2. BÜİAK'ta Yorulma Çatlakları

BÜİAK'ı oluşturan plakların rijit kısmında ısı ve mekanik yüklerden dolayı hareketler oluşur. Bu hareketler asfalt kaplamalarda önemli gerilmelere neden olur [18, 97]. Bu gerilmelerin nedeni alttaki plağın hareket etmesidir. İşte bu gerilmeler asfalt kaplamada yorulma çatlaklarını oluşturur. Yorulma çatlakları sadece beton üstü asfalt

kaplamalarda değil, temel üstü asfalt veya asfalt üstü asfalt kaplamalarda da oluşmaktadır [98, 99]. Isıdan, mekanik yüklerden, çevresel şartlardan ve trafik yüklerinden kaynaklanmaktadır. Bazen bu iki yük türü beraber yorulma çatlakları oluşumunu hızlandırmaktadır [100, 101]. Esnek kaplamalarda genellikle ilk yorulma çatlakları plaklarda 2-3 sene içerisinde görülmeye başlar [47]. Sadece derzde değil derz etrafında veya plak kenarlarında mikro çatlaklar şeklinde de oluşabilir [70, 102]. Şekil 1.30'da görüldüğü gibi yorulma çatlakları esnek kaplamada 3 farklı gerilme mekanizmasından kaynaklı oluşmaktadır [47].

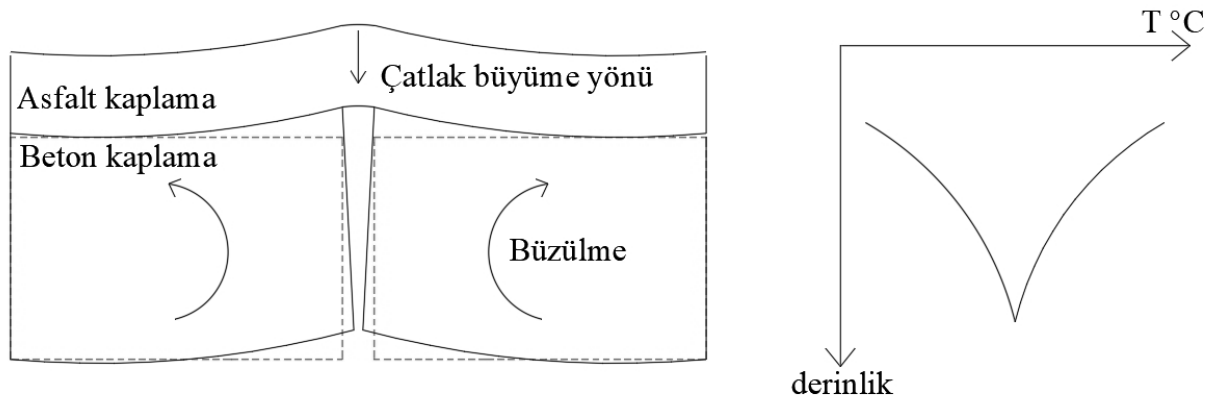


Şekil 1.30. Yorulma çatlaklarına neden olan gerilmelerin oluşma mekanizmaları [47].

Yorulma çatlakları ilk görüldükleri zaman problem olarak görülmeseler de ilerleyen aşamalarda temele su sızmaları başladığında farklı olumsuzluklara (oturma, pompaj, kaplamalar arası su girmesine vb.) neden olarak sorun oluşturmaktadırlar [102-105].

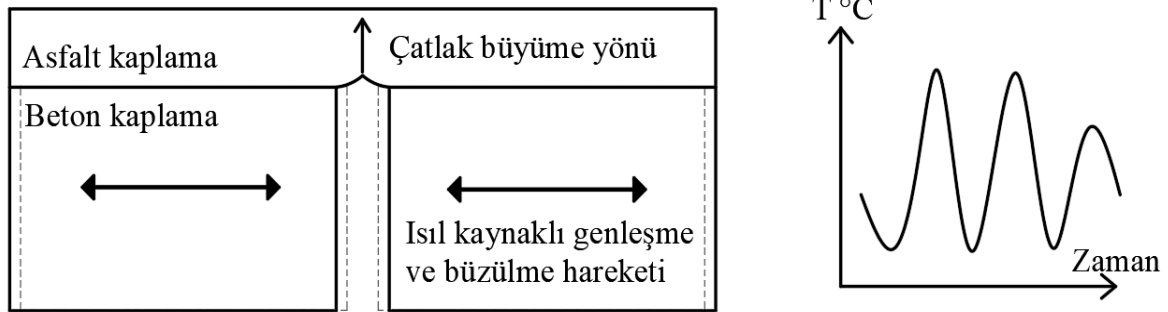
Yorulma çatlaklarının oluşumunu 3 mekanizma sağlar; eğilme, kesme ve ısıl gerilme. Bu mekanizmaların sebep olduğu gerilme yoğunluklarından çatlaklar oluşmaktadır [102]. Gerilme yoğunluklarının kaynağı tamamen farklı olabilir. Ancak en sık karşılaşılan 4 kaynak şöyledir;

1. Sıcaklık değişimi derinliklere gidildikçe değişiyorsa Şekil 1.31'de görüldüğü gibi plaklarda ısı kaynaklı büzülme hareketi oluşur. Üst kısım genişirken alt kısım bu genişmeyi tutmaya çalışır. Sonucunda tam süreksizlik noktasında (Genellikle derz bölgesinde) oluşan stres yoğunluğu üstten alta doğru çatlakların oluşmasına sebep olur [99, 102, 106].



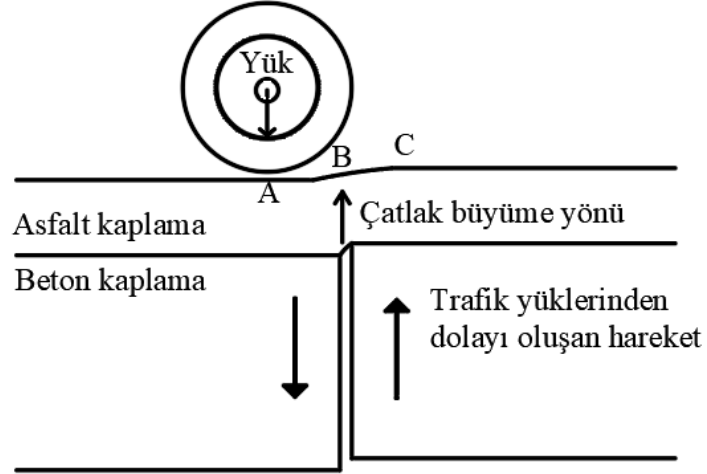
Şekil 1.31. Derinlikle sıcaklık farklılıklarından oluşan büzülme kaynaklı gerilmeler [106].

2. Sıcaklık farkı nedeniyle oluşan genleşmeler kaplamada zamanla çatlaklara neden olmaktadır. Şekil 1.32’de görüldüğü gibi beton plak sıcaklık nedeniyle genleşmeye veya büzülmeye çalışırken süreksizlik bölgesinde gerilme yüklemesi boşalması oluşmaktadır [99, 106, 107].



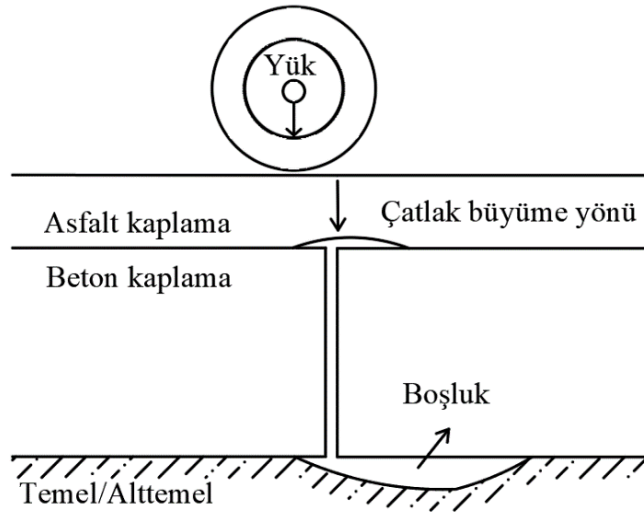
Şekil 1.32. Genleşme nedeniyle oluşan yansıma çatlak mekanizması [107].

3. Trafik yükleri beton plaklarda farklı hareketler oluşturabilir. Plaklar arası yük iletimi zayıfladığı veya ortadan kalktığı zaman farklı hareketler süreksizlik bölgelerinde çatlaklara neden olmaktadır. Şekil 1.33’de çatlaklara neden olan gerilmeler görülmektedir. Trafik yükleri derz gibi süreksiz bölgelerde hem eğilme hem de kesme gerilmelerine neden olmaktadır. Bu tarz çatlaklar genellikle aşağıdan yukarıya doğru büyür. [99, 106, 108].



Şekil 1.33. Trafik yükleri nedeniyle oluşan yansıma çatlak mekanizması [106].

4. Beton plaklar arasında özellikle derz alt kısımlarında zamanla boşluklar oluşmaktadır. Şekil 1.34’te görüleceği gibi boşluk oluşuktan sonra beton plağın uç kısımlarında boşluk nedeniyle fazla oluşan gerilmeler derzlerde yukarıdan aşağıya doğru çatlak oluşumuna neden olmaktadır [106,108].

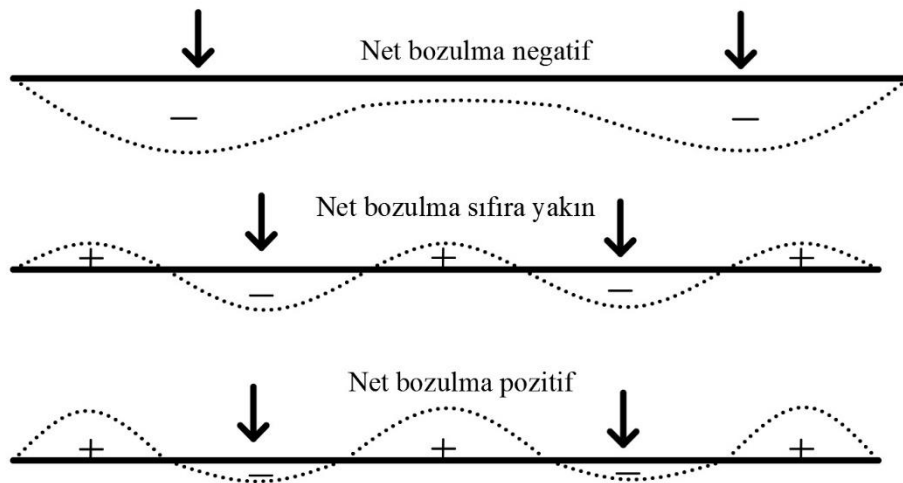


Şekil 1.34. Beton kaplama altında oluşan boşluktan kaynaklı yansıma çatlakları [106].

1.8.3. Tekerlek İzi Oluşumu

Tekerlek izi oluşumu (Rutting) diğer adıyla oluklanma, tekerleğin yola temas ettiği alanda yol boyunca oluşan düşey kalıcı deformasyondur. Aşırı yükler, yüklü araçların yavaş veya durağan olması, yük tekrarlarının çok sık olması, trafik ve iklim gibi koşullara uygun malzeme tiplerinin seçilememesi gibi nedenlerden dolayı oluşmaktadır. Tekerlek izleri, malzemenin sıkışmasından veya kayma deformasyonundan oluşmaktadır. Kayma deformasyonu kaplamada yüzeye yakın yerlerde daha etkilidir. Kaplama kalınlığının alt kısımlarında etkisi azalır. Sıkışma ise kaplama kalınlığının her kısmında etkili olabilir [109]. Tekerlek izi oluşumları şerit değiştirmede konforsuzluklara neden olur. İleri seviyelerde oluşmuş tekerlek izleri trafik güvenliğini de etkiler ve hızlı araçların kontrolden çıkmasına da neden olabilir. Bunun yanı sıra tekerlek izi nedeniyle oluşan oluklar su biriktirerek yolda hidroplaning etkisi yaratabilir. Ayrıca gizli buzlanmalara da mahal verebilir. Tekerlek izi oluştuğu noktalarda asfalt kalınlığı azalmaktadır. Birçok dış etkiye göre tasarlanan yol, kaplama kalınlığı azaldığı alanlarda deformasyon gösterebilmektedir. Bu durum da tekerlek izinin başka bir dezavantajıdır.

Tekerlek izinden dolayı zamanla oluşan farklılaşmanın, oluşmadan önceki yol düzlemine farkına net bozulma denir [110]. Net bozulmada eksi yönde oluşan kısımlar oluklar artı yönde oluşanlar ise kabarmalardır. Net bozulmaya bakarak tekerlek izi oluşumunun nedenleri anlaşılabilir. Tekerlek izi oluşum şekilleri olarak 3'e ayrılır. Şekil 1.35'te tekerlek izi oluşum şekilleri ile ilgili detaylı çizim verilmiştir.



Şekil 1.35. Tekerlek izi oluşum şekilleri [109].

Şekil 1.35’te tekerlek izi oluşum şekillerini incelediğimizde A tipinde genellikle alt tabakalardan kaynaklanan sorunlar olduğu bu nedenle toptan bir oturmanın yaşandığı düşünülür. B tipinde kaplama tabakasında oluşan tekerlek izi şekli olarak görülür. C tipinde ise genellikle üst tabakalarda karşılaşılan tekerlek izi oluşum şeklidir [110].

Tekerlek izi oluşumları birçok nedenden dolayı oluşabilir ancak en sık rastlanılan oluşum şekilleri dört ana başlık altında toplanabilir. Bunlardan birincisi yapısal nedenlerden tekerlek izi oluşumudur. Yapısal nedenler bitümlü tabaka dışındaki tabakalarda oluşan deformasyonlar olarak da açıklanabilir. Yapısal bozulmalarda genellikle net bozulma negatif olan tekerlek izi oluşumu görülür. Yapısal nedenlere genellikle iyi tasarlanmamış üst yapılar veya iyi tasarlanmamış drenaj sisteminin üst yapıyı bozması neden olmaktadır. Tekerlek izi oluşumunda ikinci neden ise akma nedenli tekerlek izi oluşumlarıdır. Bitümlü tabakalarda görülür. Yükün oluşturduğu gerilme asfalt kaplamanın taşıyabileceği gerilmeden çok olduğu zaman oluşur. Bitümün karışım özellikleri ve agrega ile karışım miktarları bu tarz tekerlek izi oluşum nedenlerinde önemli faktörlerdir. Aşınma nedenli tekerlek izi oluşumu, üçüncü oluşum şekli olarak bilinmektedir. Yüzeysel olarak oluşur ve ana kaynağı çivili tekerleklerdir. Özellikle soğuk iklimli bölgelerde kullanılan bu tekerlekler yüzeyde bulunan agregayı asfalt içinden sökmekte ve oluklanmaya neden olmaktadır. Son neden ise oturma nedenli tekerlek izi oluşumlarıdır. Bu nedenle oluşan tekerlek izleri de yüzeysel olarak kabul edilir ve bitümlü malzemenin imalat sırasında iyi sıkıştırılmamasından dolayı oluşan boşluklarda trafik yüklerinin zamanla yaptığı oturmalar bu tekerlek izini oluşturur [111]. Görüldüğü gibi birçok faktör tekerlek izi oluşumunu etkilemektedir. Araç faktörleri (dingil yükü, tekerlek lastiği iç basıncı, yükleme hızı vb.), iklim koşulları (sıcaklık, yağış, donma ve çözülme), yol geometrik yapısı (Eğim ve kurp çapı), agrega özellikleri, bitümlü bağlayıcı özellikleri, bitümlü sıcak karışım detayları, tasarım ve uygulama hataları vb. örnek olarak verilebilir [109].

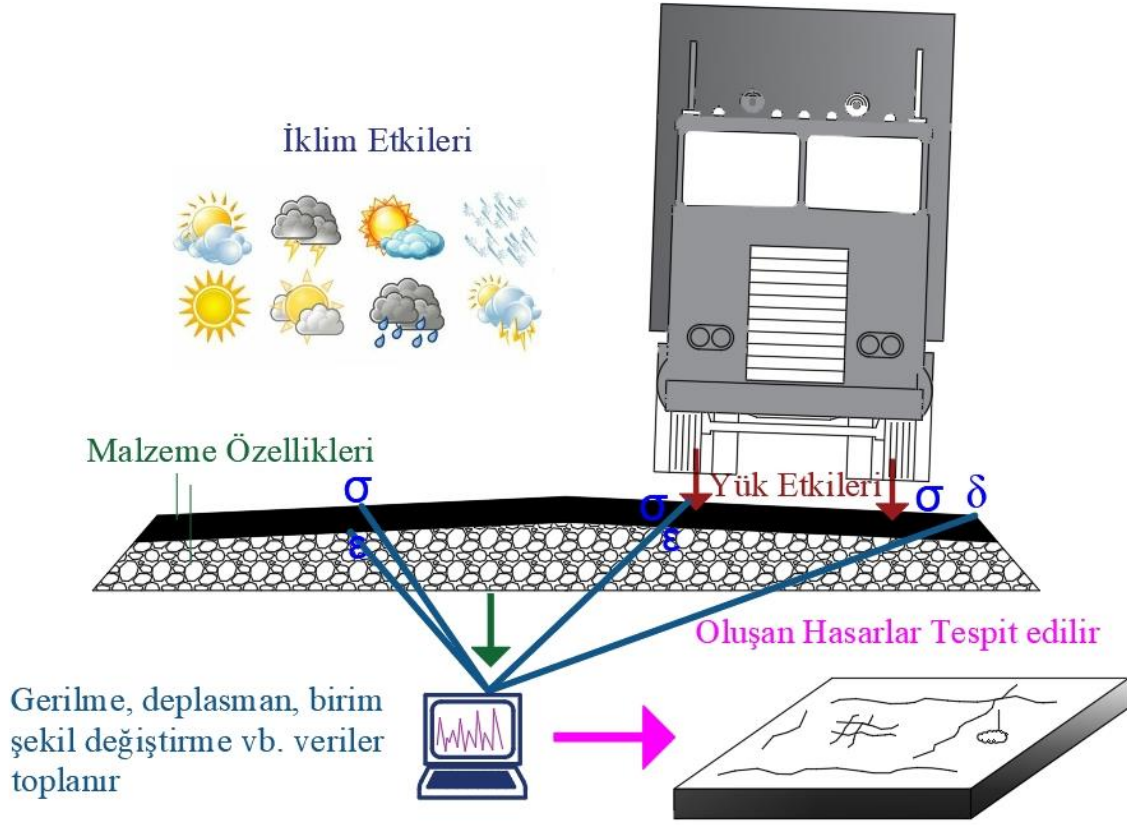
Tekerlek izi oluşumu ile ilgili “Karayolları Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberinde” verilen tabloya göre tekerlek izi 0-15 mm bazındaysa kontrol edilmeye devam edilmeli ancak önlem alınmasına gerek yok denilmektedir. 15-30 mm aralığında ise oluşan tümseklerin freze makinesi ile kesilmesi, 30 mm’den daha derin oluşan tekerlek izi durumunda ise daha ciddi önlemler ile müdahale edilmesi gerektiğinden bahsedilmektedir [112]. Bu çalışma kapsamında tekerlek izi oluşumları takip edilmiştir.

1.9. LTPP – HYT ve Dünya Üzerinde HYT Tesisleri

Laboratuvar ortamında yapılan deneyler, arazi yapısını ve yükün uygulanması sırasındaki prosedürlerin ve şartların tamamını modelleyememektedir. Bu durum bilim insanlarını, yol yapılarını incelerken hızlandırılmış yol testi veya uzun dönemli kaplama performans programlarını (long term pavement performance – LTPP) kullanmaya yönlendirmiştir [113].

Kaplamalar ile ilgili çeşitli bilgi ve performans değerlerinin bilinmesi, ileride yapılacak yatırımlarda, tasarruf, sürdürülebilirlik, konfor vb. birçok konuda daha verimli yollar yapılmasını sağlayacaktır. Bu bağlamda kaplamalar hakkında bilgi edilebilmesi için çeşitli yöntemler kullanılmıştır. En yaygın kullanılan yöntemlerden biri ilk defa 1966 yılında yayımlanan AASHTO (American Association of State Highway Officials) yollar hakkındaki deneysel veriler ile teknik şartnamelerden oluşmaktadır [114]. Bu verilerin zamanla her yol için aynı sonucu vermediği gözlemlenmiş ve yollarda tam ölçekli ve mümkün mertebe bütün değişkenlerin değerlendirileceği kaplama deneylerine ihtiyaç duyulmuştur. Bu konu için iki önemli yöntem kullanılmıştır. Bu yöntemlerden biri HYT diğeri ise LTPP'dir. Her iki yöntem de tam ölçekli kaplama çalışmalarına imkân verdiği için, fonksiyonel veya yapısal bütün faktörler değerlendirilmiştir. Laboratuvar çalışmalarında genellikle alınan numuneler ile laboratuvar ortamında yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar, arazi deneyleri kadar çeşitli ve doğru sonuçlar vermemektedir [115].

LTPP, otoyol kaplamalarının uzun dönem davranışlarında oluşan problemleri gidermek ve çeşitli faktörlerin (iklim, malzeme özellikleri, trafik tasarımı, ilk yapım, bakım vb.) kaplama üzerindeki etkilerini belirlemek için tasarlanan bir programdır. Amerika Birleşik Devletleri'nde 1984'te planlanmış 1987'de veriler alınmaya başlanmıştır. Veriler 2578 farklı test kesitinden alınmıştır ve halen daha yeni test kesitleri yapılmaya devam etmektedir [116]. Test kesitlerinin tamamı servise açık hizmet veren yollarda hazırlanmıştır. Bu yollarda yapılan deneyler dünyanın en uzun süreli ve en geniş kapsamlı kaplama deneyleri olmuştur. Böylelikle; temelde iki soruya cevap verilmeye çalışılmıştır: “Neden servise açık yolların bazıları diğerlerinden daha uzun ömürlü olmaktadır?” ve “Yollar ne zaman ve nasıl bozulmaktadır? Şekil 1.36'da LTPP'lerin çalışmasının kısa bir özeti bulunmaktadır [70,114,116,117]



Şekil 1.36. LTPP veri toplama yönteminin kısa bir özeti

Hızlandırılmış yol testi (HYT-Accelerated Pavement Test-APT) tesisleri, trafik yüklerini istenilen miktarda ve sıklıkta, kontrollü şekilde nem, ısı gibi çevresel şartların istenilen seviyelerde uygulanabildiği, bu sayede yol katmanlarında oluşan hasarların kısa sürelerde tespit edilebildiği testistir [118]. İstenilen zamanda bilgi alınan, çalışmayı engelleyecek her türlü olumsuz etkilerden uzak ve dinamik yükler ile çalışan bir sistem olduğundan arazi ölçümlerine çok yakın değerleri veren testler yapılabilmektedir [119, 120]. HYT çalışmaları yapan birçok laboratuvar 3-12 ay gibi sürelerde 5-20 sene arasında yüklemeyi yapabilmektedir [51, 69, 119-126]. NCHRP (National Cooperative Highway Research Program) , hızlandırılmış yol testini: “Yasal dingil yükü veya üzerinde bir yükü, belirli bir tekerlek tipi seçilerek, kontrollü şekilde hızlandırılmış, oluşan hasarların birikmesini deney süresi ile ilişkilendiren ve bu esnada kaplamanın (Yol yapısının) tepki ve performansını belirleyen kontrollü bir uygulamadır.” olarak tanımlamıştır [119]. İlk olarak 1950’li yıllarda ABD’de kurulmaya başlanan bu sistem, zaman içerisinde farklı eyalet ve ülkelerde 40’ın üzerinde bir sayıya ulaşmıştır. ABD içerisinde bulunan NCHRP tarafından HYT’lerle ilgili 3 farklı tarihte hazırlanan dokümanlar ile konu hakkında

düzenlemeler ve bilgilendirmeler yapılmıştır. Bu dokümanlar sırasıyla şöyledir; NCHRP 235 (Metcalf 1996) [119], NCHRP 325 (Hugo and Martin 2004) [115] ve NCHRP 433 (Steyn 2012) [113].

HYT'lerin küçük bir modeli olan ALF'ler (Accelerated Loading Facility) ise tekerleğin sabit olarak bulunduğu yerde yükleme yaparak altında test edilen yol modelini yorulmaya maruz tuttuğu sistemler olarak çalışmaktadır. ALF'ler genellikle özel veya basit sistemlerin çalışıldığı ve HYT/LTPP gibi detaylı sonuçların toplanılmadığı sistemlerdir. Maliyetinin az olması ve deneylerin nispeten daha kolay yapılabilmesi nedeniyle birçok yerde deneylerde ALF'ler kullanılmaktadır [51].

HYT ile LTPP çalışmaları karşılaştırıldığında, HYT'ler; kontrollü olmaları, yükün ayarlanabiliyor olması, deney ekipmanı için ortamın her zaman bulunuyor olması gibi üstünlüklere sahiptir. Ayrıca trafiği aksatmadan deney yapılabilmesi HYT için önemli bir avantajdır. Ancak LTPP'lerde ise yapılan deneyin direk arazi üzerinde olması (Bazı HYT'ler mobil olduklarından direk arazi üzerinde deney yapılabilir) böylelikle sonuçların yerinde görülmesi, yük dağılımının daha doğru olması gibi özellikleri ile HYT'lere göre daha üstündür. Bazı kaynaklar, HYT ve LTPP çalışmalarının beraber yürütülmesinin faydalı olacağı fikrindedir ve laboratuvar deneyleri ile iki çalışma türünün desteklenmesi gerektiğini savunur [119]. LTPP deneyleri yapılamayan ortamlarda, HYT deneyinde tasarlanan yol tipi ve iklim yapısına sahip ulaşım yapılarında gözlemsel incelemeler yapılmasında fayda vardır [51]. Dünya üzerinde HYT tesisleri farklı özelliklere sahip olduklarından genel bir bilgi olarak birkaç tanesinden bir miktar bahsetmek hem yapılacak deneylerde farklı fikirler oluşması, hem de uygulanan deneysel yöntemler hakkında yol göstermesi açısından doğru olacaktır:

1.9.1. Caltrans Hvs

Şekil 1.37'de görülen CALTRANS, Kaliforniya'da (California Department of Transportation) 1994 yılında kurulmuştur. En önemli özelliği mobil olmasıdır. İstenilen yerde deney yapma imkânı sağlamaktadır. 15- 20 yılda yapılan gözlemleri, 2-3 ay gibi kısa bir sürede yapmak için oluşturulmuş sistemdir. Belirli program çerçevesi içerisinde hareket ederek test yapılacak yerlere ulaşarak testi gerçekleştirmektedir. Dışarıda müteahhitlik hizmeti veren firmalara da test imkânı sunabilmektedir. Sistem en az 120 tonluk vinçler ve 7-10 dingilli treylerler ile taşınabilmektedir [58,59].



Şekil 1.37. CALTRANS tesisinin çeşitli görüntüleri [127, 128].

1.9.2. Atlas

ATLAS, Illinois Üniversitesi bünyesinde geliştirilmiş ve ulaştırma laboratuvarları kapsamında bulunmaktadır. 1993 yılında 2 Milyon dolarlık yatırımla yapılmıştır. 4 palet üzerinde hareket edebilir olduğundan çeşitli arazi/iklim koşullarında kullanılmaktadır. Tek Çift Lastik veya uçak lastiği ile yükler iletilebilmektedir. 0-36.5 Ton arası hidrolik başlıkla yükleme yapılabilmektedir. ATLAS, deneyler sırasında günlük sıcaklık değişimlerini kayıt etme özelliğine sahiptir. Oluşan statik ve dinamik bütün verileri toplayabilecek veri toplayıcılarına sahiptir. 26 metresinde yükleme yapılmaktadır. Bunun yaklaşık 20 metresinde sabit hız, kalanı ise frenleme mesafeleridir. İki yönde de maksimum hız 4.47 m/s (10 mph) 'dir. Yanal yönde 3 metre oynayabilir. Bir günde 9 ton 5 Milyon ESAL (Equivalent Single Axle Load) yükleyebilir [127, 129].

1.9.3. Crrel-Hvs

Amerika Ordusunun Mühendislikte soğuk hava araştırmalarını yapan kurumunun Şekil 1.38’de görölen tesisidir. -6 ile 26 Derece arasında soğutucu bir depoda devamlı donma çözünme etkisi ile oluşun deformasyonları incelemektedir. Tekerlek yükleri 2 ton ile 10 ton arası değiştirilebilmekte, böylelikle kamyon veya uçak yükleri modellenebilmektedir. 8850 m² 'lik tesiste, her biri yaklaşık 36 m uzunluğunda dört ayrı bağımsız test bölümü bulunmaktadır. Tek yönlü yükleme yapıldığında günde 14,400 yükleme, çift yönlü yükleme yapıldığında 25,000 yükleme yapmaktadır. Deneyler sırasında FWD (falling weight deflectometer) ölçümleri yapılabilmektedir. Ayrıca tesisin içerisinde malzeme değerlendirme laboratuvarı bulunmaktadır. Sıcaklık ile birlikte nem de ölçülerek kontrol altında tutulmaktadır. 20 yıllık yüklemeler 6 ay gibi kısa sürede yüklenebilmektedir. Soğutma sistemlerine ek olarak zemin soğutma panelleri bulunmaktadır. [127, 130].



Şekil 1.38. CRREL-HVS tesisinin görüntüsü [130]

1.9.4. Fhwa-Ptf

Amerika Birleşik Devletlerin’de bulunan FHWA tarafından kullanılan hızlandırılmış yol testi tesisidir. Kısa sürede uzun yılların, kaplama performanslarını ölçebilmektedir. İkili bir sistem olduğu için geliş ve gidiş aynı anda test edilebilmektedir. 50 x 4 metre uzunluğunda 12 test kanalı vardır. Her bir test kanalı, su seviyesi ve geoteknik düzenlemeler yapılacak şekilde tasarlanmıştır. Tesis bünyesinde, FWD, PSPA (portable seismic pavement analyser), LWD (light weight deflectometer), dinamik koni penetrometresi, gerilme-şekil değiştirme-yük ölçerler, kaplama ve ortamın sıcaklık

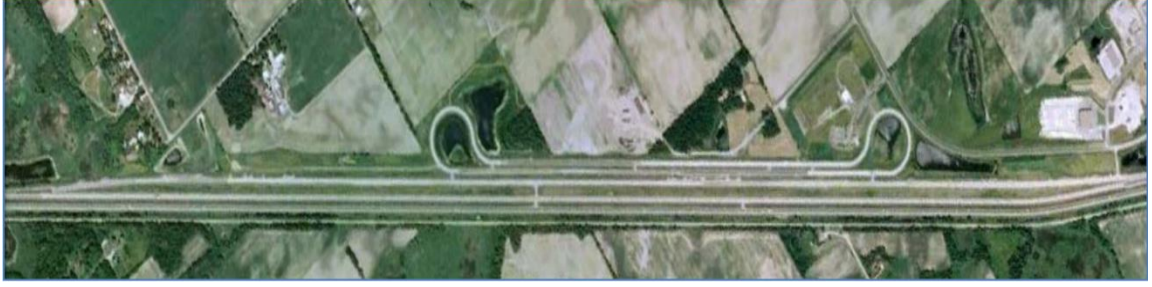
ölçerleri ve benzeri birçok deney yapma imkânı bulunmaktadır. Tesis haftada 35 bin yükleme yapabilmektedir. Elektrikli motoru 5 m/sn. hızla geçişleri yapar. 3.3 Ton ile 8.4 Ton arası tekerlek yükü yüklenebilmektedir. Kaplamalarda tekerlek izi oluşumlarını hızlandırmak için 74° C'ye kadar kızılötesi ışınlar ile ısıtılabilir [119, 127].

1.9.5. Ltrc-Prf

Lousiana'da 1993 yılında kurulmuştur. ALF cihazı ile yükleme yapılmaktadır. ALF cihazı, kaplama testi için kamyon yüklemesini taklit etmek için kullanılan, yaklaşık 30 m uzunluğunda, 55 tonluk, hızlandırılmış bir yükleme aygıtıdır. Yükleme 10 saniyede bir yapılmaktadır. 4.5-9 Ton arası yükleme yapabilmektedir. 24 saat çalıştırmak suretiyle, 20 yıllık yüklemenin sadece bir aylık bir süre içerisinde tamamlanması mümkündür. Asfalt kaplama üzerinde araştırmalara yoğunluk (20'nin üzerinde araştırma) verilmiştir. Klasik ve yeni temel malzemelerinin araştırılması, öğütülmüş kauçuğun asfalta katılımının araştırılması, temel malzeme olarak RAP (reclaimed asphalt pavement) kullanılmasının araştırılması gibi konular üzerinde çalışılmaktadır. Tesisi çalıştıran işletmede, araştırmacılar dışında elektronik ve makine uzmanı da çalışmaktadır. Tesis 3 milyon Doların üzerinde bir maliyetle kurulmuştur [127, 131].

1.9.6. Mn/Road

Minnesota'da 1991-1993 arası 25 milyon dolar harcanarak tamamlanmış tesistir. Şekil 1.39'da görüldüğü gibi paralel iki yoldan oluşmaktadır. 3.5 km'lik test düzeneği günde 26,400 araçlık yükleme kapasitesine sahiptir. Kaplamaların altından ve üstünden nem, ısı ve don verileri alınmaktadır. Daha ziyade çevresel faktörlerin, kaplama malzemelerine etkisi araştırılmaktadır. [127, 132].



Şekil 1.39. Açık alanda, kendi içinde dairesel döngüleri olan Mn/Road HYT tesisi [132]

Dünya üzerinde gelişmiş birçok ülkede HYT tesisleri bulunmaktadır. Amerika, Kanada, Çin, Japonya, Kore, İngiltere, Fransa, Almanya, İspanya, Hollanda, Güney Afrika, Brezilya, Avustralya ve benzeri birçok ülke bu tesise sahiptir. Çin 10 adet, Japonya ise 4 adet ile ABD'den sonra en çok tesise sahip olan ülkelerdir. Tesislerin ortalama maliyetlerinin 2-3 milyon dolar olduğu tahmin edilmektedir. [51]. Aşağıda Tablo 1.1'de dünya üzerinde bulunan bazı HYT ve ALF'ler hakkında bilgiler verilmiştir.

Tablo 1.1. Dünya üzerinde bazı tam veya küçük ölçekli HYT'lerin özellikleri [51]:

| ÜLKE | TESİSİN ADI | YÜK (kN) | TEKERLEK ÖZELLİKLERİ | YÜK TEKRAR SAYISI | Yükleme Şekli | Yükleme Yönü | HIZ (Km/h) |
|-----------|--------------------|----------------|---|----------------------------|---------------|--------------|------------|
| ABD | California CAL/APT | 30 ile 200 | Dual(1R22.5) Super single(425/65R22.5) | 20 Bin Yükleme/24 Saatte | Doğrusal | İki Yönlü | 3 -- 30 |
| ABD | ERDC CRREL(HVS) | 10 - 205 | | 20 Bin Yükleme/24 Saatte | Doğrusal | İki Yönlü | 12.8 |
| ABD | Florida (HVS) | 200 | New wide-base tires (445/50R22.5/455/55R22.5) | 20 Bin Yükleme / 24 Saatte | Doğrusal | İki Yönlü | 12.8 |
| ABD | Louisiana ALF | 40 ile 60 | | 5 Bin Yükleme / 24 Saatte | Doğrusal | Tek yönlü | 16- 19 |
| ABD | ERDC- GSL(WES) | 10 ile 440 | | 20 Bin Yükleme/24 Saatte | Doğrusal | İki Yönlü | 1 -- 12 |
| ABD | VDOT-VTTI(HVS) | 200 | Dual(1R22.5) Super single (425/65R22.5) | 20Bin Yükleme/24 Saatte | Doğrusal | İki Yönlü | 12.8 |
| ABD | FHWA ALF | 44 ile 74 | | 5 Bin Yükleme / 24 Saatte | Doğrusal | Faklı Yönlü | 16- 18 |
| ABD | Indiana DOT, APTF | Yarım Aks 89 | | | Doğrusal | İki Yönlü | 8--16 |
| ABD | Ohio APLF | 35,5 ile 133,5 | Tek veya Çift Dingil | 500 Yükleme / Saatte | Doğrusal | İki Yönlü | 8 |
| ABD | ATLAS | 356 | Tek veya çift Kamyon Dingili | | Doğrusal | İki Yönlü | 16 |
| ABD | Teksas MLS | 186 | 305/70 R22.5 | 6000 Yükleme/Saat | Döngüsel | Tek yönlü | 20 |
| ABD | CISL | 5 ile 22 | Yol üzerine Konvensiyonal | | Doğrusal | İki Yönlü | 8 --11 |
| ABD | FAA(NAPTF) | 334 /Tek. | 52*21.0R22, up to 250psi | | Doğrusal | İki Yönlü | 24 |
| Kanada | IRRF | Gerçek Kamyon | Dual(1R22.5) Super single (425/65R22.5) | | Test Rotası | İki Yönlü | 80 |
| Kanada | Waterloo | Yükü | | | Test Rotası | İki Yönlü | 80 |
| Danimarka | DRTM | 40-130 | Tek veya Çift Dingil | 900 Yükleme / Saat | Doğrusal | İki Yönlü | 30 |
| Fransa | LCPC | 40 to 140 | | 2400 Yükleme /Saat | Dairesel | Tek yönlü | 105 |
| Almanya | BAST | 0-140 | Tek veya Çift Dingil | 8700 Yükleme/Saat | Doğrusal | Tek yönlü | 20 |
| Almanya | MLS10 | 60-150 | Tek veya Çift Dingil | 6000 Yükleme/Saat | Doğrusal | Tek yönlü | 22 |
| Hollanda | LINTRACK | 30-200 | Tek veya Çift Dingil | 1000 Yükleme/Saat | Doğrusal | İki Yönlü | 20 |
| Romanya | Road Ring Track | | | | Dairesel | Tek yönlü | |
| Slovakya | KSD Circular Track | | Kamyon Tekerleği | | Dairesel | Tek yönlü | |
| İspanya | Test Track | 110-150 | Dual(1R22.5)single(425/65R22.5) | 400 Yükleme/Saat | | Tek yönlü | 10 --50 |
| İsviçre | (EPFL) HVS (HVS) | 200 | (445/50R22.5/455/55R22.5) | 500 Yükleme/Saat | Doğrusal | İki Yönlü | 12.8 |
| İsviçre | MMLS10 | 80-130 | Dual tired 295/60 R22.5 | 6000 Yükleme/Saat | Doğrusal | Tek yönlü | 22 |
| İsveç | VAG-OCH (VTI) | 60-220 | Tek veya Çift Tekerlek | 1100 Yükleme / Saat | Doğrusal | Çift Yönlü | 12 |
| İngiltere | TRL (PTF) | 40-200 | Tek veya Çift Tekerlek | 1000 Yükleme/Saat | Doğrusal | Çift Yönlü | 20 |

Tablo 1.1'in devamı

| | | | | | | | |
|--------------|---------------------|-----------|-------------------------------|---------------------|----------|------------|--------|
| İngiltere | Nottingham (PTF) | 0-12 | Tek veya Çift Tekerlek | 800 Yükleme/Saat | Doğrusal | Çift Yönlü | 12 |
| Avustralya | Australasia(ALF) | 80-200 | | 370 Yükleme/ Saat | Doğrusal | Tek yönlü | 20 |
| Yeni Zelanda | Zealand(CAPTIF) | 21 to 60 | Tek veya Çift Tekerlek | | Dairesel | Tek yönlü | 50 |
| Çin | CCRDJ_CTT | 100-150 | Tek veya Çift Tekerlek | 3600 Yükleme/ saat | Dairesel | Tek yönlü | 60 |
| Çin | CRT | 40 - 140 | Tek veya Çift Tekerlek | 2500 Yükleme/saat | Dairesel | Tek yönlü | 105 |
| Çin | MLS66 | 80-150 | Tek veya Çift Tekerlek | 6000 Yükleme/Saat | Doğrusal | Tek yönlü | 22 |
| Çin | ALF | 80-200 | Tek veya Çift Tekerlek | 400 Yükleme/Saat | Doğrusal | Çift Yönlü | 25 |
| Çin | Changsha | 30-70 | Tek veya Çift Tekerlek | | Doğrusal | Çift Yönlü | 30 |
| Çin | Shandong | 400 | Çift Aks ve Çift Teker | | Doğrusal | Çift Yönlü | 27 |
| Çin | Chang'an(HVS) | 30-200 | 12R22.5 58 to 145 psi | En Az 500 Yük./Saat | Doğrusal | Tek yönlü | 2-12.8 |
| Japonya | Pavement PWRI | 48-157 | | 255 Yükleme/Saat | | | |
| Japonya | Nippon (ALES) | 4--70 | Tek veya Çift Tekerlek | 15000 Yükleme/Saat | Dairesel | Tek yönlü | 100 |
| Japonya | Geoteknik PWRI | 45--125 | Tek Teker Çift Aks Çift Teker | 120 Yükleme/Saat | Doğrusal | Tek yönlü | 30 |
| Japonya | Tech.Cen. of Kajima | 100--140 | Tek veya Çift Tekerlek | 190 Yükleme/Saat | Doğrusal | Tek yönlü | 5 |
| Kore | Hanyang | 70--250 | Tek veya Çift Tekerlek | 300 Yükleme/Saat | Doğrusal | Tek yönlü | 12 |
| Kore | ICRRI | 30--100 | 12R22.5 Truck tire | | Doğrusal | Çift Yönlü | 9--15 |
| G. Afrika C. | Gauteng (HVS) | 30-205 kN | Tek veya Çift Tekerlek | 1000Yükleme/Saat | Doğrusal | Çift Yönlü | 13 |
| G. Afrika C. | MLS Stellenbosch | 80-160 kN | Tek veya Çift Tekerlek | 6000 Yükleme/Saat | Doğrusal | Tek yönlü | 22 |
| Brazilya | Brazil (ALF) | 68,6 | Tek veya Çift Tekerlek | 900 Yükleme/Saat | Doğrusal | Tek yönlü | 12 |
| Brazilya | Grande do Sul(PTF) | 20-130 | Tek veya Çift Tekerlek | 250 Yükleme/Saat | Doğrusal | Tek yönlü | 6 |

1.10. Ölçüm Cihazları Hakkında Literatür

Bu çalışmada deneyler sırasında, 5 farklı ölçüm cihazı ile veriler toplanmıştır. Ölçüm cihazlarının tamamı tahribatsız deneyler ile ölçüm alabilen cihazlardır. Bu sayede deneylerde sıklıkla ölçüm alınması sağlanmıştır [133].

Deneyleerde kullanılan ölçüm cihazlarından birincisi beton plakların düşey hareketlerini ölçen potansiyometrik lineer pozisyon cetvelleridir. Diğer adıyla LVDT (Linear Variable Differential Transducer) olarak da bilinmektedir. LVDT'ler plaklarda oluşan oturma veya deformasyon kaynaklı yer değiştirmeler ile yüklü tekerleklerin hareketleri sırasında derzlerde ortaya çıkacak lineer değişimleri ölçmek için kullanılmaktadır. Bu lineer değişimler tekerleklerin geçmesi esnasında oluşan titreşimleri de kapsamaktadır [134].

Cisimlerin molekülleri dış yüklerin etkisiyle şekil değiştirmeye zorlanır. Bu zorlamaya karşı cismin moleküllerinde iç kuvvetler oluşur. Birim kesitlerde dış kuvvetlerin etkisiyle oluşan iç kuvvetler dağılır. Bir kesit alanda oluşan iç kuvveti dağılımlarına gerinme veya birim şekil değiştirme (Strain) denir. Oluşan gerilmeler tek eksenli olarak genişleme/uzamalara neden olur. Bu genişleme/uzamaları ölçen aletlere de gerinim ölçer (gerilme pulu veya strain gauge) denir. Gerinim ölçerler birim alanda oluşan kuvvetlerden kaynaklı deformasyonları ölçer [135-137]. Bir tele gerilim uygulandığında telin uzunluğu ve çapının değişmesi, elektrik direncini de değiştirdiği 1866 da Lord Kelvin tarafından bulunmuştur. Böylelikle gerinim ölçerlerin temel çalışma prensibi bulunmuştur. Ancak günümüzde kullandığımız gerinim ölçerler, Edward E. Simmons ve Arthur C. Ruge tarafından 1938 yılında icat edilmiştir. Gerinim Ölçerlerin basit çalışma mantığı çekme veya basınç sırasında daralan ve genişleyen alana yapıştırılmış ince tellere sahip, yapıda daralma veya genişlemeden dolayı oluşan direnç farklılıklarından yola çıkarak gerilmelerin hesaplanmasından oluşmaktadır. Uzama veya daralmada tellerin en kesitleri değişmektedir. Bu değişim direnç farklılıkları oluşturmaktadır [135, 138].

Deneyleer sırasında gerinim ölçerlerin sonuçlarını etkileyen faktör sayısı oldukça fazladır. Bu nedenle gerinim ölçer seçimi oldukça önemli bir konudur. Gerinim ölçerler seçilirken aşağıdaki hususlara dikkat etmek gerekmektedir.

- Gerilmenin k-faktörü ve tipi
- Gerinim ölçerlerin sıcaklık dayanım aralığı ve ölçüm yapılacak yerin sıcaklığı
- Ölçüm yerindeki yükler ve bu yerin bu yüklere dayanıklılığı

- Gerinim ölçerlerin enine genleşme ve süneklilik sınırı
- Gerinim ölçerlerin birlikte kullanılacak ölçü aletleri ve bunların birbirine uygunluğu.

[135].

K Faktörü gerilme duyarlılığıdır. Genellikle 2 değeri yaygın olarak kullanılır. Ancak değer 1.7-4 arasında değişmektedir. Ölçüm sıcaklığı oldukça önemli bir faktördür. Özellikle asfalt gibi termoplastik malzemelerin ölçümünde sıcaklık verilerinin de kayıt edilmesi doğru yorum yapılması için oldukça önemlidir. Kullanılacak yük aralığı oluşacak gerinimlerde diğer bir önemli faktördür. Eğer büyük şekil değiştirmeler oluşuyorsa seçilecek gerinim ölçerinin düşük aralıkta kalması sonuç alamadan gerinim ölçerinin genellikle kopması ile sonuçlanmaktadır. Gerinim ölçerler birçok firma tarafından birçok farklı alanda kullanılmaya başlanmıştır. Doğru malzemeye doğru gerinim ölçer seçmek için firmaların ürettikleri gerinim ölçerleri iyi analiz edilmelidir. Seçilecek veri toplayıcısı da gerinim ölçerinin tipi için önemli bir faktördür.

Yukarıda verilen hususların yanı sıra çalışmaların türüne göre gerinim ölçer seçiminde başka faktörler de devreye girmektedir. Bu çalışmada incelenecek gerinim ölçerleri beton üstü asfalt kaplamalarda oluşan gerilmeleri ölçeceğinden bu tarz ölçümde oluşan sıkıntılar da göz önüne alınmalıdır. ABD’de yapılan benzer bir çalışma sırasında tespit edilen sıkıntılar şu şekilde verilmiştir:

1. Tepkileri düzgün ölçmesi
2. Fiyatının uygun ve kolay temin edilebilmesi
3. Tekrarlı yükler sonucunda verilerin doğruluğunu koruması
4. Başka deneylerde kullanılabilmesi için asfalt içinde sağlam çıkartılabilmesi. [138].

Asfalt için hazırlanan gerinim ölçerlerinin fiyatları nakliye ile birlikte 500-600 dolar arasında değişmektedir. Aynı anda en az 16 gerinim ölçer ihtiyacı duyulan çalışmalarda, bu fiyatlarla ortalama 8.000 dolar harcanması gerekmektedir. İlerleyen deneylerde veya deneyler sırasında oluşabilecek aksaklıklar nedeniyle kullanılacak gerinim ölçer sayısı arttıkça maliyet de katlanacaktır. Ayrıca gerinim ölçerler Japonya veya ABD gibi ülkelerden getirilmektedir. Pahalı olması nedeniyle çok sayıda getirilememekte, olası bir aksilikte yeniden sipariş verilmektedir. Bu durum gerinim ölçerlere ulaşmayı en az birkaç ay gibi uzun sürelerle uzatmaktadır. Firmaların Türkiye temsilcilerinin toplu alım politikaları bu süreyi daha da uzatmaktadır. Bu olumsuzluklar değerlendirilmiş ve çözüm olarak çalışma sırasında kullanılacak gerinim ölçerler laboratuvar ortamında tasarlanarak üretilmiştir. Yol kaplamalarında kullanılacak gerinim ölçerlerinin en önemli özelliği tekrarlı

yükler altında doğru sonuç beklentisidir. Genelde uzun süreli (en az 3 ay) deneyler olan HYT deneyleri sırasında gerinim ölçerlerin erken veri vermeyi kesmesi istenilmeyen bir durumdur. [100, 139]. Yorulmaya karşı dayanıklılık ve asfalt serilimi sırasında ulaşılabilecek 165 °C sıcaklıkta dayanabilme özellikleri tasarımda en çok dikkat edilen hususlar olmuştur. Ayrıca tasarım sırasında literatür içerisinde verilen çalışmalarda elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılarak verilerin üretilen gerinim ölçerlerin güvenilirliği de incelenmiştir.

Basınç hücreleri (Pressure cells) dinamik dikey yükün etkisinde asfalt altında oluşan basıncı ölçmek için kullanılmıştır. Basınç hücrelerinde iki daire plaka birbirine sızdırmayacak şekilde kaynak yapılmıştır. Bu iki plak arasında akışkan ve sıkıştırılmayan sıvı vardır. Plaklar basınç ölçülecek yere aktif yönü yukarıda olacak şekilde yerleştirilir. Plaklara dışarıdan basınç uygulandığında aradaki sıvı sıkışarak tek çıkış olan yere doğru basınç uygular, bu çıkışta bulunan basınç transdüseri de basıncı ölçer. Basınç hücreleri -20°C ile +80°C arası çalışabilir [51]. Deneyler sırasında ayrıca termokupl ve nemölçerler de kullanılmıştır.

1.11. Dingil Eşdeğerlik Faktörü (LEF – Load Equivalency Factor)

Hızlandırılmış Yol Testi tesislerinde, Tablo 1.1’de görüldüğü gibi farklı yüklerde deneyler yapılmaktadır. Ayrıca karayollarında bulunan araçların türlerine göre ağırlıkları değişmektedir. Değişen her yük tipine göre, yol tasarlamak zor olmakta, bu nedenle tek bir yük üzerinden hesap yapılması gerekmektedir. Örneğin bir yolda senede 10 bin otomobil, 15 bin çift dingil kamyon, 12 bin tane de otobüs geçtiğini varsaydığımızda; birbirinden ağırlık olarak farklı üç taşıta göre tasarım yapmak zor olacağından tek bir yüke göre tasarım yapılması daha iyi sonuçlar vermektedir. Bu noktada ESAL (equivalent single-axle load) yani Eşdeğer Tek Dingil Yüğü devreye girmektedir. ESAL standart olarak, iki ucunda çift tekerlek bulunan, toplamda 8.2 ton (18 kips) yüke sahip tek dingil yükünün yola yaptığı etkiyi 1 ESAL olarak kabul eder. 8.2 ton birçok ülkede yasal dingil yük sınırınıdır [140]. Diğer taşıtların yükünün çeşitli formüller ile ESAL’e çevrilmesi gerekmektedir. Böylelikle karayollarında kaplama kalınlığı ve maliyet gibi tasarımlar daha kolay yapılabilir. [141, 142].

Yüklerin ESAL cinsinden yazılabilmesi için bir katsayıya ihtiyaç vardır. Bu katsayıya dingil eşdeğerlik faktörü (LEF-Load Equivalency Factor) denilmektedir. LEF

hesaplanabilmesi için 1950'li yıllardan beri birçok formül geliştirilmiştir. Bu kadar çok fazla formül ortaya çıkmasının nedeni çeşitli faktörlerin çalışma parametrelerinin aynı olmasıdır. LEF değeri sayesinde yükler ESAL cinsinden yazılabilmektedir. Örneğin 12 ton yük için her hangi bir formülde LEF değeri olarak 4.81 hesaplandıysa, bundan sonra 12 ton yerine, 4.81 ESAL girilmesi yeterli olmaktadır. Mekanistik, ampirik veya mekanistik-ampirik (ME) olarak yeni formül çalışmaları devam etmektedir. Bu çalışmalarda LEF gelişimi için iki önemli adım bulunmaktadır. LEF sayesinde farklı yüklerin, kaplamaya vereceği hasar daha etkili bir şekilde kaplama ömrüne etki etmektedir. Böylelikle geçen taşıt sayısına göre değil, taşıtların kaplamaya vereceği zarara göre hesap yapılmakta, bu da yol tasarımlarının daha ekonomik olmasını sağlamaktadır [143]. Araştırmacılar kendi yol tipleri için LEF formülleri üretebilirler. LEF formülleri üretilirken dikkat edilecek hususlar dingilden gelen yüke karşı kaplamanın gösterdiği yapısal tepkinin belirlenmesi, değerlerinin doğru şekilde toplanması ve yapısal tepkinin belli bir yapısal hasarla ilişkilendirilmesidir [118].

Örnek olarak Norveç Kamu Yollar İdaresi'nin ve AASHTO'nun asfalt kaplamaların dingil eşdeğerlik faktörünü hesaplamak için kullandıkları denklemler şöyledir;

Norveç Kamu Yollar İdaresinin kullandığı formül aşağıda verilmektedir. Formül 4 katsayı ve bu katsayıların çıkartıldığı abaklar ile kullanılmaktadır.

$$LEF = k_{at} \times k_{wt} \times k_{ld} \times k_{tp} \times \left(\frac{P}{P_0}\right)^\alpha \quad (1.4)$$

k_{at} = Dingil özelliklerini (Tipi, aralığı vb.) ifade eden katsayı

k_{wt} = Tekerlek özelliklerini (Tek/Çift, tekerlek genişliği vb.) ifade eden katsayı

k_{ld} = Süspansiyon sisteminin özelliklerini (yaprak yay veya hava vb.) ifade eden katsayı

k_{tp} = Lastik basıncından gelen katsayı

P = Hesaplanacak dingildeki yük (tek çift veya tridem olmasına göre düzenlenmekte)

P_0 = Tek dingilde referans yükü

α = Yorulma çatlakları için 2 alınıyor, Yüzey pürüzlülüğü indeksi için 4 alınıyor [144].

AASHTO içerisinde bulunan ve birçok dünya ülkesinde kullanılan eşdeğer dingil yükü hesaplama formülü ise şöyledir;

$$LEF = \left(\frac{L_{18} + L_{2s}}{L_x + L_{2x}} \right)^{4.79} \times \left(\frac{10^{G/\beta_x}}{10^{G/\beta_{18}}} \right) \times (L_{2x})^{4.33} \quad (1.5)$$

$$G = \log \left(\frac{4.2 - p_t}{4.2 - 1.5} \right) \quad (1.6)$$

$$\beta_x = 0,3 + \left(\frac{0,081 \times (L_x + L_{2x})^{3,23}}{(S_n + 1)^{5,9} + L_{2x}^{3,23}} \right) \quad (1.7)$$

L_x = ESAL değerine çevrilen yük

L_{18} = 18 Ibs yük (8.2 ton)

L_{2x} = Dingil Tipi (Tek Dingil: $L_{2x}=1$, Çift Dingil: $L_{2x}=2$, Üçlü Dingil: $L_{2x}=3$ [145])

S_N = Üstyapı Sayısı (inç Cinsinden)

p_t = Nihai Servis İndeksi

Bu formüle çok yakın sonuçlar veren, basitleştirilmiş dingil eşdeğerlik faktörleri formülleri geliştirilmiştir. Basitleştirilmiş formüllerde her dingil tipi için başka bir formül kullanılmaktadır. Buna göre sırasıyla tek dingil, tandem dingil ve tridem dingil için formüller aşağıdadır [141, 146];

$$\text{Tek Dingil: } \left[\frac{P_{ton}}{8,2 ton} \right]^4 \quad \text{Tandem Dingil: } \left[\frac{P_{ton}}{15,322 ton} \right]^{4,1} \quad \text{Tridem Dingil: } \left[\frac{P_{ton}}{21,805 ton} \right]^{3,9} \quad (1.8)$$

Asfalt kaplama üzerinde tek dingilde bazı yükler için hem uzun formüle göre hem de basitleştirilmiş formüle göre dingil eşdeğerlik faktörleri hesaplanmış Tablo 1.2.'de verilmiştir. (Sn 6 inç alınmıştır)

Tablo 1.2. Farklı Yüklerde Dingil Eşdeğerlik Faktörleri [112].

| Yük (Ton) | AASHTO LEF | Basitleştirilmiş LEF |
|-----------|------------|----------------------|
| 1 | 0.0002 | 0.000221179 |
| 2 | 0.004 | 0.00353887 |
| 3 | 0.02 | 0.017915528 |
| 4 | 0.06 | 0.056621915 |
| 5 | 0.14 | 0.138237098 |
| 6 | 0.29 | 0.286648446 |
| 7 | 0.53 | 0.531051635 |
| 8 | 0.91 | 0.905950645 |
| 9 | 1.45 | 1.451157759 |
| 10 | 2.21 | 2.211793566 |
| 11 | 3.24 | 3.238286961 |
| 12 | 4.59 | 4.586375139 |
| 13 | 6.32 | 6.317103605 |

Tablo 1.2’de verilen dingil eşdeğerlik faktörü değerleri incelendiğinde basit formül ile hesaplanan değerlerin gelişmiş formülden çok da farklı çıkmadığı görülmektedir. Bu nedenle deney sırasında yapılacak yüklemelerin oluşturacağı dingil eşdeğerlik faktörü değeri basitleştirilmiş formülden hesaplanmıştır. Deneylerde yükler tekerleklere piston vasıtasıyla yüklenmiştir. Her piston kendi tekerleğine 3.2 Ton yüklemiştir. İki tekerlek toplam 6.4 Ton yüklemeye yapmıştır. Deneylerde yarım dingil yüklemeye yapılmıştır. Bu yük tam dingilde olsaydı 12.8 ton yüklemeye tekabül edecekti. Basitleştirilmiş dingil eşdeğerlik faktörü formülüne göre 12.8 ton yük, 5.93 ESAL değere sahiptir. Bu durumda yapılan her yüklemeye 5.93 ile çarpılarak ESAL değerine çevrilmiştir. Ayrıca HYT tesislerinin hızlı yorulma etkisi nedeniyle HYT’de uygulanan geçiş sayıları normal arazi şartlarına göre 1.5-3 kat fazla etki etmektedir [72, 119, 123]. Bu çalışmada asfalt üzerine günde 3000 ağır tonajlı yüklemeye yapıldığından en az 2 kat alınması gerektiği düşünülmüştür. Böylelikle geçiş sayısının arazi karşılığı şu şekilde hesaplanmıştır:

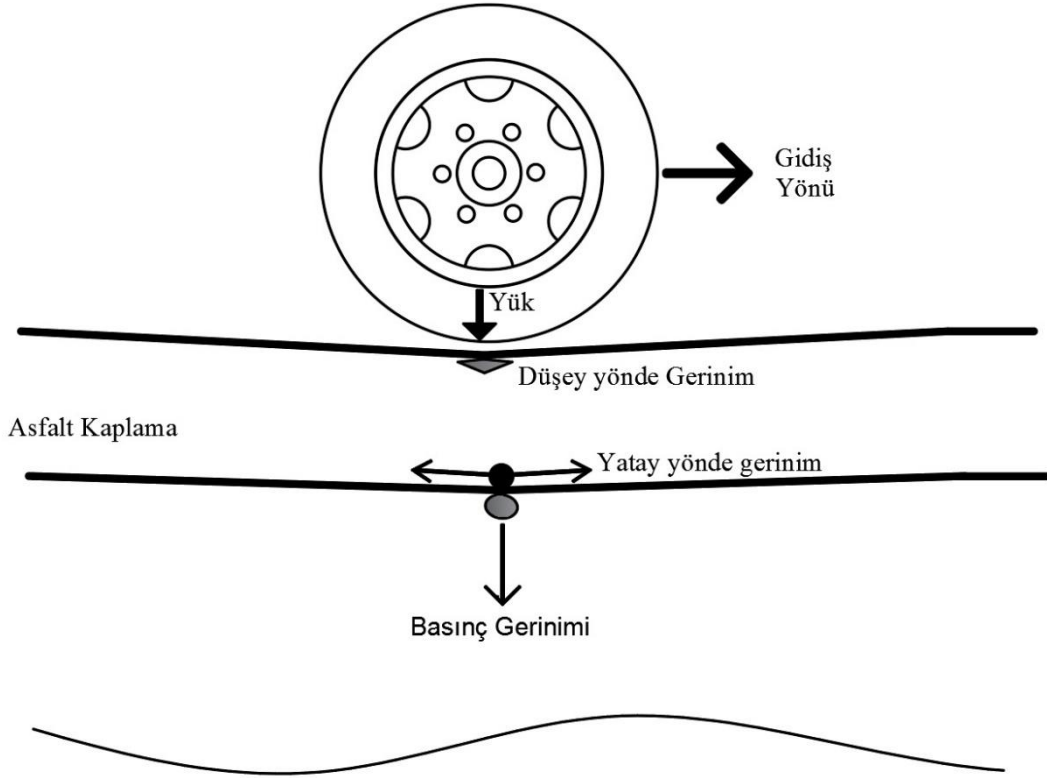
$$\text{Arazi Geçiş Sayısı (ESAL)} = \text{LEF}_{12.8 \text{ ton}} * \text{HYT}_{\text{etkisi}} * \text{Uygulanan geçiş sayısı.}$$

Bir güzergâh boyunca toplam 100 bin geçiş uygulanmıştır. Bu durumda arazi şartlarında yüklemeye ESAL cinsinden şöyle hesaplanır:

$$\text{Deneylerde uygulanan ESAL miktarı} = 100,000 * 5.93 * 2 = 1,186,000 \text{ ESAL}$$

1.12. İzin Verilen Yük Tekrar Sayısı (N_f, N_r)

Kaplama tasarımında, kaplamanın tahmini ne kadar yük sonra hasar göreceğini bilmek, buna göre kaplamaya ekonomik ömür biçmek ve ömre göre yatırım yapmak, ulaşım yapılarının fayda/maliyet ilişkisi için önemli bir bilgidir [147]. Bununla birlikte birçok kriterin etki ettiği kaplamalarda kaplamaların ömrünün hesaplanması için oluşturulan formüllerin sayısı oldukça fazladır. BÜİAK kaplamaları kompozit kaplama türüdür. Ancak ince asfalt tabaka genelde beton kısma göre daha düşük tekrar sayısında bozulduğundan izin verilen yük tekrar sayısı hesabı, asfalt kaplamaya göre yapılabilir. Asfalt kaplamada tasarım için kritik olan iki gerilme vardır. Şekil 1.40’da görüldüğü gibi birincisi asfalt kaplamanın altındaki yatay eksi yönde gerinimler (ϵ_t), ikincisi asfaltın altındaki tabakanın üst yüzeyinde oluşan dikey yönde gerinimlerdir (ϵ_v) [148]. Bu gerilmelerden yatay eksi yönde gerinimler yorulma çatlaklarına, düşey yönde gerinimler ise tekerlek izi oluşumuna sebebiyet vermektedir. Bu nedenle izin verilen yük tekrar sayısı, tasarımlarda yorulma için ayrı, tekerlek izi oluşumu için ayrı hesaplanır.



Şekil 1.40. Asfalt kaplamada kritik gerilmeler [82].

Aşağıda basit formüller ile yük tekrar sayısı örnekleri verilmiştir. Yorulma gerinimleri nedeniyle izin verilen yük tekrar sayısı formülleri [148] :

Asfalt Enstitüsü tarafından 1982 yılında geliştirilen formülde [149]

$$N_f = 0.0796 \left(\frac{1}{\varepsilon_t} \right)^{3.291} * \left(\frac{1}{E_1} \right)^{0.854} \quad (1.9)$$

Tekerlek geçtiği alanın %10'nun hasar görmesi için hesaplanmış bir formül [150]:

$$\text{Log}(N_f) = 16.684 - 3.291 * \text{log}(\varepsilon_t * 10^6) - 0.854 \text{log} E_1 \quad (1.10)$$

IRC (Indian Road Congress) tarafından kullanılan formül ise [151];

$$N_f = 2.21 * 10^{-4} \left(\frac{1}{\varepsilon_t} \right)^{3.89} * \left(\frac{1}{E_1} \right)^{0.854} \quad (1.11)$$

N_f : Yorulma gerinimleri nedeniyle izin verilen yük tekrar sayısı

ϵ_t : Asfaltın hemen altında oluşan yatay çekme gerinimleri

E_1 : Seçilen sıcaklık için esneklik modülü (çeşitli formüller ile elastisite modülünün sıcaklık ile modifiye edilmesi ile bulunur.)

Tekerlek izi oluşumu nedeniyle izin verilen yük tekrar sayısı ise [152];

$$Nr = 1.365 * 10^{-9} (1/\epsilon_v)^{4.477} \quad (1.12)$$

IRC tarafından kullanılan tekerlek izi oluşumu formülü ise [151];

$$Nr = 4.156 * 10^{-8} (1/\epsilon_v)^{4.5337} \quad (1.13)$$

N_r : Tekerlek izi oluşumu nedeniyle izin verilen yük tekrar sayısı

ϵ_v : Basınçtan dolayı oluşan yatay gerinimler

1.13. Literatürde Benzer Çalışmalar

Beton kaplamaların iyileştirilmesi için üzerine asfalt kaplama yapılması ile ilgili dünyada birçok çalışma yapılmış ve yapılmaya devam etmektedir. Çalışmalardan bazıları aşağıda verilmiştir:

2011'de Özer tarafından yapılan çalışmada beton ile asfalt kaplama arasındaki bağ kuvvetleri araştırılmıştır. 57 mm kalınlığında asfalt kaplama 203 mm kalınlığındaki beton kaplamanın üzerine serilmiştir. Ara yüzey yapıştırıcısı olarak RC 70 zift 0.213 lt/m² -0.41 lt/m² olarak uygulanmış. yüklemeler 75,000 kez yaklaşık olarak tekerlek başına 53.4 kN olacak şekilde yapılmıştır. Ara yüzey yapıştırıcısı 3 farklı oranda kullanılmıştır. Bir modelde de karşılaştırma yapmak için hiç kullanılmamıştır. Optimum yapıştırıcı kullanılmasının hiç kullanılmamasına göre kayma ve çekme gerilmelerinde yaklaşık 3.7 kat daha fazla dayanım sağladığı görülmüştür [71].

Yarı rijit kaplama olarak da bilinen beton üstü ince asfalt kaplamalar için İngiltere'de ağır trafik yüklerine göre 2 farklı tasarım geliştirilmiştir. Birincisi 20,000,000 ESAL için 250 mm kalınlığında beton üzerine 150 mm kalınlığında asfalt tabakasının serilmesi, ikincisi ise aynı ESAL ve beton kalınlığı için 200 mm kalınlığında asfalt tabakasının

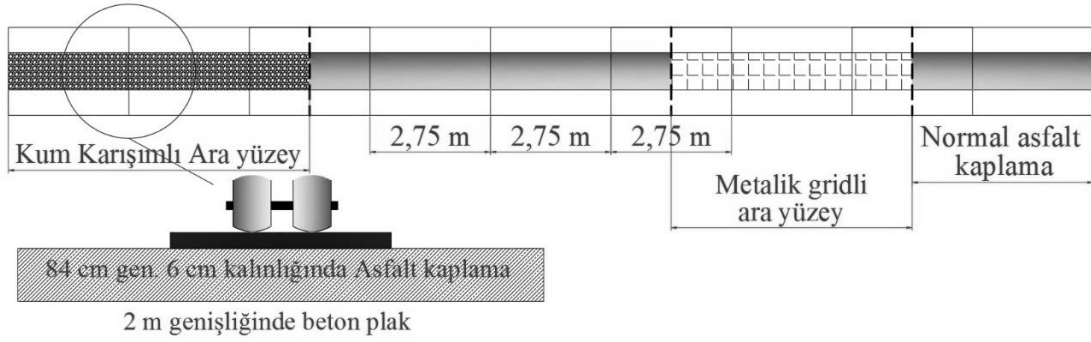
serilmesidir [153]. 2010 yılında Hu tarafından yapılan çalışmada, 10,000,000 ESAL için 250 mm kalınlığındaki donatılı beton yol üzerine 75 mm asfalt kaplama yerine, 100 mm asfalt kaplama yapılması durumunda yaklaşık 2 kat fazla yol ömrünün oluştuğu belirtilmiştir [106].

2006'da Merrill, toplam beton üstü ince asfalt kaplamanın kalınlığının 250 mm'yi geçmemesi gerektiğini vurgulamıştır [154]. Aksi halde artan asfalt kaplama kalınlığının tekerlek izi oluşumunu artıracak bir çok araştırmacı tarafından rapor edilmiştir [154-159]. Beton üstü ince asfalt kaplamanın üzerine çalışan araştırmacılar tekerlek izi ve yorulma çatlaklarının oluşumu gibi iki temel problemle karşılaşmışlardır. Yorulma çatlaklarının oluşumu kesme, eğilme ve termal gerilmelere bağlı olarak meydana gelmektedir [106].

New York'ta 1972 yılında inşa edilmiş 22.9 cm kalınlığında donatılı derzli beton yol, 30 yıl hizmet verdikten sonra iyileştirme çalışması yapılmasına karar verilmiş. 3 yol kesitinde deneme yapmak için çeşitli ölçüm aletleri yerleştirilmiştir. Deneme yapılacak kesitlerde birincisinde olduğu gibi üstü asfaltlanmış, ikincisinde beton kırılmış, üçüncüsünde ise kırılıp sıkıştırılmıştır. Ölçümlerde çevre koşulları yanı sıra plakların dikey hareketi ve birim şekil değiştirmeleri de incelenmiştir. Sıcaklık değişimlerinin etkilerini minimize etmek için kırma işleminin çok faydalı olduğu sonucu elde edilmiştir. Ayrıca oluşacak gerilmeler ve birim şekil değiştirmeleri azaltmak için kırma sıkıştırma işleminin oldukça fazla faydası olduğu görülmüştür [160].

Chao 2002'de yaptığı çalışmada beton ile asfalt arasında ayrı bir tabaka yapılması durumunda yansıma çatlaklarının azalacağını ancak bu durumda oturmaların artacağını belirtmiştir [161]. Sürekli donatılı beton kaplamalar üzerine yapılan ince asfalt kaplamaların yorulmaya karşı direncinin fazla olduğu ancak yansıma çatlaklarının burada da oluşacağını belirtmektedir [121, 162]. Derzli beton kaplamaların üzerinde derze denk gelen bölgelerde duble yansıma çatlağı oluşmaktadır. Bu çatlaklar dikey trafik yükleri etkisinde iki katlı oluşarak önlenmesi zor bir yansıma çatlağı haline gelmektedir [163-166].

2007'de Perez tarafından Fransa'da yapılan çalışmada, HYT ile ağır trafik yükü çalışılmış, Şekil 1.41'de görüldüğü düzenekte 2 ay içerisinde 13 ton sabit dingil yükü (yarısı uygulanarak) 20 yıllık trafik yüküne karşılık gelecek şekilde yüksek basınç dayanımına sahip donatılı beton yol üstü ince asfalt kaplama ile iyileştirme tabakası yapılmış ve yorulma çatlaklarının oluşumu incelenmiştir. Modifiyeli 6 cm kalınlığındaki ince asfalt, metalik gridlerle desteklenerek beton kaplamanın üzerine serilmiş, sıkıştırılmış ve 1,000,000 geçişe rağmen yorulma çatlaklarının oluşmadığı gözlemlenmiştir [72].



Şekil 1.41. Perez tarafından hazırlanan deney düzeneği [72]

2012 yılında Wu'nun HYT'de yaptığı araştırmada, beton üstü asfalt kalınlığının artmasının yorulma çatlaklarının oluşmasını geciktirdiğini ancak tekerlek izi oluşumu hassasiyetini arttırdığını bulmuştur. Aynı çalışmada 125 mm beton üstüne yapılan 63 mm kalınlığındaki asfalt kaplamada 130,000 ESAL için 6.9 mm tekerlek izi oluşumu, aynı beton üstüne aynı ESAL için 114 mm kalınlığındaki asfalt kaplamada 18.5 mm tekerlek izi oluştuğunu belirtmiştir. Yine bu çalışmada, 63 mm kalınlığındaki asfalt tabakasında ilk yorulma çatlakları 340,000 ESAL'de görülmesine rağmen 114 mm kalınlığındaki asfalt kaplamada 1,900,000 ESAL'de yorulma çatlakları gözlemlenmiştir [66].

2015'te Xiaoping tarafından yapılan başka bir çalışmada yine ağır trafik yüklerinde tekerlek izleri incelenmiş ve araç hızı, sıcaklık, trafik hacmi, kaplama yapısı, karışım özellikleri ile ilgili bağıntılar kurulmuştur. Tekerlek izi derinlik tahmini ve ölçümleri yapılan çalışmada 5 cm kalınlığındaki asfalt kaplamada en fazla 5 mm yüksekliğinde bir iz rastlanılmıştır. HYT tesislerinin, tekerlek izi oluşumu hakkında veri elde edilirken etkin bir şekilde kullanıldığı belirtilmiştir [155].

Beton üstü ince asfalt kaplamayı daha uzun ömürlü yapabilmek için özellikle yansıma çatlaklarını geciktirmek için geotekstil kullanımı ile ilgili uzun süredir araştırmalar yapılmaktadır. İlk araştırmalardan olan Maurer ve Malasheskie, çalışmasında 1940'dan önce yapılmış beton yollar üzerine yapılacak asfalt kaplama öncesi geotekstiller denemiştir. Ancak ilk çalışmalar olduğundan bu geotekstiller iki hususta sıkıntı çıkarmıştır. Birincisi yapışma tabakası istenildiği kadar başarılı adezyon sağlamamıştır. İkincisi ise yapışmanın iyi olmamasından kaynaklı geotekstilin kırışıp toplanması olarak gözlemlenmiştir. Bu nedenler ilk yapılan geotekstil çalışmalarında yol uygulamaları açısından yetersiz olduğu kanaatini oluşturmuştur [78]. Geotekstiller ile ilgili Buttlar vd. sıcak havalarda oluşabilecek yorulma çatlaklarını daha etkili engelleyebildiği halde soğuk

havalarda yorulma çatlağını istenilen düzeyde engelleyemediğini, dolayısıyla çevresel verilere göre malzeme seçiminin daha iyi olacağı kanaatine varmıştır [80].

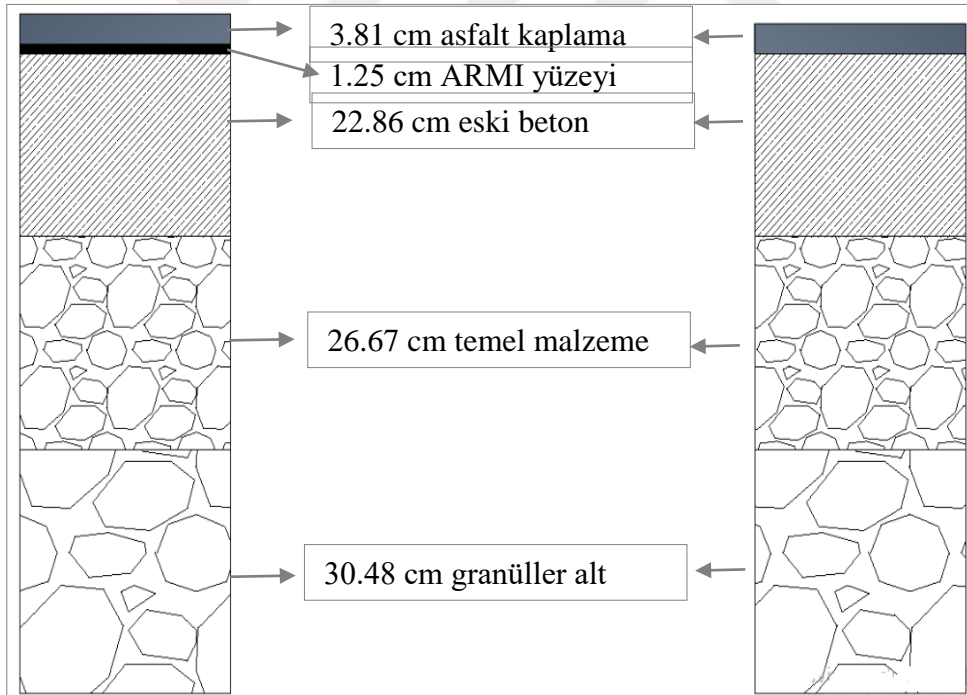
Hu ve Cao'nun Çin'in Xian şehrinde yaptıkları çalışmada, beton ve asfalt kaplama arasında farklı geotekstil malzemeleri kullanarak, yorulma çatlağının engellenmesi veya ertelenmesi hedeflenmiştir. Deneyde araştırılan farklı kaplama tipleri şunlardır; 1. Beton üstü 9 cm Asfalt (5 cm kalın agrega+4 cm ince Agrega), 2. Beton üstü trevia geotekstil ve 6 cm asfalt, 3. Beton üstü non-woven geotekstil + 6 cm asfalt, 4. Beton üstü woven geotekstil + 6 cm asfalt, 5.Çimento ile Stabilize 90 cm kalınlığında temel üstü cam kumaş + 6 cm asfalt, 6. Kıırma Taş Temel üstü cam kumaş + 6 cm asfalt. Deneyler sonucunda ara katmanlar, asfaltta oluşan kayma mukavemetini azalttığı halde bitiremediğinden, yorulma çatlaklarını sadece ertelediği tespit edilmiştir. Çalışmalar sonucunda en az asfalt kaplama kalınlığının 5 cm olması gereklidir diye bir sonuç daha elde edilmiştir [13].

Geotekstiller ile ilgili başka bir çalışma ise, Button'un, Ozona Texas'ta bulunan sürekli donatılı beton yolun üzerinde yaklaşık 400 metrelik bir kesitte yaptığı deneydir. Farklı geotekstil malzemeler, farklı oranlarda denemeye tabi tutulmuştur. Yıllarca yolda oluşan deformasyonlar incelenmiş ve sonuca bu şekilde ulaşılmıştır. Bu deneyde geotekstil kullanımının daha sonra yapılacak asfalt kaplamalarda oluşacak yorulma çatlakları için herhangi bir ek fayda sağlamadığını tespit etmiştir. Böylece beton plakta olan ısıdan kaynaklı genleşme ve büzülmelerin, yorulma çatlaklarının asıl nedenini oluşturmakta olduğu ve geotekstillerin bu hareketlere engel olamadığı sonucuna varmıştır [77].

Shuler ve Harmelink, Colorado'da yüklenici tarafından yapılacak iyileştirme çalışmasında yol üzerinde 8 farklı yöntem ile yansıma çatlağı oluşumunu incelemiştir. İncelemeleri sırasında fiber ve çeşitli geotekstiller ile güçlendirilmiş asfalt kaplamalar kullanılmıştır. Çalışma sonucunda fiber ile güçlendirme pahalı olmasına rağmen, geotekstil kadar yorulma çatlaklarını gideremediğini tespit etmiştir [79].

Makowski vd., beton üstü ince asfalt kaplamanın sürüşü geliştirmek, kaplamayı korumak ve sesi azaltmak için yapılmasından bahsettikleri çalışmada, Wisconsin'de iklim nedeniyle yorulma çatlaklarının 1-2 yılda oluştuğunu belirtmişlerdir. Yorulma çatlaklarını geciktirmek için yapılan deneylerde, ara yüzey elemanlarının çatlak oluşumunu %42 oranında geciktirdiğini ve yapılan deneylerde alınan numunelerde üzerinde bulunan asfalt kaplamada yorulma çatlağı oluştuğu halde ara yüzey elemanlarında çatlak oluşmadığı tespit edilmiştir. [75]

Greene ve arkadaşları, Florida'da 2012 yılında yaptıkları çalışmada, HYT'de asfalt ve beton kaplamalar arasında ara yüzey malzemesi denemesi yapmışlardır. Ara yüzey malzemesi olarak ARMI (Asphalt Rubber Membrane Layer) kullanmışlardır. ARMI asfalt betonunun içinde kauçuk bulunan ve membran gibi kullanılan bir malzemedir. Deneyde kaplama kalınlıkları Şekil 1.42'de verilmiştir. Buna göre; İçinde %20 oranında öğütülmüş asfalt bulunan ara yüzey elemanı 22.86 cm beton kaplama ile 3.81 cm kalınlığında asfalt kaplama arasına koyulmuştur. Fark görülebilmesi için bir de ARMI kullanılmamış beton üstü ince asfalt kaplama yüklemeye tabi tutulmuştur. Yüklemelerde kullanılan tekerlek 455 mm ene ve 49° C sıcaklığa sahiptir. Yükleme tek tekerlekte 4.083 ton ile yapılmıştır. ARMI kullanımının pahalı ve işçiliği zor bir uygulama olduğu, tekerlek izi oluşumunu hızlandırdığı, yorulma çatlakları oluşumunu da beklenen kadar uzatmadığı fark edildiğinden, fayda/maliyet açısından kötü bir ara yüzey malzemesi olduğu kanaatine varılmıştır [76].



Şekil 1.42. HYT tesisinde Greene ve arkadaşlarının yaptığı deneyde kaplama kalınlıkları [76]

Yorulma çatlakları ile ilgili HYT tesislerinin, küçük bir modeli olan esnek kiriş yorulma deneyleri de yapılmıştır. Bu deneylerde, yükleme kirişlere yapılarak, kiriş üzerinde bulunan derz kısmından asfalt tabakaya doğru yorulma çatlaklarının oluşumu

incelenmiştir. Bu tarz deneylerden birini Blankenship vd. yapmıştır. Bu deneyde modifiye asfalt normal asfalttan 3 kat, ara yüzey elemanı kullanılan asfalt ise 50 kat yorulma çatlama karşı dayanıklı çıkmıştır. Yine aynı deney, kompozit kaplamalar için zemin özelliklerinin önemini de göstermiştir [74].

Asfalt kaplama ile alt tabaka arasında oluşan gerilmeler oldukça önem taşımaktadır. Bu gerilmelerin ölçüldüğü birçok deney vardır. Bazı deneyler arazi üzerinde uzun süreli ölçümler ile yapılır. Bu tarz ölçümlere LTPP (Long Term Pavement Performance) denilmektedir. Bu deneylerden birinde Wolfe vd., Ohio'da Delaware Country yolunda kazılmış temel tabakası farklı malzemeler ile tekrar üretilmiş, üzerine ise asfalt serilmiştir. Asfalt ile temel tabaka arasında gerinim ölçerler ve basınç ölçerler yerleştirilmiştir. Asfalt kalınlığı yaklaşık 10-12.5 cm aralığındadır ve asfalt üst kotuna da LVDT yerleştirilmiştir. Elde edilen en yüksek gerinim (Birim şekil değiştirme) değerleri; uzunlamasına gerinim değeri 0.000044, enlemesine gerinim değeri 0.000038'dir. Bu değerler asfalt kalınlığına ve derz olmamasına rağmen asfaltın alt kotunda gerinim oluştuğunu da göstermektedir [100]. Benzer bir şekilde başka bir arazi (LTPP) deneyini Minnesota'da Harris vd. yapmışlardır. Alttemel ve beton yol üzerine yapılacak 10 cm kalınlığında asfaltın altına gerinim ölçerler yerleştirmiş ve -100 ile 250 mikrostrain aralığında değerler okumuşlardır [139].

Arazi deneylerinden bir diğeri ise eski bir beton yolun kırılıp tekrar sıkıştırılması (rubblized) ile oluşturulmuş kısmında yapılmıştır. Kırılmış beton yolun üzerine 20 cm kalınlığında asfalt serilmiş ve ısıölçerler ve gerinim ölçerler ile asfaltın davranışı takip edilmiştir. Ayrıca kontrol amaçlı sıkıştırılmış agrega üzerine de serilmiş asfaltın da gerinim değerleri alınmıştır. 12 farklı gerinim ölçerden alınan sonuçlar genelde -20 ile 120 mikrostrain aralığında çıkmıştır [101].

Beton yollarda özellikle tam derzlerde uzun süre kullanımlarda pullanma ve kırılmalar oluşmaktadır. İyileştirme yapılacağı zaman derzlerdeki bu deformasyonlar tamir edilmezlerse sorun oluşturmaktadırlar. Wei vd. 2014 yılında bu konuyu çalışmışlar ve ECC (Engineering Cementitious Composite) adlı içerisinde dağıntık fiberler olan malzemeyi denemişlerdir. ECC ile tamir edilen derzli beton yollarda yapılan iyileştirme sonrası yük kapasitesi ve çatlak oluşumu için gerekli enerji miktarı artmıştır [103].

Yorulma çatlakları sadece beton yol üstü asfalt kaplamalarda değil, havaalanı apronlarında da rastlanılan bir olumsuzluktur. Yine 2014'te yansıma çatlaklarının ilerlemesi davranışını incelemek için 1.68*9.14 metre uzunluklara sahip plaklarda 50 den fazla sensör ile ölçümler yapılmıştır. Yüklemeler sırasında en yüksek gerinim değerleri

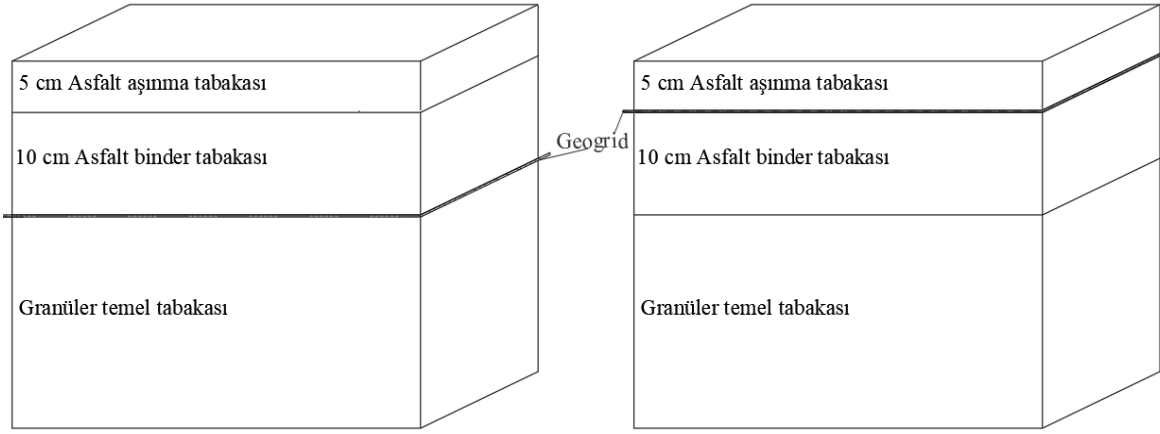
üstte, en düşük olanları ise asfalt altında çıkmıştır. Yorulma çatlaklarının belirli bir boya gelene kadar düzenli ilerlediği, daha sonra hızlı bir şekilde büyüdüğü tespit edilmiştir [105].

1.14. Sonlu Eleman (SE) Metodu ve Literatürde SE Çalışmaları

SE, fiziksel bir elemanın matematiksel açıklanabilmesi için mümkün merteye parçalara ayrılması ve böylelikle çözülmesi için kullanılan bir metottur. Bir başka deyişle mühendislik problemlerinin çözümü için kullanılan sayısal bir yöntemdir [167,168]. İlk olarak 1940 yıllarında İnşaat Mühendisliği problemleri için kullanılmaya başlanmıştır [169]. 1960 yılında sonlu eleman ismi ile anılmaya başlanmıştır. 1964 yılında ise 2 boyutlu problemlerden 3 boyutlu problemlere geçilmeye başlanmıştır. Bilgisayar teknolojisinin hızla gelişmesiyle ve sonlu eleman paket programlarının çıkmasıyla SE daha etkin kullanılmaya başlanmıştır [170]. Sonlu eleman metodu kullanılarak çözülecek bir mühendislik probleminde yapı, mümkün merteye küçük elemanlara bölünür ve bu elemanlar birbirine “nod” (düğüm noktası) denen bağlar ile bağlanır. Sınır şartları ve malzeme özellikleri girilmiş elemanların özelliklerine göre nodlar için denge veya enerji vb. denklemleri kullanılır ve istenilen nodlarda gerilme, deplasman ve benzeri veriler elde edilir [169,171]. Sonlu eleman metodu kullanılarak yapılmış ve bu çalışmanın konusu ile alakalı bazı çalışmalar şunlardır;

Sadeghi ve Hesami tarafından 2018 yılında yapılan çalışmada plakların derz bölgelerinde yük aktarımı ile ilgili değişken sayısının çok olması nedeniyle ilk aşamada sonlu eleman modelleri ile alakalı değişkenler ile ilgili bilgi toplanılmıştır. Araştırmalar neticesinde plağın veya temel tabakasının elastisite modülünün yükseltilmesi veya plak kalınlığının artmasının LTE değerini yükselttiği, interlok oluşumunu sağlayan sürtünme katsayısının artırılmasının ise çok az etki yaptığı, en çok etkiyi ise elastisite modülünün yükseltilmesinden elde ettiklerini tespit etmişlerdir [172].

Asfalt kaplamalarda geotekstil kullanımının gerilme ve gerinmelere etkisini araştırmak için Plaxis programı kullanılarak sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Şekil 1.43'te görüldüğü gibi 2 kesitte geotekstil yerleştirilmiştir. Temel tabakasının hemen üstüne yerleştirilen geotekstilin düşey deplasmanları ve gerilmeleri ciddi oranda azalttığı tespit edilmiştir. Ancak aşınma tabakası altına yani binder tabakasının üstüne yerleştirilen geogridlerin çok daha fazla etkili olduğu tespit edilmiştir [173].



Şekil 1.43. Granüller temelin üstünde ve aşınma tabakasının hemen altında geogrid [173]

Arazi deneylerinde elde edilen veriler ile sonlu eleman modellerinin kalibre edilmesi, araştırmacılar için yeni modellerin geliştirilmesi ve mekanik ilişkilerinin çıkarılması için oldukça önemlidir. Bu konuda özellikle beton üstünde rehabilitasyon için kullanılan asfalt kaplamada oluşan olumsuzlukların mekanik ilişkilerini çıkartmak için Sousa ve diğer araştırmacılar 2002 yılında Amerika Birleşik Devletleri Arizona eyaletinde bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışma asfalt kaplamada oluşan çatlaklar üzerine yoğunlaşmış ve kalibre edilen mekanistik formüller sayesinde kesme kuvvetini ve çatlak oluşumunu doğru şekilde tahmin etmişlerdir [174].

Shalaby ve diğer araştırmacılar 1996 yılında soğuk iklimde bulunan BÜİAK kaplamaları hakkında sonlu eleman modelleri oluşturarak asfaltın termoplastik davranışının düşük sıcaklıklarda gerilme ilişkisini araştırmıştır. Araştırmada 5 ve 10 cm asfalt kaplama davranışı incelenmiştir. Termoplastik malzeme olan asfaltta gerilmelerin yoğunlaştığı yerler ve çatlakların varlığında gerilmelerin değişimi ile ilgili sonuçlar tespit edilmiştir [175].

Sonlu eleman modeli ile yapılmış başka bir çalışmada, Zarei ve Shafabakhsh, geleneksel kaplama modelleri olan rijit ve esnek kaplamayı kompozit kaplamayla sonlu elemanlar modelleri kullanarak karşılaştırmıştır. Daha sonra kompozit kaplama bileşenleri olan asfalt ve beton kaplamaların farklı kalınlıklardaki modellerinin birbiri arasındaki karşılaştırmasını yapmıştır. Kaplama kalınlıklarının karşılaştırılmasında yorulma ömrü kriteri değerlendirilmiştir. Kaplama altında bulunduğu çekme gerinimleri sırasıyla aşağıda bulunan Tablo 1.3'te verilmiştir [18]:

Tablo 1.3. SE metodu ile hesaplanmış çekme gerinimleri [18]

| ASFALT KAPLAMA | | BETON KAPLAMA | |
|----------------|-----------------------|---------------|-----------------------|
| Kalınlık (cm) | Çekme Gerinimi | Kalınlık (cm) | Çekme Gerinimi |
| 10 | $9.775 \cdot 10^{-6}$ | 15 | $1.079 \cdot 10^{-5}$ |
| 12 | $9.179 \cdot 10^{-6}$ | 20 | $8.583 \cdot 10^{-6}$ |
| 15 | $8.583 \cdot 10^{-6}$ | 25 | $6.795 \cdot 10^{-6}$ |
| 18 | $7.749 \cdot 10^{-6}$ | 30 | $5.722 \cdot 10^{-6}$ |
| 20 | $7.629 \cdot 10^{-6}$ | 35 | $4.768 \cdot 10^{-6}$ |

2. YÖNTEM VE YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bu tez kapsamındaki çalışmaların büyük bir kısmı Karadeniz Teknik Üniversitesi (KTÜ) bünyesinde bulunan hızlandırılmış yol testi (HYT) laboratuvarında yapılmıştır. HYT tesisi sayesinde tasarlanan yol kaplamalarından oluşan güzergâhlara yüklemeler yapılmıştır. Bu yüklemeler sırasında basınç gerilmeleri, birim şekil değiştirme, tekerlek izi oluşumları ve düşey sapsmalar takip edilmiştir. Böylelikle tasarlanan farklı yol üst yapı tipleri hakkında çeşitli verilere ulaşılmıştır. HYT çalışmaları uzun süreçli çalışmalardır. Asfalt dökümü gibi, yapıldıktan sonra tespit edilecek hata veya eksiklikte telafisi zor ayrıca maliyetli imalatlara sahiptir. Bu nedenle çalışmanın her adımı titizlikle düşünölmüş ve planlanmıştır. Karşılaşılan aksaklıklar giderilmeden diğler adımlara geçilmemiştir, böylece çalışmalar yaklaşık 20 ay sürmüştür. Yapılan çalışmalar sırasıyla;

1. HYT tesisi içerisinde mevcut bulunan beton yol, deneyler için hazırlanmıştır.
2. Beton yol üzerinde mevcut çatlaklar tespit edilerek kayıt edilmiştir.
3. HYT cihazı ile yükleme yapılarak beton yol yorulmuş ve bu esnada basınç hücresi, termokupl ve LVDT kullanılarak ölçümler alınmıştır.
4. Beton yolun yorulma işleminin bittikten sonra yolda oluşan çatlaklar tespit edilmiş ve değerlendirilmiştir.
5. Asfalt öncesi hazırlıklar tamamlanmış, ara yüzey güçlendirmesi planlanmış, yarım derze gereken uygulama yapılmış, gerinim ölçerler hazırlanmış ve diğler ölçüm cihazları ile birlikte gerekli yerlere yerleştirilmiştir.
6. Asfalt kaplamada HYT cihazı ile yüklemeler yapılmış, yüklemeler sırasında gerinim ölçer, basınç hücresi, termokupl ve LVDT ölçümler alınmıştır. Ayrıca tekerlek izi oluşumları da takip edilmiştir.
7. Sonlu eleman (SE) metodu ile hazırlanmış modelleri ile mekanistik-ampirik (ME) çalışmaların sonuçları karşılaştırılmış, SE sonuçlarının doğruluğı kontrol edilmiş ve ME çalışmaları ile elde edilemeyecek ancak SE çalışmalarında tespit edilebilecek veriler değerlendirilmiştir.

Aşağıda, yapılan çalışmaların adımlarının detayları anlatılmıştır. Ayrıca kullanılan materyal ile ilgili bilgi konusu içerisinde bahsedilmiştir.

2.1. HYT Tesisi ve Mevcut Betonun Deneylere Hazırlanması

Bu başlık altında KTÜ-HYT tesisi hakkında bilgi verilmiş ve yapılacak deneye göre tesis içerisinde yapılanlar anlatılmıştır. Ayrıca bu başlık altında, mevcut betonun deneyler için hazırlanmasından da bahsedilmiştir. HYT tesisiyle ilgili ilk çalışmalar, tesisin önceki çalışmalardan kalma dağınıklığının toparlanması ve etrafın köşe bucak temizlenmesi olmuştur. Daha sonra tesiste lazım olabilecek el aletleri ve benzeri ekipmanlar temin edilerek HYT tesisinin ofis bölümüne yerleştirilmiştir.

2.1.1. Çalışmada Kullanılmış KTÜ/HYT

Türkiye'de ilk ve tek olarak KTÜ bünyesinde kurulmuş olan Şekil 2.1'de görülen tam ölçekli HYT tesisi 2010 yılından bu yana hizmet vermektedir. Tesisin kapalı alanı 35 metre uzunluğa ve 7 metre genişliğe sahiptir. Kapalı alanın 26 metresinde test yapılabilmektedir. Geri kalan kısmı ise ofis olarak kullanılmaktadır. Kapalı alanın etrafı betonarme perdelerle çevrilidir. Çatı trapez sac çatıdır. Tesisin elektrik aksamı sanayi tipi elektriktir. Tesis içerisinde su ve internet hattı bulunmaktadır.



Şekil 2.1. HYT Tesisinin dışarıdan görünüşü

Tesiste bulunan büyük ana giriş kapısı sayesinde HYT yükleme cihazı Şekil 2.2’de görüldüğü gibi gerek dışarıya çıkartılabilmekte, gerekse iş makineleri tesisin içine sokulabilmektedir. HYT yükleme cihazı dışarıya çıkabilme özelliği sayesinde arazide gerekli elektrik tesisatı olan her yol kesiti üzerinde deneylerini yapabilmektedir.



Şekil 2.2. Yükleme cihazının asfalt kaplama yapılması için ana kapıdan dışarıya çıkarılması

Yükleme cihazı üzerinde Şekil 2.3’te görüldüğü gibi kamyon dingilini temsil eden tekerlekler (E) mevcuttur. Bu tekerleklerin ölçüleri 295/80R 22.5 şeklindedir ve tekerlekler bir elektrikli motor (A) ve ucunda bir redüktör (B) yardımıyla döndürülmektedir. Sistemin yükleme sistemi 2 adet piston (D) ve bir hidrolik pompadan oluşmaktadır. Her bir piston bir tekerleği yüklemektedir. Elektro manyetik frenler sayesinde, binlerce fren yapmasına rağmen mekanizma aynı hassasiyette çalışmaktadır. Sistemde durma ve iz değiştirme gibi hassas işlemler sensörler (G) yardımıyla yapılmaktadır. Sistemin, frenleme esnasında meydana gelebilecek herhangi bir problemin sisteme hasar vermemesi için hareketli sistemin ana sisteme temas noktasına yaylar (F) mevcuttur. Ayrıca elektrikli motor ve redüktörün ağırlığını dengelemek amacıyla hareketli sistemin diğer tarafına ağırlık (C) monte edilmiştir.

Bu sayede sistemde yük dengesi sağlanmış olup hareket esnasında momentten oluşabilecek sıkıntılar önlenmiştir [176].



Şekil 2.3. KTÜ bünyesinde bulunan ve Türkiye'nin ilk ve tek HYT tesisi [176]

Sistemin temel özellikleri çalışmanın literatür kısmında Tablo 1.1'de özeti verilmiş olan Dünya çapında bulunan sistemlere uygun olacak şekilde tasarlanmıştır. Tablo 2.1 incelendiğinde sistemin iki tekerleği toplamda 41-127 kN arasında yüklenebilmektedir. Dünya üzerindeki HYT tesisleri 10-440 kN arası yük uygulayabilmektedir. Sistem en yüksek hızda tam güzergâhta çalıştırıldığında saatte 400 adet yükleme yapabilmektedir. Bu şekilde yükleme yapıldığında gün içerisinde 9600 geçiş kapasitesine sahiptir. Ancak hızlı ve dinlendirmeden çalışma tavsiye edilen bir çalışma değildir. Dünya üzerinde bulunan çeşitli HYT tesislerinden, tam ölçekli olanların maksimum yükleme sayıları da yaklaşık bu seviyelerdedir. Sistem farklı modlara sahiptir. En çok kullanılan modlarından; 1. mod istenilen güzergahta gidip gelmesinden oluşmaktadır. 2. Modda ise sistem istenilen güzergahta gitmekte dönüşünde sensörler vasıtasıyla tanıtılmış başka sabit bir güzergah

üzerinden dönmektedir. Sistemde mevcut 8 mod bulunmaktadır ve bu rakam istenildiği zaman artırılabilir. Hız aralığı 2 ile 15 km/saat arasında ince ayarla değiştirilebilmektedir.

Tablo 2.1. HYT tesisinin genel özellikleri

| Tesisin Adı | Yük (kN) | Tekerlek Özellikleri | Yük Tekrar Sayısı | Yükleme Şekli | Yükleme Yönü | Hız (Km/h) |
|-------------|----------|----------------------|--------------------|---------------|--------------|------------|
| KTÜ-HYT | 127 | 295/80R 22.5 | Max. 400 Yük/ Saat | Doğrusal | İki Yönlü | 2-15 |

Sistemdeki bütün hareketler otomasyon sistemi vasıtasıyla kontrol edilmektedir. Şekil 2.4'te TÇMB (Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği) katkılarıyla yaptırılan otomasyon sistemi ve panosu; hareket, duruş, yükleme, hız ve iz değiştirme işlemlerinin zamanlamasını yapmaktadır. Pano yardımıyla sisteme farklı modlarda yüklemeler/frenleme girilebilmekte ve gerekirse yeni modlar eklenebilmektedir. Ayrıca pano gerek görüldüğünde manuel hareketlere de izin vermektedir.



Şekil 2.4. Otomasyon sisteminin panosu

2.1.2. Çalışmada Kullanılan Kaplamalar ve Temel Malzemeler

HYT tesisinde Şekil 2.5'de görüldüğü üzere alttemel ve temel malzemesi olarak Trabzon İli Büyükşehir Belediyesinin (TRBB) çeşitli mahalle yollarına serilen malzeme kullanılmıştır. Malzeme, TRBB'ye ait konkasöründe kırıp belediye araçları ile nakledilmiş

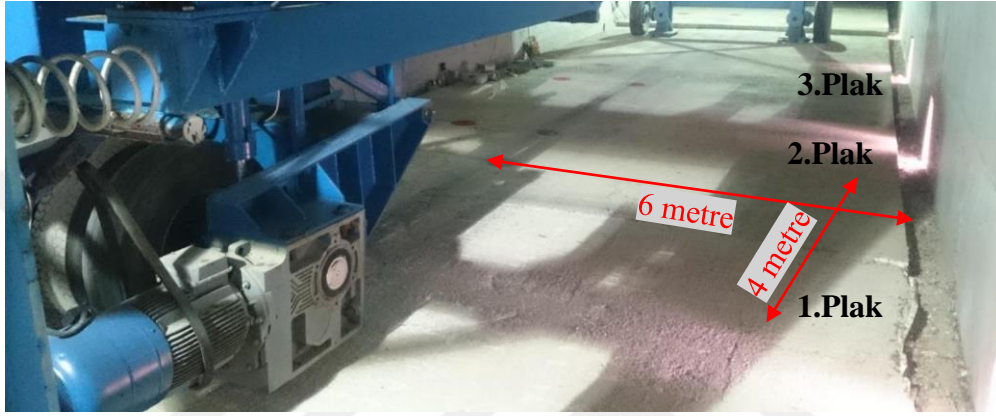
ve mahalle yoluna serilir gibi serilip sıkıştırılmıştır. Yaklaşık 2 metre kalın agrega üzerine 30 cm temel malzemesi serilmiştir temel malzemesinden alınan CBR (California Bearing Ratio) ölçümlerinde temelin CBR değeri 80 olarak belirlenmiştir. Ayrıca alınan ölçümlerde nem değeri %5 olarak ölçülmüş ve nem değerinin deneyler sırasında değişken olmasına müsaade edilmiştir.



Şekil 2.5. Tesisin önceki çalışmalarında kullanılan beton kaplamanın altında bulunan temel tabakası

Tesiste aşağıda Şekil 2.6’de görülen beton plaklar 8 yıl önce TRBB (Mülga Trabzon İl Özel İdaresi) tarafından imal edilmiştir. Tesisin içerisindeki mevcut beton yol yaklaşık 4*6 m boyutlarında 5 plaktan oluşmaktadır. Deneyler ise 3 plakta yapılmaktadır. Diğer iki plak sistemin ayaklarının bastığı plaklardır. Bu plaklar 8 yıl boyunca farklı zamanlarda trafik yüklerine ve çevresel etkilere maruz kalmıştır. Deneylerin yapıldığı plaklar 18 cm kalınlığa sahiptir. Plak kalınlığı bölüm 1.4’te detaylı anlatıldığı gibi Doğu Karadeniz Bölgesinde daha önceki çalışmalardan alınan beton yol numunelerinde elde edilen sonuçlara göre seçilmiştir. Bölgedeki belediyelerin yaptığı beton yollarda temel üzerine astar malzemesi serilmesi işlemi genellikle yapılmamaktadır. Bu nedenle beton plaklar ile temel arasına zift gibi astar malzemesi serilmemiştir. Beton plakların basınç dayanım sınıfı C25 olarak imal edilmiştir. Bölgede daha düşük basınç dayanımına sahip yollar bulunmaktadır. Ancak yaklaşık 20 yıldır ihale ile verilen ve belirli bir projeye göre yapılan beton yollarda basınç dayanımı genellikle

C25 sınıfında veya daha üst sınıflarda olmaktadır. Bu nedenle, deneyler için dökülecek beton, bölgede artık belirli bir standart olarak uygulanan beton sınıfına göre seçilmiştir. 1. sıradaki beton plaklar hariç, diğer plaklarda donatı bulunmamaktadır. 1. sıra beton plaklarda ise 150*150 mm. açıklığında ve Ø6 mm. çapa sahip hasır donatı serilmiştir. Hasır donatı temel tabakasından 6 cm yüksekliğe koyulmuştur. Böylelikle hem temelde 6 cm pas payı ile uzaklaşmış hemde yarım derzlerin kesilmesi sırasında hasar görmesi engellenmiştir.



Şekil 2.6. Daha önceki çalışmalarda yorulan beton plaklar

Bu çalışmada kullanılacak derz tipi bölgede sıklıkla uygulanan, diğer derz tiplerine göre daha ekonomik ve işçiliği daha kolay derz tipi olan yarım derzlerdir [89,91]. Tesiste daha önceki çalışmalardan kalan beton plaklar 400 cm aralıklarda tam derzlerden oluşmaktadır. Bu plakların orta kesitinde kalınlığın 1/3 yani 6 cm derinliğinde ve 0.5 cm genişliğinde enine yarım derzler kesilmiştir. Böylelikle her bir plakta görüldüğü gibi yarım derz olacak şekilde deney düzeneği hazırlanmıştır (Şekil 2.7-2.9). Ayrıca aynı genişlik ve derinliğe sahip 2 boyuna derz kesilerek plaklar 3 güzergâha ayrılmıştır. Böylelikle derzler arası mesafe 200*200 cm olmuştur. Buna göre 2 tam derz arası bir yarım derz bulunmakta ve bu hali ile bir plak olarak kabul edilmektedir. Deneye tabi tutulacak 3 plak 400*200 cm. uzunluklara sahiptir. Literatürde HYT tesislerinde yapılan deneylerde kullanılan plaklar benzer boyutlardadır [13,66,71,72,105]. Bu güzergâhlardan birinci ve üçüncüsü deneylerin yapılacağı güzergâh, orta güzergâh ise geçiş güzergâhı olarak tasarlanmıştır (Şekil 2.10). Yarım derzlerden önce ve sonra tam derz olması plakların birbirini etkilemesini azaltmıştır. Böylelikle her bir plak deneyler sırasında kendisine ait olan verileri oluşturmuştur. Derz kesimi işlemi TRBB ekip ve elemanlarınca yapılmıştır. Kesme işlemi bittikten sonra

kompresörle tazyikli hava üflenerek derzlerin içi ve etrafı temizlenmişti. Temizlenme işlemi bittikten sonra derzler Şekil 2.9’da olduğu gibi görülmüştür.



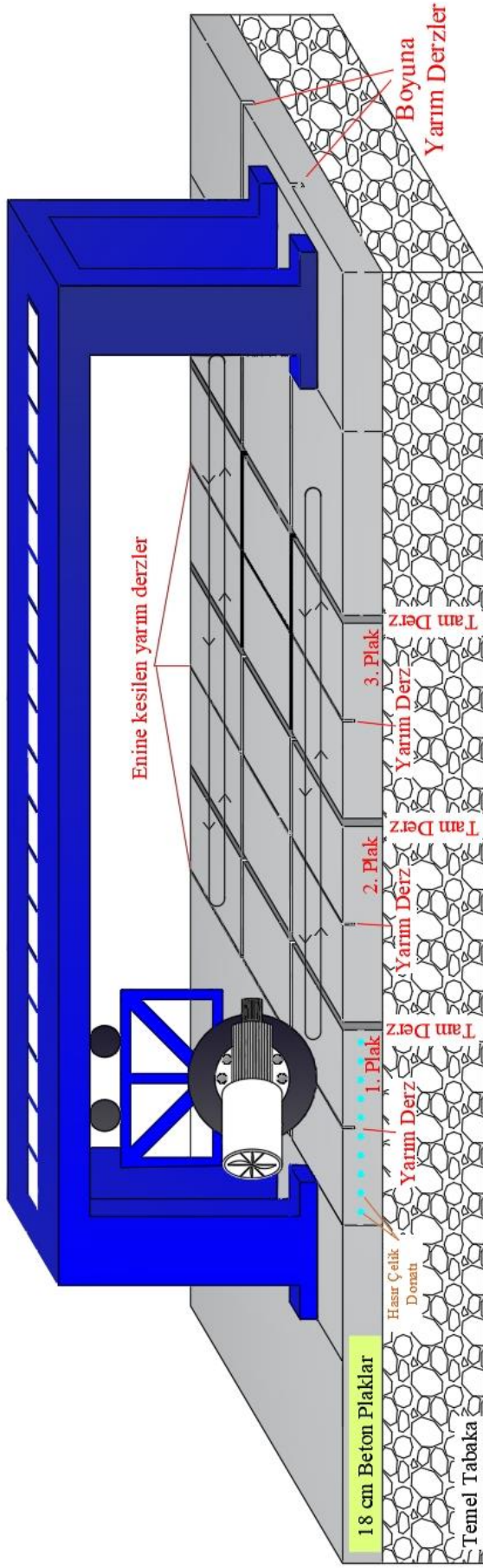
Şekil 2.7. Beton plakta yarım derzlerin kesimi



Şekil 2.8. Kesme temizlik işleminden sonra derzler



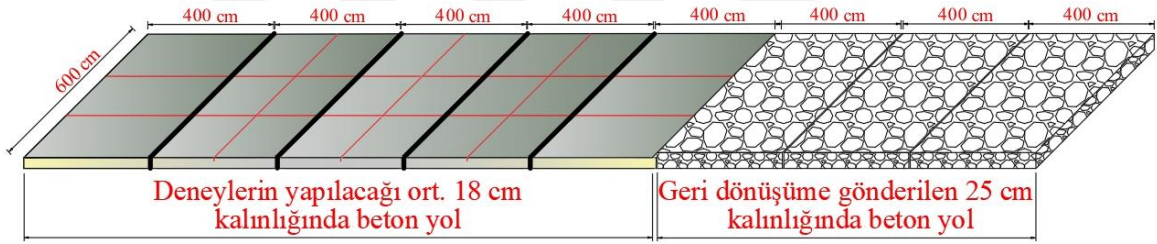
Şekil 2.9. Genişliği 0.5 cm olan kesilip temizlenmiş yarım derz



Şekil 2.10. Enine ve boyuna kesilen yarım derzler ile oluşan deney düzenneği.

2.1.3. Tesis İçinde Bulunan Beton Kaplamannın Değerlendirilmesi

HYT tesisinde içerisinde 18 ve 25 cm. kalınlığında iki ayrı beton kaplama vardır. 18 cm. beton kaplama, deneylerin yapılacağı ve yukarda Şekil 2.10'da ve Şekil 2.11'de gösterilen kaplamadır. 25 cm kaplama ise hem yüksek mukavemetli (C30/37 basınç dayanımı) hem de kalın bir kaplama olduğundan ve üzerinde ileride yapılması planlanan başka bir çalışma bulunmadığından söktürülerek geri dönüşüme gönderilmiştir. TRBB'ye ait ekskavatör tarafından kırılmış kamyonlara yüklenebilecek boyutlara getirilmiş ve 3 eleğe sahip konkasöre ulaştırılmıştır. İleride geri dönüşüm malzemesi olarak kullanılması için konkasörde 3 farklı boyutta kırılarak tekrar KTÜ üniversitesi Ulaşım Laboratuvarı stok alanına getirilmiş ve Şekil 2.12'te görüldüğü gibi sahada stoklanmıştır. Bu malzeme yorulmuş beton yolun geri dönüşümü ile ilgili başka çalışmalarda kullanılacaktır.



Şekil 2.11. Deneylerin yapılacağı kısım ve geri dönüşüme gönderilen kısım. Kırmızı çizgiler yarım derz uygulamaları



Şekil 2.12. Konkasörde kırılarak, KTÜ bünyesine geri getirilen malzeme

Beton plaklar yorulmaya tabi tutulmadan önce mevcut halinde bulunan hasarlar tespit edilmiş ve işaretlenmiştir. Şekil 2.13 ve Şekil 2.14'te görüldüğü gibi işaretleme işleminde sarı renkte yol kaplama boyası kullanılmıştır. İşaretleme yapılırken plaklara yoğun ışık verilerek olabildiğince ince çatlaklar gözle tespit edilmeye çalışılmıştır. Yüklemeler sonrası çatlaklarda uzama veya kalınlıklarındaki artış bu işaretlemeyle takip edilmiştir.



Şekil 2.13. İşaretlenmiş çatlaklar



Şekil 2.14. Tekerlek izi ve çatlaklar

Karadeniz Teknik Üniversitesi Jeofizik Mühendisliği bölümünde bulunan ultrasonik tomografi (UT) cihazı ile de plak derinliğince mevcut çatlakların yüklemeye yapılmadan önce incelenmesi istenmiştir. Yüklemeye sırasında da incelemeler yapılarak beton kalınlığı boyunca oluşabilecek çatlakların takibi planlanmıştır. Şekil 2.15'da görüldüğü gibi karelaj kağıdı üzerine yapılan incelemeler büyük hassasiyet ile yapılmıştır. Ancak KTÜ Jeofizik Mühendisliği Bölümünde bulunan cihaz beton yolların değerlendirilmesi için uygun bir cihaz değildir. Bu nedenle incelemelerde elde edilmek istenilen veriler UT cihazının anteninin yetersizliği gibi sorunlar neticesinde alınamamıştır.



Şekil 2.15. Ultrasonik tomografi cihazı ile yükleme öncesi alınan ölçümler

Plak üzerinde bulunan çatlaklar ayrıca aydınlar kâğıtta tekrar çizilerek çizim programları vasıtasıyla dijital ortama aktarılmıştır. Dijital ortamda toplam çizgi uzunlukları ve birim alana düşen çizgi miktarı hesapları yapılmıştır. Her bir plakta oluşan çatlaklar farklı renklerle gösterilerek dijital ortamda üst üste getirilmiş ve böylelikle üç plakta çatlakların en sık olduğu bölgeler tespit edilmiştir. Ayrıca dijital ortamda çatlak uzunluklarının hassas ölçümü ve çatlakların başlangıç bitiş noktalarının daha titiz tespiti sağlanmıştır.

2.2. Beton Plakların Yorulması

Beton plaklar Doğu Karadeniz Bölgesinin uzun yıllar hizmet vermiş beton yol şartlarını tam temsil etmeleri için yorulmaya tabi tutulmuştur. Tesis içerisindeki beton plaklar 2010-2017 arası çeşitli çalışmalar nedeniyle devamlı yük ve çevresel etki altında kalmışlardır. Ancak bu yeterli görülmediğinden beton yol her bir güzergâh (Orta güzergâh dâhil) 25,000 kere olmak üzere toplamda 75,000 kere daha yüklenecek yorulmuştur. Yükleme aynı doğrultuda bir gidiş bir geliş şeklinde olmaktadır. Yani her bir tur iki yüklemeyi temsil etmiştir. Orta güzergâh ölçüm alınmayacak güzergâh olduğundan yorulma işlemi bu güzergâhtan başlatılmıştır. Böylelikle oluşabilecek hasarların önceden tespit edilebilmesi ve ölçüm alınacak güzergâhlarda deneyin hatasız sürdürülebilmesi amaçlanmıştır.

Yükleme cihazı her bir güzergâhta 25,000 yükleme yaptıktan sonra yatay hareket ettirilerek diğer güzergâh üzerine getirilmiştir. Sistemin yükleme tekerleklerinin dışında 4 adet hareket tekerleği bulunmaktadır. Hareket tekerleri Şekil 2.16 ve Şekil 2.17’de görüldüğü gibi sökülüp kolonlar üzerinde bulunan diskler üzerine iki yönde de takılabilmektedir. Böylelikle HYT tesisi ister yatay isterse de doğrultusu boyunca hareket ettirilebilmektedir. Yükleme tekerlekleri basılarak sistem kaldırıldığında hareket tekerlekleri şişirilebilmekte ve sistem istenilen yere taşınabilmektedir. Yürütme işlemi bittikten sonra tekerleklerin havası indirilmekte ve tekerlerin takıldığı kolona yük verilmektedir. Tekerleklerin havalarının alındığı zamanlarda kolonların altına tahta koyularak zemine olan ağırlığın daha geniş alana dağıtılması zımbalanma etkisinin azalması sağlanmaktadır.



Şekil 2.16. Tekerlek takılan disk

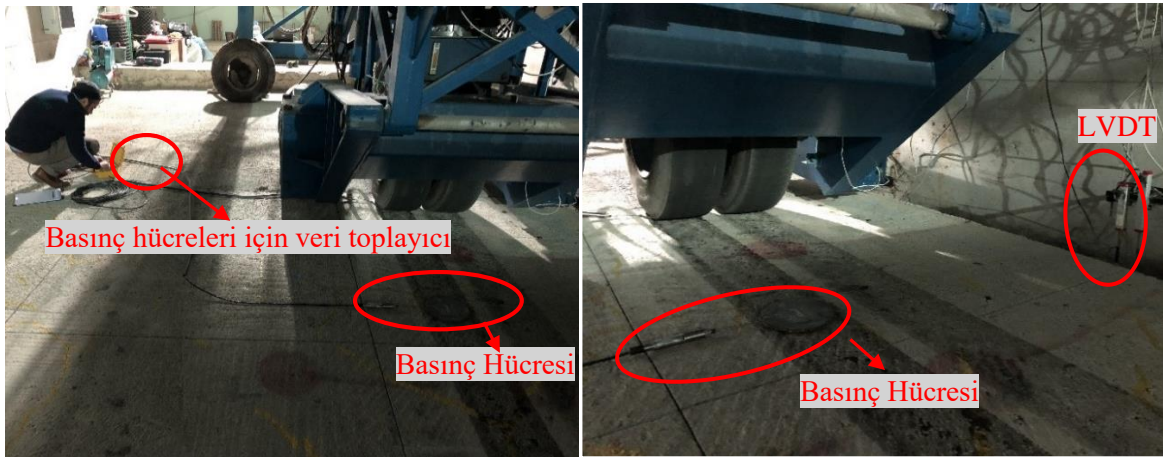


Şekil 2.17. Yön değiştirilen tekerlekler

Yükleme hızı 3 km/saat olarak ayarlanmıştır (15 km/saate kadar çıkabilmektedir.). Böylelikle yolun daha uzun süreli yüke maruz kalması sağlanmıştır. Beton plakların yorulması günde 1,000 yükleme yapılmak suretiyle yaklaşık 90 günde bitirilmiştir. Yükleme her bir tekerlekte 32 kN olmak üzere toplam 64 kN yük yapılmıştır. Bölüm 1.9’da verilen tabloda görüleceği gibi HYT tesislerinde sıklıkla kullanılan yüklere ve hızlara benzer yük ve hız seçilmiştir.

Çeşitli deneylerde kullanılmak üzere HYT tesisinde 6 adet beton altına gömülmüş ve 10 adette mobil kullanılabilir olmak üzere toplam 16 adet basınç hücresi bulunmaktadır.

(Şekil 2.18 ve Şekil 2.19). Basınç hücreleri, üreticisine ait internet adresinde DGSI Durham Geo marka VW (Vibrating Wire) özelliğe sahip Total Pressure Cell olarak geçmektedir. Basınç hücrelerinin kalibrasyonu için firmadan veri föyü istenilmiş, gönderilen veri föyü ile hücrelerin kalibrasyonu yapılmıştır. Kalibrasyon sonrası ölçüm değerleri incelenmiş ve birbirine en yakın değerlere sahip 6 basınç hücresi seçilmiştir. Asfalt kalınlıklarının altına 2 şer tane (toplam 4 tane) ve 2 de kalibrasyon için yüzeyde ölçüm alacak şekilde kullanılmıştır. Yüzey ölçümleri için bırakılan basınç hücrelerinin kodları 5750 ve 5753'tür. Gerek beton kaplamada gerekse asfalt kaplamada birbirine en yakın değerleri veren bu iki basınç hücresi ile tekerleklerin basınç ölçümü alınmıştır. Buna göre beton kaplama yorulmaya başlamadan önce yük ayarı 5750 ve 5753 nolu basınç hücrelerinin ortalama değerine göre düzenlenmiştir. Sistemde manuel olarak yük basılmış ve yükü oluşturan pistonun her bir cm'de açıldığında ne kadar yük oluşturduğu tespit edilmiştir. Şekil 2.20'de görülen Basınç hücreleri için veri toplayıcı da basınç hücreleri ile aynı marka olup DGSI "Readouts VW data recorder" olarak internet sitesinde bulunmaktadır. Bu veri toplayıcı anlık veri yakalayamamakta bu nedenle basınç hücreleri üzerine yük, manuel olarak getirilmekte daha sonra sonuçlar kayıt edilmektedir.



Şekil 2.18. Basınç hücresi ve veri toplayıcısı Şekil 2.19. Yük altında basınç hücreleri

Basınç hücreleri ile alınan değerlerin sonuçlarının birbirinden farklı çıkabildiği görülmüştür. Hatta bazı durumlarda aynı basınç hücrelerinin ölçüm aldığı yerden 5, 10 cm sağda veya solda farklı ölçümler aldığı görülmüştür. Bunun nedeni olarak beton yüzeyinin çok pürüzlü olması ve birkaç mm çıkıntıların basınç hücresinin değerini değiştirmesi olduğu

anlaşılmıştır. Konu ile ilgili firmaya nasıl önlem alınması gerektiği sorulmuş ve altına ince malzeme koyulması cevabı alınmıştır. Bunun üzerine yapıştırılmış kauçuk, EPDM (Etilen Propilen Dien Monomer), kum, pleksiglas ve rendelenmiş (toz) kauçuk gibi malzemeler denenmiştir. Alınan ölçümlerde basınç hücrelerin altına toz kauçuk koyulmasının en doğru sonuçları verdiği anlaşılmıştır. şekil 2.21’de ölçümlerin tekerlek tozu ile alınması görölmektedir.

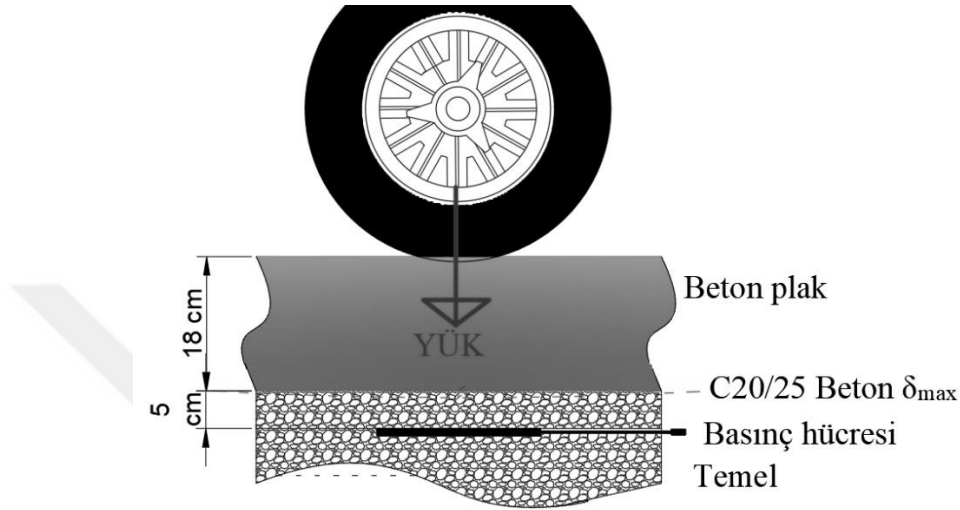


şekil 2.20. Deneylerde kullanılan basınç ölçer veri toplayıcısı



şekil 2.21. Basınç hücrelerinin altına toz kauçuk dökülmesi.

Şekil 2.22’te görüldüğü gibi basınç hücreleri, beş cm. granüler temel altına yerleştirilmiş beton plak üstüne yapılmıştır. Yükten dolayı beton plakta oluşan düşey deplasman oldukça azdır ve granüler temel tarafından tolere edilmektedir. Bu nedenle beton plak altında granüler temel içerisine yerleştirilen basınç hücrelerinden değer okunamamıştır.



Şekil 2.22. Beton altında bulunan ve değer okuyamayan basınç hücresi

Basınç hücreleri her tekerlek için yaklaşık 781 kPa değerinde 32 kN ayarlandıktan sonra yüklemeler yapılmıştır. Zaman içerisinde yükte bir değişiklik olup olmadığı incelenmiştir. Beton kaplama yükleme boyunca ciddi bir değişime uğramadan yorulmaya tabi tutulmuştur.

Yükleme sırasında uygulanan yük çift tekerde 64 kN kadardır. Bu tam bir dingilde 128 kN’a karşılık gelmektedir. Bölüm 1.11’de bulunan dingil eşdeğerlik faktörü (LEF) formüllerine göre bu yükün ESAL karşılığı 5.93 olmaktadır. Yani bir yükleme 5.93 ESAL değerindedir. Ayrıca hızlandırılmış yol tesislerinde yükleme ile ilgili verilen literatür bilgilerine göre; hızlı tesiste yollar çok sık yorulmaya tabi tutulduğundan her bir yüklemenin arazi şartlarında 1.5-3 kat yüklemeye karşılık geldiği belirtilmektedir [72,119,123]. Bu çalışma kapsamında sistemin hızının yavaş olması, ağır tonaj olarak seçilmesi ve günde 1,000 yükleme yapılmasından dolayı yük tekrar sayısının gerçek arazi koşullarına göre en az 2 kat fazla olacağı kararı verilmiştir. Bu hali ile yüklemenin ESAL değerleri Tablo 2.2’de düzenlenerek verilmiştir. Buna göre arazi şartlarında tesisin içerisindeki beton yolun 889,500 kere yorulduğu anlaşılmaktadır. Doğu Karadeniz Bölgesi köy ve mahalle yolları genellikle 20 yıllık ömründe 3 milyon ESAL’in altında yük tekrar sayısına sahip olduğu

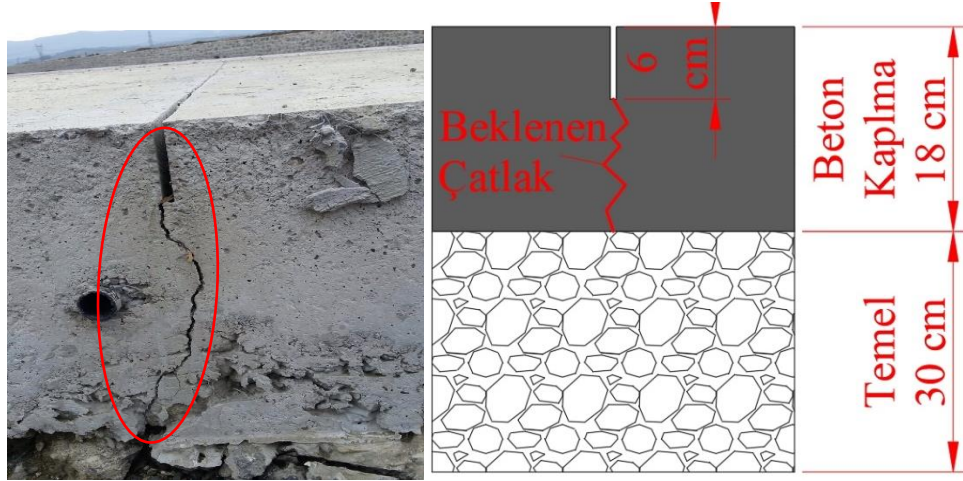
varsayılarak tasarlanmaktadır [15]. Bu durumda 3 ay süren yükleme çalışmalarında, yaklaşık 900,000 ESAL ile tesisin içerisinde bulunan beton yol yaklaşık Doğu Karadeniz Bölgesi yollarına göre 6 yıllık yüklemeye maruz kalmıştır.

Tablo 2.2. HYT tesisinde uygulanan 1 yüklemenin arazi şartlarında karşılığı

| HYT tesisinde yükleme | ESAL Karşılığı | Arazi Şartları (ESAL Cinsinden) |
|----------------------------------|---------------------------|--|
| 1 | 5.93 | 11.86 |
| 25,000 | 148,250 | 296,500 |
| 75,000 | 444,750 | 889,500 |
| 100,000 | 593,000 | 1,186,000 |

HYT tesisi içerisinde beton yollar yorulmaya tabi tutulurken çatlak oluşumu ve LVDT ile düşey deplasman değerleri takip edilmiştir. Beton yolların yorulma öncesi yukarıda bahsedilen yöntemler ile çatlakları üzerinde işaretleme yapılmıştır. Yükleme sırasında bu çatlakların gelişip gelişmeyeceği araştırılmıştır. Her 2 metrede bir derz olması, plak yüzeyinde mevcut çatlakları oluşturacak gerilmeleri engellediğinden çok fazla çatlak oluşumu beklenmemiştir. Ancak plak yüzeyinde çatlak takip yapılarak beklenmedik durumların oluşması engellenmesi hedeflenmiştir.

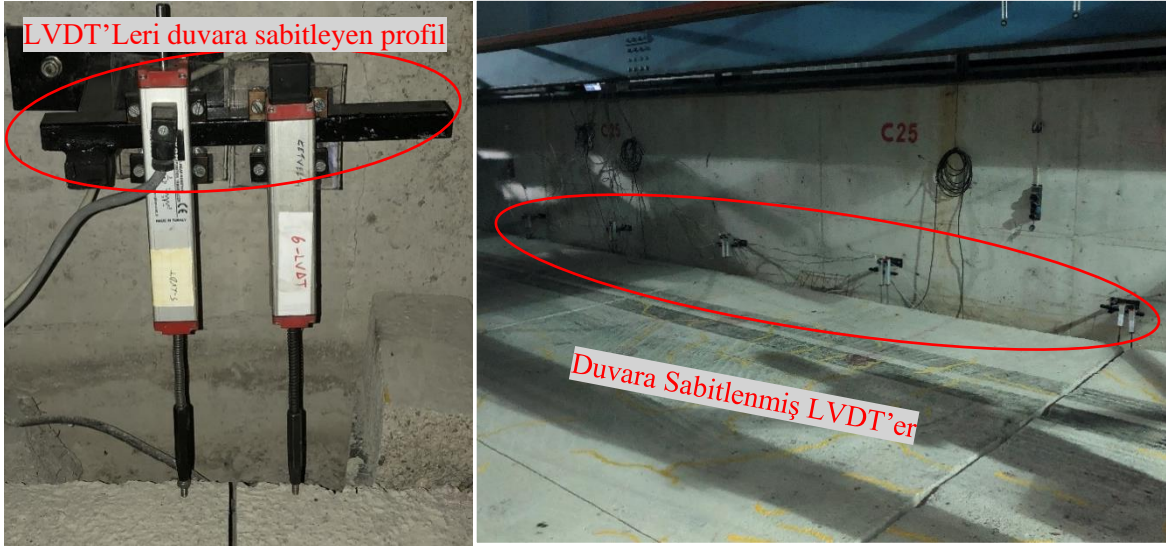
Yükleme ve çevresel koşullar nedeniyle, yarım derzlerin altında kalan kesilmemiş plak zamanla Şekil 2.23 ve 2.24'te görüldüğü gibi çatlamaktadır. Bu çalışmada da deneylerin yapıldığı plaklarda kalınlık yönünde yarım derzlerin alt kısmında çatlakların (yarım derz ilerlemesi) oluşması beklenmektedir. Bu çatlaklar yarım derzin yük aktarımını azalttığı halde, plak yüzeylerinin birbirine kenetlenmesi ve aralarındaki sürtünme nedeniyle yük aktarımının tamamen ortadan kalkmaması gerektiği bilinmektedir. Nitekim LVDT ölçümleri ile ne kadar azaltılacağı ölçülmüştür.



Şekil 2.24. Arazide çatlak tespiti Şekil 2.25. Deneilerde beklenen çatlaklar

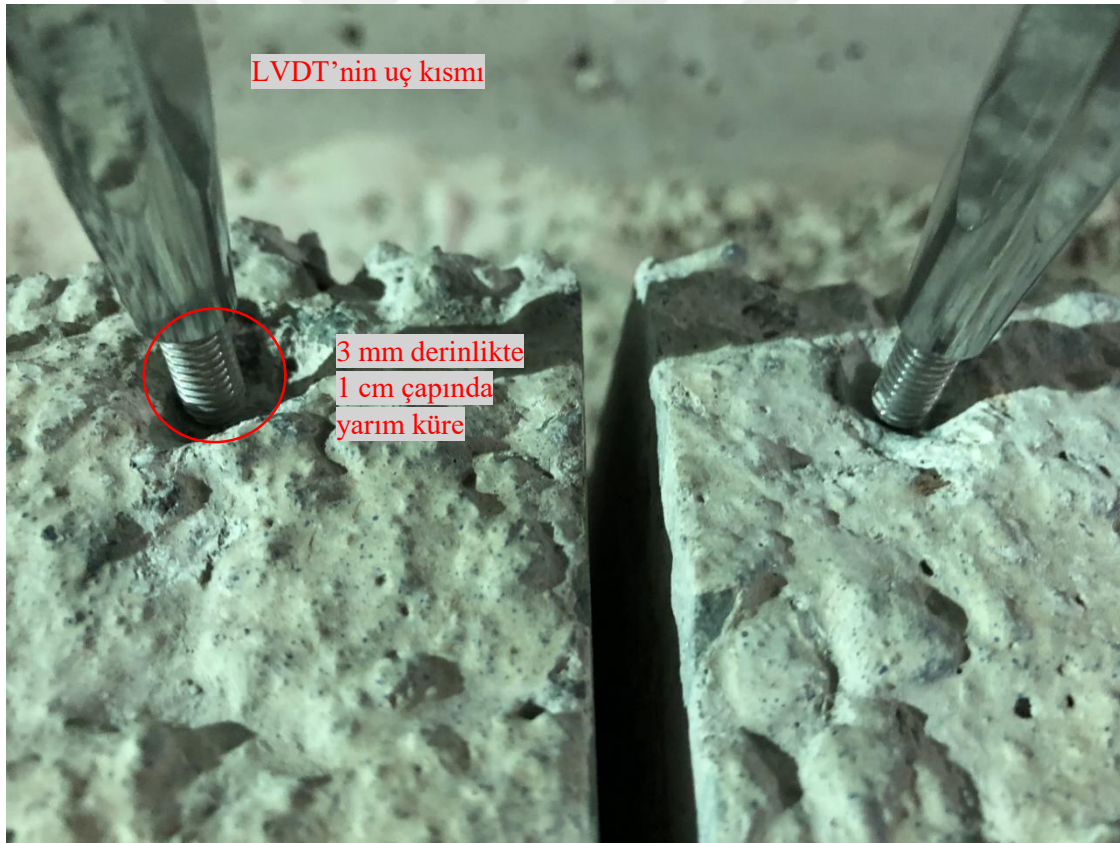
Yarım derz ilerlemelerinin (çatlak oluşumu) takibi her 1000 yükleme sonrası yapılmıştır. Güvenlik nedeniyle yüklemeler sırasında çatlakların oluşumuna bakılmamıştır. Günlük yüklemesini bitirdikten sonra makine kapatılmış, plak yüzeyi ve kalınlık yönündeki çatlaklar güçlü ışıldak kullanılarak araştırılmış ve tespit edilen çatlaklar not alınmıştır.

Yüklemeler sırasında her bir güzergahta 3 kere (başlangıç, 12500. yükleme ve 25000. yükleme) LVDT ile düşey deplasman ölçümü yapılmıştır. LVDT'ler, milimetrenin 100'de biri hassasiyette düşey (yerleştirildikleri yönde) mesafe ölçmektedir. Bu deney kapsamında OPKON markasına ait, LPS 150 D 10K model LVDT kullanılmıştır. Plakların derz yakınında oluşan yatay hareketlerin yorulma çatlacağı oluşumunun temel faktörlerinden biri olduğu bilindiğinden bu değerlerin ölçülmesi gerekmektedir. Ayrıca düşey deplasmanlar yük aktarım etkisinin (LTE) hesaplanmasında da kullanılmaktadır. Bu nedenle LVDT'ler, Şekil 2.25 ve 2.26'de görüldüğü gibi her derzin başına iki tane, 6 derzde toplamda 12 tane olacak şekilde yerleştirilmiştir. Plakların mümkün mertbe köşesinden derze en yakın yerinden ölçüm alınmaya çalışılmıştır. Derzin sağında ve solunda bulunan LVDT'ler birbirine göreceli ölçüm alabilmesi için aynı profil üzerine yerleştirilmiştir. Profillerde perde duvara ankastre şekilde sabitlenmiştir. Böylelikle yüklemeler sırasında sonuçları değiştirebilecek oynamalar engellenmiştir. LVDT'lerin uç sivri kısımları Şekil 2.27'de görüldüğü gibi beton üstünde oluşturulan yaklaşık 3 mm. derinliğinde 1 cm. çapında yarım küre şeklinde deliklere yerleştirilmiştir. Böylece ileri geri hareket sırasında LVDT çubuğunun ucu oynayarak her defasında başka değerlerde kalması engellenmiştir.



Şekil 2.26. Sabitlenmiş LVDT'ler

Şekil 2.26. Duvara sabitlenen güzergah boyu LVDT'ler



Şekil 2.27. LVDT'lerin ucu sağa sola kayma yapmaması için açılan oyuklar

LVDT'lerden elde edilen veriler, Şekil 2.28.'da görülen 8 kanallı Teknik Destek Grubundan temin edilmiş Ai8b markalı veri toplayıcısıyla bilgisayara aktarılmıştır.



Şekil 2.28. LVDT'lerden elde edilen verilerin toplayıcısı

Her güzergâh 25,000 kere yüklenmiş, toplamda beton plak 75,000 yüklemeye maruz kalmıştır. Yüklemeler sırasında deneyin sonraki aşamalarını etkileyecek bir olumsuzlukla karşılaşılmanmıştır. Görüldüğü gibi yüklemeler nedeniyle yol üzerinde tekerleğe ait Şekil 2.29 ve 2.30'de kauçuk (tekerlek kaplaması) izi oluşmuştur.



Şekil 2.30. Güzergah boyu kauçuk izi



Şekil 2.31. Yüklemelerden sonra beton plaklar

2.3. İnce Asfalt Kaplama Hazırlık Aşamaları

Beton plaklar Doğu Karadeniz Bölgesinin köy ve mahalle yollarını temsil edecek şekilde tasarlanmış ardından da yorulmuştur. Bu işlem ardından eskimiş/yorulmuş beton kaplamaların ince asfalt kaplama ile iyileştirilmesi aşamasına geçmiştir.

2.3.1. Asfalt Kaplama Öncesi Çalışmalar

İyileştirme çalışmaları öncesi, mevcut yolda ciddi hasarların tamir edilmesi ve temizlik işlemlerinin yapılması gerektiği bölüm 1.6'da detaylı anlatılmıştır. Bu nedenle asfalt kaplama yapılmadan önce mevcut beton kaplama Şekil 2.32'de görüldüğü gibi kompresör ile tazyikli hava üflenerek temizlenmiş, ardından da kaplama üzerinde bulunan çatlaklar incelenmiştir. Çatlakların 1 mm'den daha geniş olması durumunda tamir işlemlerine geçilmesi planlanmıştır. Ancak mevcut çatlakların derinliği ve genişliği fazla olmadığından ciddi hasar olarak değerlendirilmemiş ve tamire gerek görülmemiştir.



Şekil 2.31. Tazyikli hava ile plaka ve derz içlerinin temizlenmesi işlemi

2.3.2. Yükleme Yapılmış 3 farklı Plağın Özellikleri

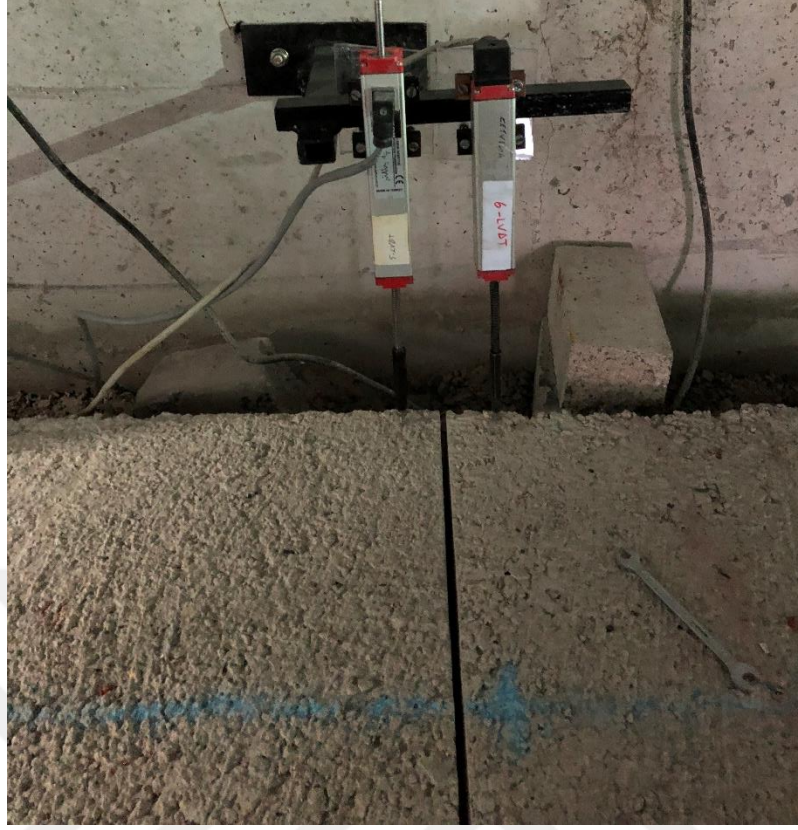
Beton plaklar yüklenerek yorulduktan sonra, farklı özellikleri araştırılacak olan 3 yarım derzin asfalt kaplama öncesi hazırlıkları yapılmıştır. Hazırlanan 3 farklı plak ve yarım derz şunlardır;

1. Yarım Derz Çelik Hasırlı: (Unsupported Reinforced Concrete Semi Joint) (US-RC-SJ): Şekil 2.32’te görülen plakların içinde hasır çelik bulunmaktadır. Derz kesimi sırasında hasır çelik kesilmemiş plaklar arasında geçiş sağlanmıştır. Hasır, Karadeniz Bölgesinde bazı beton yollarda uygulanan bir yöntemdir. Üzerine yapılacak iyileştirme tabakasına faydası araştırılacaktır. Hasır, beton plağın temel üstü 6. cm’ne yerleştirilmiştir.



Şekil 2.32. Hasır çelik donatılı plaklar ve yarım derzler

2. Boş Yarım Derz (Unsupported semi Joint) (US-SJ): Şekil 2.33’te görülen yarım derz donatısız ve güçlendirme yapılmadan (boş bırakılarak) kontrol derzi olarak kullanılacaktır. Böylelikle 0.5 cm kalınlığında 6 cm yüksekliğinde derzlerin ince asfalt kaplamada davranışı incelenecektir.



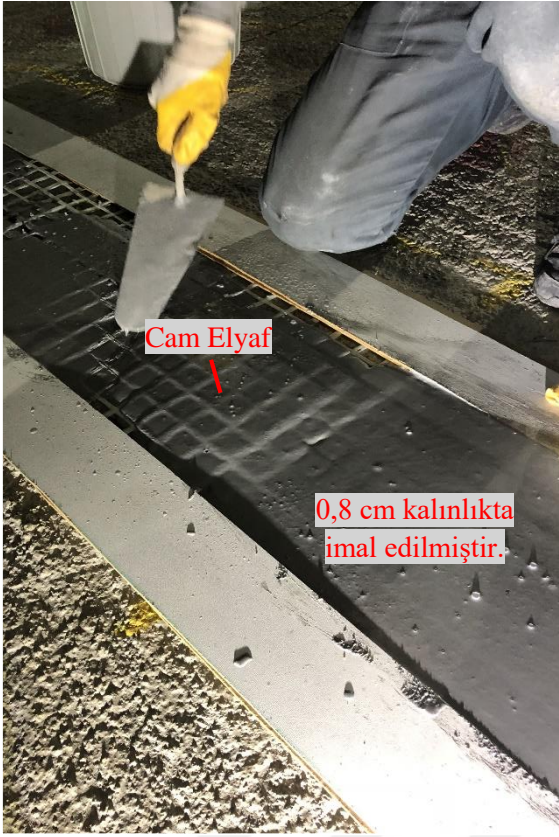
Şekil 2.33. Kontrol derzi olarak bırakılmış yarım derz

3. Fiber destekli yüksek mukavemetli harç ile güçlendirilmiş yarım derz (Concrete Support Semi Joint) (CS-SJ): Fiber ile güçlendirilmiş yüksek mukavemetli kendiliğinden yerleşen harç ile yansıma çatlakları engellenmeye çalışılmıştır. Rijit bir yapı olan bu ara yüzey elemanının imalatı Şekil 2.34, 2.35, 2.36 ve 2.37’de gösterilmiştir. Önce imal edilecek plaklarda temizlik yapılmıştır. Daha sonra 2 kg kuru harç büyük bir kovaya boşaltılmış ve yavaş yavaş toplam 180 gr su eklenmiştir. Su ekleme işlemi sırasında ucunda karıştırıcı olan güçlü bir matkap ile karıştırma işlemi düşük devirde yapılmıştır. Daha sonra bütün su harca döküldüğü andan itibaren yüksek devirde yaklaşık 10 dakika karıştırma yapılmıştır. Karıştırma süresi uzadıkça harcın akışkanlığı ve işlenebilirliği artmıştır. Belirli bir limit karıştırıldığında harç işleme hazır halde olduğunu belli etmektedir. Harç hazır olduğunda yaklaşık 2 dakika dinlenmeye alınmış, daha sonra önceden hazırlanmış 8 mm kalınlığında 25 cm genişliğinde kalıbın içine dökülmüştür. Kalıbın içine yine daha önce beton plak üzerine sabitlenmiş cam elyaf fiber yerleştirilmiştir. Altına birkaç mm. harç girdiğinde, cam elyaf basınç altında iki yönde de oluşacak çekme gerilmelerine karşı etkili çalışacak şekilde tasarlanmıştır.

Harcın boşluklardan sızıp kaybolmasının engellenmesi için gerekli yerlere kalıp imalatı yapılmıştır. Harç çok hızlı bir şekilde priz almakta olup bu süre içerisinde hızlı bir şekilde ısındığından su kaybı yaşamaması için yapıldıktan 2 saat sonra sulanmış ve her iki sulama arasında üstü muşamba ile örtülmüştür. Böylece bu uygulama yapılarak çatlamaması sağlanmıştır. Kullanılan harç Ticm marka HPM 120 olarak adlandırılan basınç dayanımı 120 MPa, eğilme dayanımı 17 MPa'ya kadar olabilen yüksek mukavemetli bir karışımdır. Cam elyaf ise TEX AR cam fileler grubu ürünlerinden AR 720'dir. 4*4 cm gözenek açıklıklarına ve 90 kN/m dayanıma sahiptir. 1.8 mm kalınlıkta ve yüksek aderans yüzey özelliğine sahiptir.



Şekil 2.34. Harç için kullanılan malzemeler Şekil 2.35. ve harcın hazırlanışı



Şekil 2.37. Harcın imalat aşaması



Şekil 2.38. Derz güçlendirme malzemesi

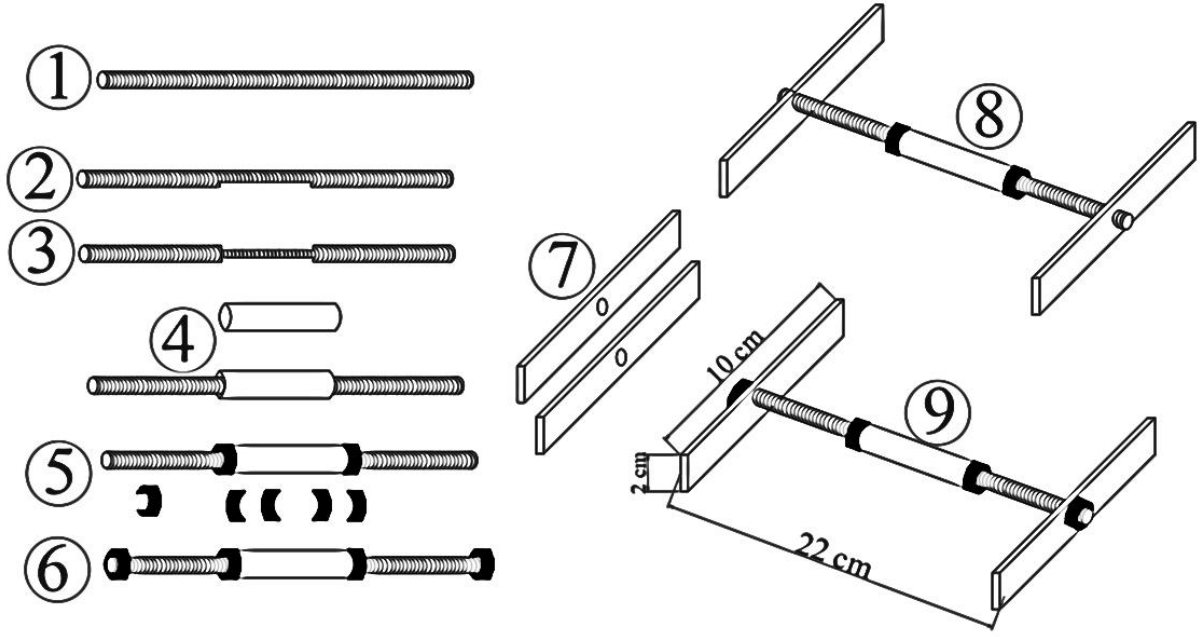
2.3.3. Ölçüm Aletlerinin Temini, Kalibrasyonu ve Yerleştirilmesi

Deneyler sırasında ölçüm alması için LVDT'ler, basınç hücreleri (pressure cell), Gerinim ölçerler (birim şekil değişimi ölçerler, Strain gauge) ve termokupllar (Termocouple) kullanılmıştır. Deney alanının büyüklüğü, plak sayısının çokluğu ve aynı anda ölçüm alınması gerektiğinden oldukça fazla sayıda ölçüm aleti asfalt kaplamanın altında kalmıştır. Gerinim ölçer ve LVDT'lerinin verilerine göre deney sonuçları oluşturulmuştur. Basınç hücreleri ve termokupllar ise deney ile ilgili faktörlerin belirlenmesi için kullanılmış ve gerekirse elde edilen verilerin daha ayrıntılı yorumlanmasını sağlamıştır.

2.3.3.1. Gerinim Ölçerlerin Hazırlanması

Gerinim ölçerlerden, alınan veriler deneyin en önemli kısımlarından birini oluşturmuştur. Bu çalışma genelinde benzer çalışmalarda kullanılan ve asfalt için uygun olan H tipi gerinim ölçerler kullanılmıştır [177]. Ancak 160 C° sıcaklıkta imal edilen termoplastik

viskoelastik bir malzeme olan asfalt kaplamaya uygun H tipi gerinim ölçerlerin fiyatları yaklaşık 600 \$ (KDV hariç) civarındadır. Bu fiyat kullanılacak gerinim ölçer sayısı ile çarpıldığında 60 bin TL'yi aşmaktadır. FDOT'un (Florida Department of Transportation) önceki çalışmalarından elde ettiği tecrübelerle göre kaplama inşaat sırasında gerinim ölçerlerin yaklaşık %70 sağlam kalabildiğini, sağlam kalanların ise bir kısmının deneyler sırasında kullanılmaz hale geldiğini belirtmiştir [178]. Bu nedenle çalışma sırasında gerinim ölçerlerin kesilmesi veya bozulması gibi sıkıntılar nedeniyle yedek olarak da temin edilmesi gerekmektedir. Asfaltın içine gömülecek olan gerinim ölçerlerin deney sırasında kesilmesi veya deney bittikten sonra çıkartılırken kesilmesi durumunda tekrar kullanılamıyor olması genel laboratuvar maliyetini biraz daha arttırmaktadır. Gerinim ölçerlerin Amerika veya Japonya gibi uzak ülkelerden geliyor olması ve birkaç tane ihtiyaç olması durumunda bile ölçüm cihazının en az bir ay beklenmesi gibi durumlar oluşmaktadır. Bu olumsuz durumlar nedeniyle farklı çözümlerin üretilmesi ihtiyacı doğmuştur. Buna göre internette farklı marka asfalt için gerinim ölçerler incelenmiş, literatürde yapılan deneylere göre memnuniyet bilgisi elde edilmiştir. Hatta konu ile ilgili çalışmış yabancı araştırmacılara e-mail yoluyla ulaşılarak yorumları alınmıştır. Daha sonra Rize Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Öğretim Görevlisi Tuba KÜTÜK SERT'e ait Karadeniz Teknik Üniversitesinde doktora tezi sırasında kullandığı Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd firmasına ait olan gerinim ölçerlerden çalışmayan bir tanesi titizlikle açılmıştır. Açılan gerinim ölçerinin parçaları dikkatlice incelenmiştir. Daha sonra Jewel Instruments firmasına ait Dynamic Asphalt Strain Gauge ASG-3000-HT adlı modele ait dokümanlara ulaşılarak detaylı incelenmiştir. Bu iki üründen yola çıkarak gerinim ölçer yapılması için çalışmalar başlatılmıştır. İlk örnek model Şekil 2.38'da görüldüğü gibi oluşturulmuştur.



Şekil 2.39. İlk planlanan gerinim ölçerin çizimleri

Gerinim ölçerler KTÜ yapı ve ulaşım laboratuvarları imkanları kullanılarak üretilmeye başlanmıştır. Şekil 2.39, 2.40 ve 2.41’de geliştirilen gerinim ölçerin yapım aşamaları görülmektedir. Oluşturulan modeller, 3 aşamalı testten geçmiştir. İlk test Şekil 2.42 ve 2.43’te görülen kalıp içerisine önce biraz asfalt malzeme sonra gerinim ölçer yerleştirilmiş daha sonra üzerine tekrar asfalt koyularak yapılmıştır. Pullout testi düzeneğinde bu kalıp içerisinde, asfalt sıkıştırılmıştır. Daha sonra kalıptan sökülerek yine pullout düzeneğinde kontrollü basınca tabi tutulmuştur. İkinci test olarak Şekil 2.44 ve Şekil 2.45’de görüldüğü gibi el ile hazırlanan asfalt içinde gerinim ölçer ile birlikte araç yüküne tabi tutulmuştur. Bu iki test düzeneğinde yaklaşık 6 farklı model tasarlanmıştır. Her bir model bir önceki modelin aksaklıkları giderilerek geliştirildiğinden en sonunda elde edilen model deneyler sırasında kullanılacak modelin olduğu düşünülmüştür. Bu model Şekil 2.46, 2.47, 2.48 ve 2.49’de görüldüğü gibi belediyenin asfalt kaplama yaptığı iki farklı noktada arazide denenmiştir. Şekil 2.50’de Trabzon Havaalanı yolunda açık trafikte gerinim ölçerlerin aldığı veriler takip edilmiştir. Burada elde edilen sonuçların Öğretim Görevlisi Tuba KÜTÜK SERT’in doktora tezi çalışmaları sırasında arazide aldığı sonuçlara ve diğer literatür sonuçlarına yakın olduğu görülmüş ve bu şekilde HYT testinden kullanılabilmesine karar verilmiştir.



Şekil 2.39 Gerinim ölçer yapımı

Şekil 2.40. Asfalt gerinim ölçer bitmiş hali



Şekil 2.41.Özel kalıp ve pullout düzeneği

Şekil 2.42. Kalıpta gerinim ölçer denemesi



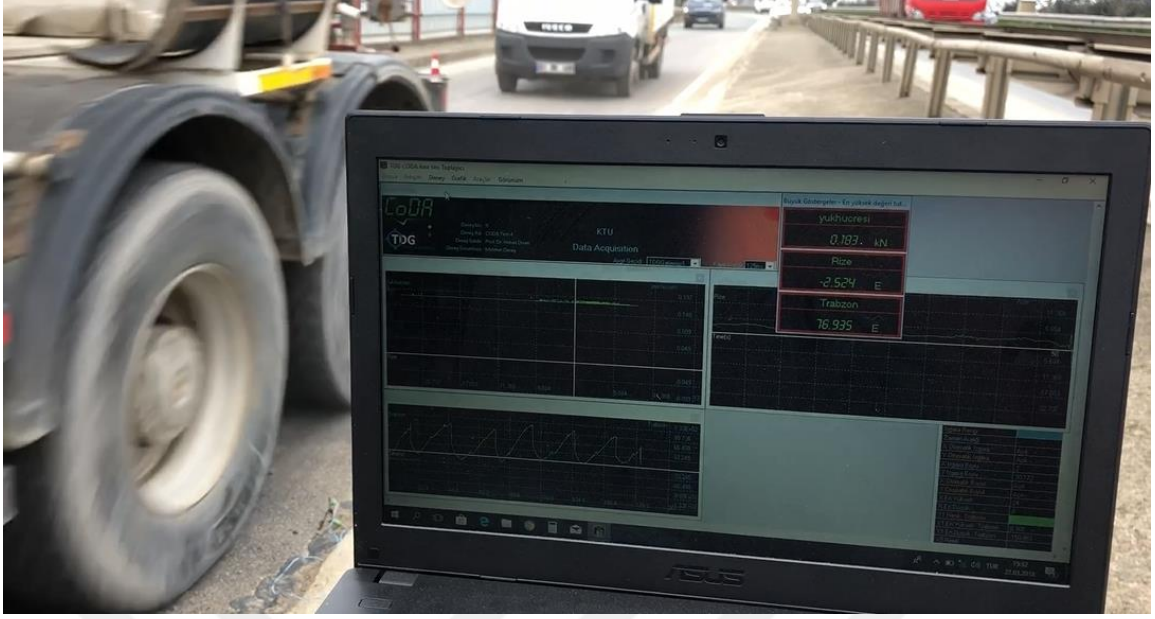
Şekil 2.43. Pullout test düzeninde deneme Şekil 2.44. Araç altında deneme



Şekil 2.45 Cihazların yerleştirilmesi Şekil 2.46. Finişer ile asfalt dökümü



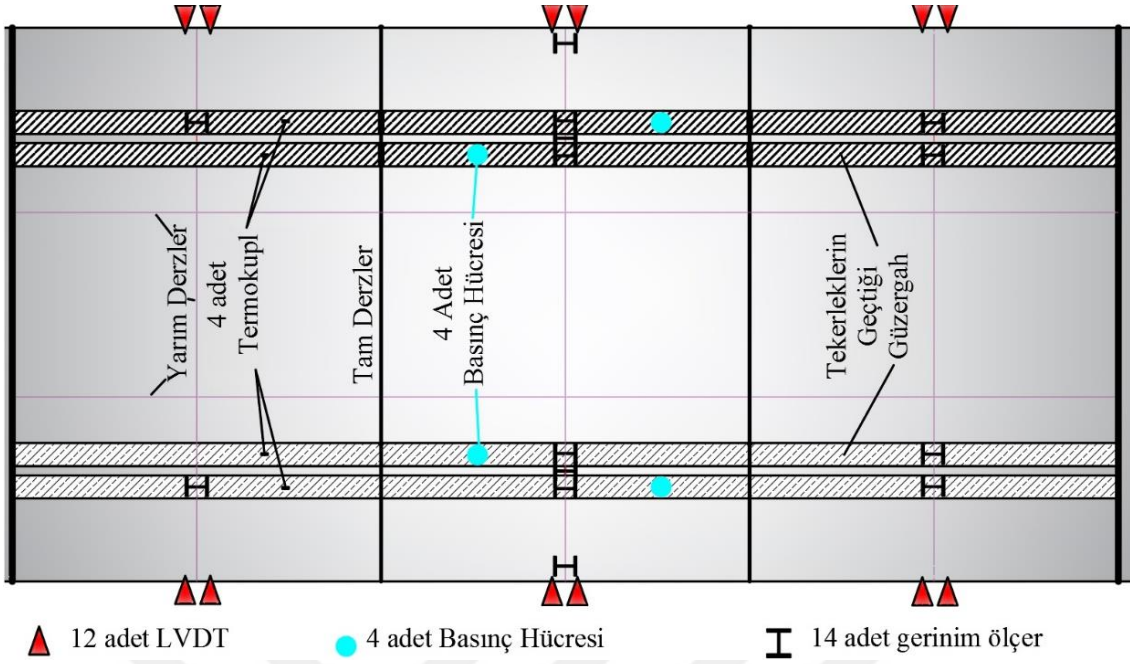
Şekil 2.47. Gerinim Ölçerler Şekil 2.48. Havaalanı yol ayrımında gerinim ölçerler



Şekil 2.49. Havaalanı yolunda işlek trafikte yerleştirilen gerinim ölçerlerin değer okuması

Asfalt kaplama için üretilen gerinim ölçerlerin içerisinde Tokyo Sokki marka metal harç veya kaya üzerine yapıştırılabilen, 10 mm uzunluğunda, 300 Ω dirence sahip, 100 C° sıcaklıklara kadar dayanıklı olan modeli kullanılmıştır.

Gerinim ölçerlerin üretilerek hazır edilmesi işleminden sonra, plaklarda asfalt altında nerelerde gerinim ölçer, basınç hücresi ve termokupl koyulacağına karar verilmesi işlemine geçilmiştir. Buna göre Şekil 2.50'de görüldüğü gibi plak üzerinde ölçüm cihazları yerleştirilmesi planlanmıştır. Tam derzlere de gerinim ölçer ve LVDT yerleştirilmiştir. Ancak bu tez konusu kapsamında sonuçları kullanılmayacağından çizime eklenmemiştir.



Şekil 2.50. Asfalt altında kalacak ölçüm cihazlarının plaklar üzerinde belirlenen yerleri

Ölçüm cihazlarının tesis içerisinde yerleştirileceği yerler Şekil 2.51’de görüldüğü gibi işaretlenmiştir. Bu işaretleme işlemi daha sonra Şekil 2.52’de görüldüğü KTÜ üniversitesi Jeodezi Mühendisliği bölümü tarafından hassas cihazlar ile ölçülendirilmiştir. Böylelikle asfalt serimi ve sıkıştırması işleminden sonra cihazların nerede olduğu konusunda net bilgiye sahip olunması sağlanmıştır. Gerinim ölçerler birinci derzde bir tane dış tekerlek altına, 2. derzde ise iki tekerleğin altına gelecek şekilde yerleştirilmiştir. Ayrıca iki tekerleğin tam arasına da bir tane yerleştirilmiştir. Aynı derzde LVDT’ye yakın kısma da bir tane gerinim ölçer yerleştirilmiştir. 3. Derzde ise tekerlek altına birer tane olmak üzere 2 tane gerinim ölçer yerleştirilmiştir.



Şekil 2.51. Ölçüm cihazlarının yerlerinin işaretlenmesi

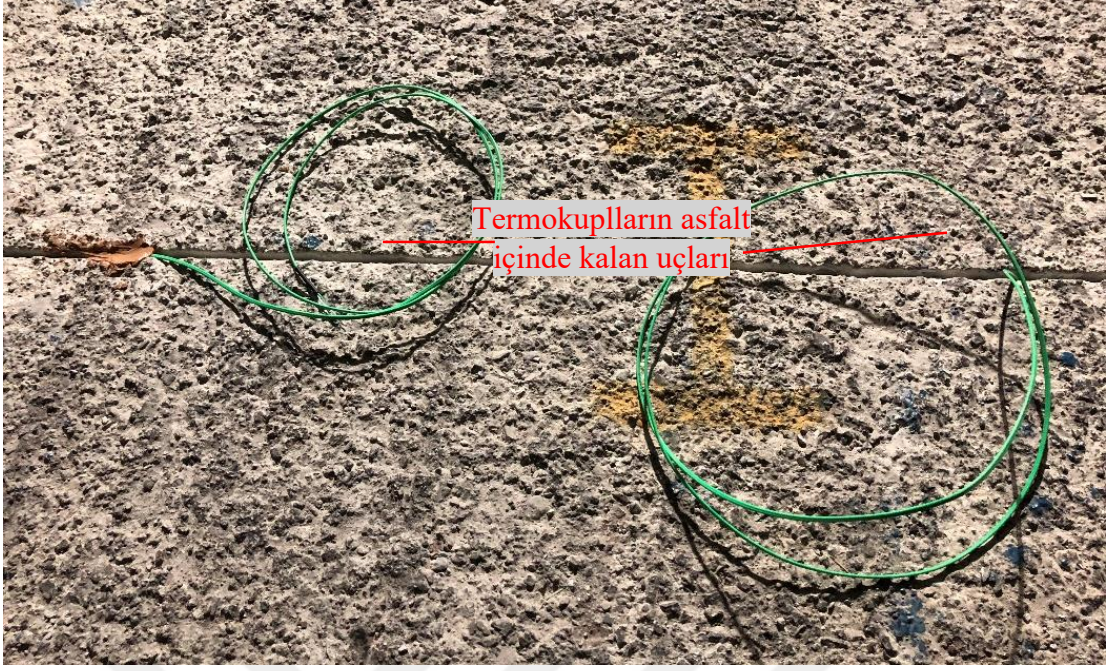


Şekil 2.52. Ölçüm aletlerinin yerlerinin hassas aletler ile tespiti

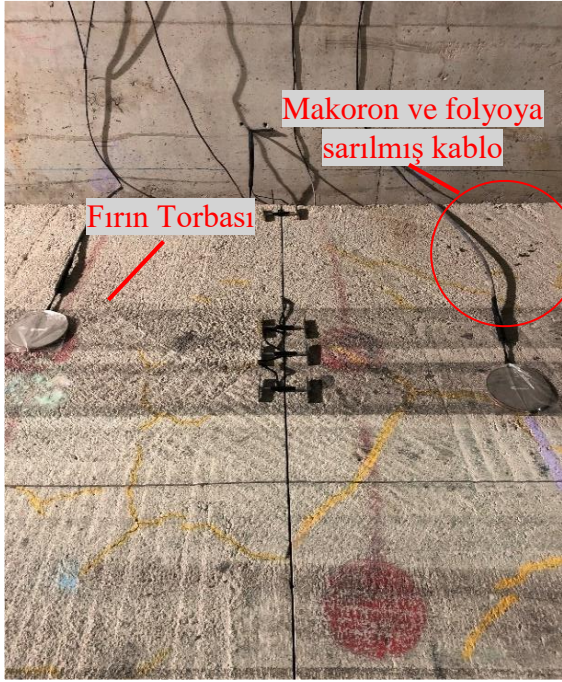
Asfalt kaplama yapılmadan önce Şekil 2.53 ve 2.54'te görüldüğü gibi beton ile asfalt arasına (Asfaltın içinde kalacak şekilde) gerinim ölçerler, basınç hücreleri ve termokupllar yerleştirilmiştir. Asfalt 160 ° C civarında döküldüğü için sıcaklıkla ilgili önlemler alınmış kablolar sıcaklığa dayanıklı folyolara sarılıp makoron içerisine sokulmuştur. (Şekil 2.55-56)



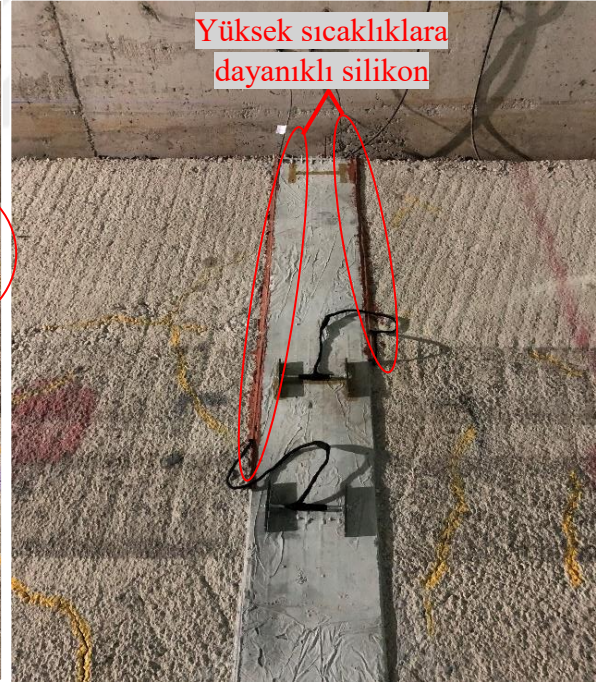
Şekil 2.53. Asfalt içinde kalacak bütün ölçüm cihazları yerleştirildikten sonraki hali



Şekil 2.54. Asfalt içine yerleştirilen termokupullar



Şekil 2.55. Ölçüm Cihazları



Şekil 2.56. Sıcak Asfalt için alınan önlemler

2.4. Asfalt Kaplama Yapımı

Asfalt kaplama ile ilgili hazırlıklar bittikten sonra, Trabzon Büyükşehir Belediyesi tarafından üretilen asfalt yine TRBB ekip ve ekipmanı ile HYT tesisine dökülmüştür. Döküm esnasında Şekil 2.57.'ta görüleceği gibi yükleme sistemi HYT tesisi dışarısına çıkartılmıştır. Asfalt kaplama imalatından önceki gün tesis duvarlarına kotlama yapılmıştır (Şekil2.58). Asfalt yapımı işlemi ile ilgili detaylı fotoğraflar Şekil 2.59, 2.60 ve 2.61'te görülmektedir. Asfalt dökümü sırasında asfalt içinde kalacak deney aletleri itina ile yerleştirilmiştir. Gerinim ölçerler ve basınç hücreleri alt kısmına çok az bir asfalt tabakası hazırlandıktan sonra üzerine yerleştirilmiş daha sonra ana asfalt kütle yerleştirilmiştir. Tesisin içerisine finişer giremediğinden, yama yapımında kullanılan robot adı verilen makine ile asfalt dökülmüştür. Sıkışma işlemleri de itina ile yapılmıştır. Sıkıştırılmış hali ile yamaç (orman) tarafı güzergâh 5 cm. (sıkışmamış 7 cm.) asfalt ile kaplanmış, kapı tarafı ise 8 cm. (sıkışmamış 10 cm.) asfalt ile kaplanmıştır.



Şekil 2.57. Asfalt kaplamanın yapımı için sistemin dışarıya çıkarılması



Şekil 2.58. Asfalt kalınlığını ayarlamak için sabit duvara yapılan kotlama çalışması



Şekil 2.59. Robot ile asfalt dökümü sırasında ölçüm cihazlarına özen gösterilerek yapılan çalışma



Şekil 2.60. Tesisin içerisine asfalt kaplama yapımı



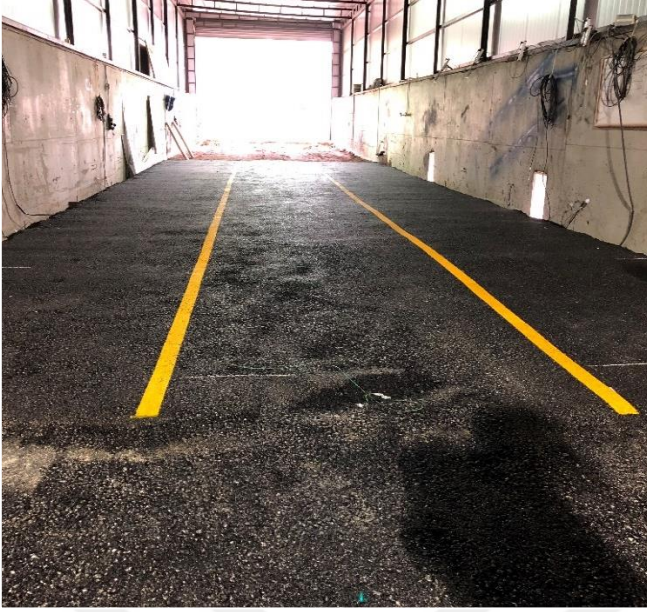
Şekil 2.61. Tesisin içerisinde asfaltın sıkıştırılması

TRBB tarafından üretilen ve HYT tesisine serme sıkıştırması yapılan asfalt Belediyenin Trabzon İli genelinde mahalle yollarında aşınma tabakası olarak kullandığı asfalt kaplamasıdır. Asfaltın özelliklerini detaylı anlatan ve granülometre özelliklerini veren veri föyü 1. ek olarak ekler kısmında verilmiştir. Tesise yaklaşık 3 km uzaklıkta bulunan asfalt plantinden 163 ° C sıcaklıkta üretilen asfalt tesise belediye araçları ile getirilmiştir. Gelen asfaltta kullanılan bitümün penetrasyon değeri 50-70 aralığındadır. Asfalt kaplama içerisinde bitüm oranı %5 civarındadır. Kullanılan agregaya ait granülometre aşağıda Tablo 2.3'te verilmiştir.

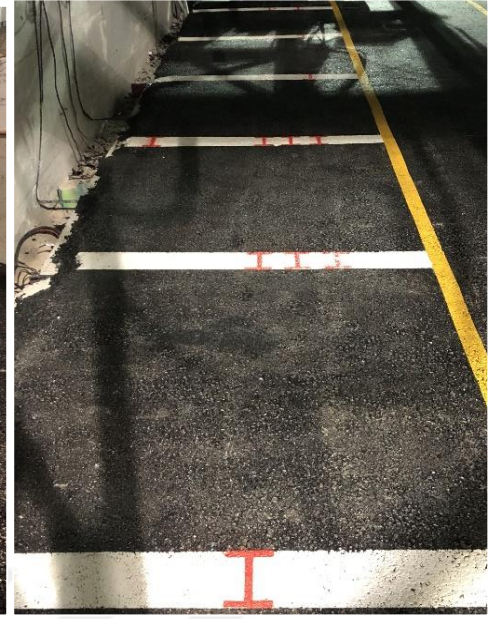
Tablo 2.3. Tesise gelen asfaltın granülometresi

| Elek Boyutları | EKSTRAKTÖR ANALİZ SONUÇLARI | | | İşyeri Karışım Gradasyonu |
|------------------|------------------------------------|-----------------------------------|------------------|---------------------------|
| | Her elek üzerinde toplu kalan (gr) | Her elek üzerinde toplu kalan (%) | Toplu geçen % si | |
| 1" (25.0mm) | | 0,0 | 100,0 | 100,0 |
| 3/4" (19.0mm) | 0,0 | 0,0 | 100,0 | 100,0 |
| 1/2" (12.5mm) | 135,0 | 8,4 | 91,6 | 92,0 |
| 3/8" (9.5mm) | 330,0 | 20,5 | 79,5 | 75,6 |
| No:4 (4.75mm) | 693,0 | 43,1 | 56,9 | 45,4 |
| No:10 (2.00mm) | 1057,0 | 65,8 | 34,2 | 30,1 |
| No:40 (0.425mm) | 1382,0 | 86,0 | 14,0 | 13,5 |
| No:80 (0.180mm) | 1442,0 | 89,7 | 10,3 | 9,9 |
| No:200 (0.075mm) | 1483,0 | 92,3 | 7,7 | 5,2 |

Asfalt kaplama tamamlandıktan ve soğuduktan sonra Şekil 2.62 ve 2.63'te görüleceği gibi derzler üzerine şeritler çizilmiştir. Buna göre sarı şeritler boyuna derzler beyaz şeritler ise enine derzleri göstermektedir. Kullanılan boya asfalt kaplamalar için üretilmiş ve üzerinde trafik geçişleri olmasına rağmen kalıcı boya türüdür. Beyaz şeritler üzerinde çatlaklar beklenmektedir. Asfalt kaplama altında kalan ölçüm cihazlarının yerleri, daha önce alınan ölçümler vasıtasıyla ve Şekil 2.64'te görüldüğü gibi donatı tespit cihazı ile yapılmıştır. Böylelikle koordinat sistemi ile işaretlenmiş ölçüm cihazlarının yeri asfalt serme sıkıştırma sırasında değişip değişmediği incelenmiştir.



Şekil 2.62. Asfalt kaplama sonrası



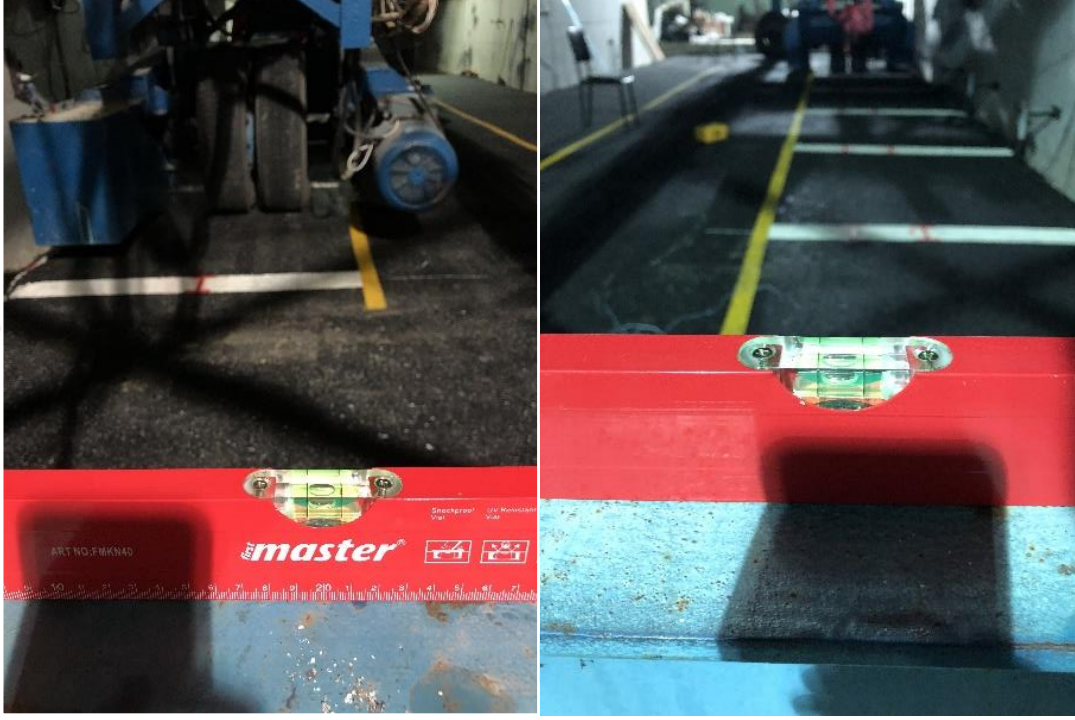
Şekil 2.63. Asfalt üstü işaretlemeler



Şekil 2.64. Donatı bulma cihazı ile asfalt içinde ölçüm cihazlarının yerinin bulunması

Asfalt kaplamanın yapım işi bitirildikten sonra sistem yerine alınmış ve yükleme öncesi son düzenlemeler yapılmıştır. Öncelikle sistemin düzgün çalışabilmesi için birkaç

yönden teraziye alınması işlemi gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.65 ve 2.66). Daha sonra kolonlarının altına destekler koyulmuş, hareket tekerleri yön değiştirilmiş ve havaları indirilmiştir.



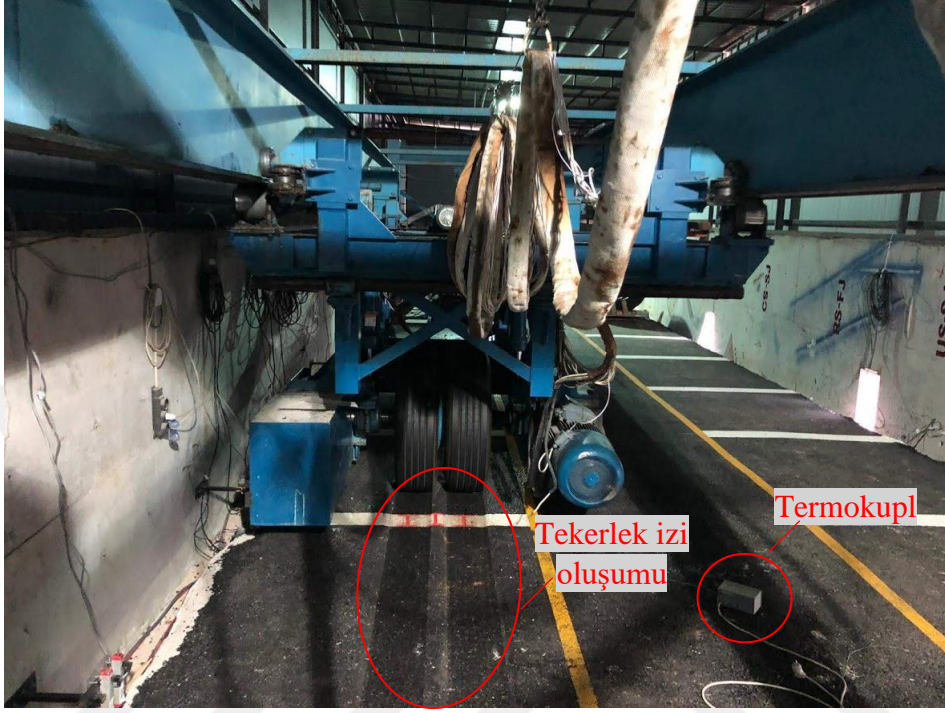
Şekil 2.65. Doğu tarafından denge işlemi Şekil 2.66. Batı tarafından denge işlemi

2.5. Asfalt Kaplama Yorulması

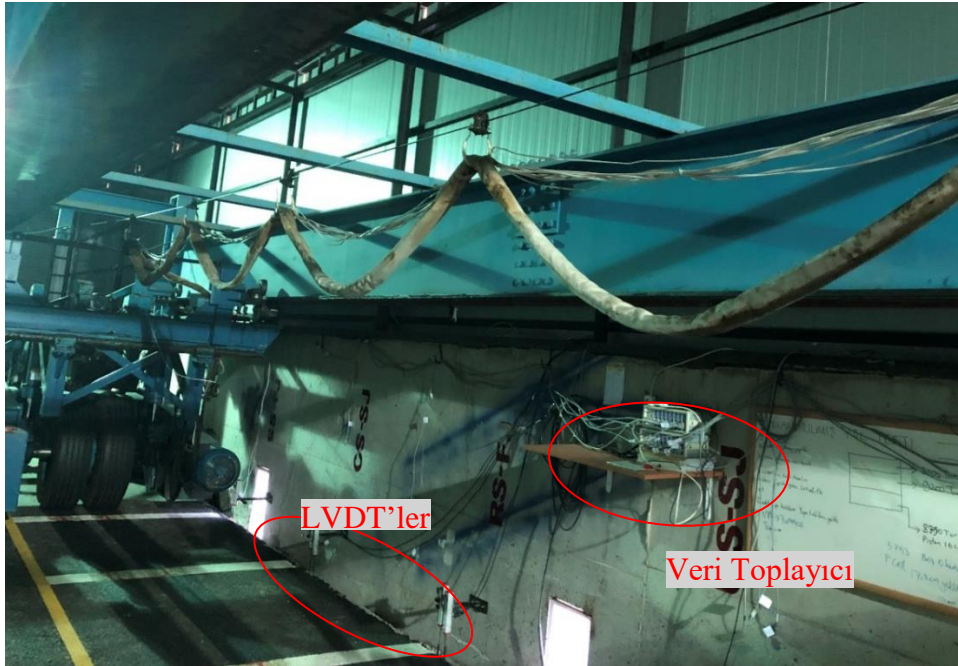
Yorulmuş beton kaplama üzerine asfalt kaplama yapıldıktan sonra, asfalt kaplama üzerine yükleme işlemine geçilmiştir. Yükleme her güzergâh için ilk günlerde 1,000 geçiş ile başlamış ilerleyen günlerde 3,000 geçişe kadar artmıştır. İlk günlerde birim şekil değiştirme değerleri hızlı değişirken bir süre sonra değişim azaldığından böyle bir yöntem uygulanmıştır.

Yükleme ilk olarak 2018 yılı Mayıs ayı içerisinde kuzey tarafta bulunan güzergâhta başlamıştır. Ancak çalışmanın ek kısmında bir başlık olarak verilecek olan çeşitli aksaklıklar nedeniyle yüklemeler sık sık durmak zorunda kalmış ve 100 bin yükleme Aralık 2018 tarihinde bitirilmiştir. Güney tarafta bulunan güzergâh ise Ocak 2019 tarihinde başlatılmış ve Şubat 2019 tarihinde 100 bin yükleme sayısına ulaşılmıştır (Şekil 2.67, 2.68, 2.69).

Yükler beton plakta olduğu gibi tek tekerde 32 kN olmak üzere toplamda 64 kN olarak uygulanmıştır ve yükleme hızı 3 km/saat olarak ayarlanmıştır.



Şekil 2.67. Beton üstü ince asfalt kaplama güney tarafı yükleme çalışmaları



Şekil 2.68. Beton üstü ince asfalt kaplama kuzey tarafı yükleme çalışmaları



Şekil 2.69. Yüklemelerin son aşamaları

2.5.1. Asfalt Kaplamadan Alınan Ölçümler

Asfalt kaplama imal edildikten sonra çeşitli ölçümler alınarak yükleme sayısı ile birim şekil değiştirme, tekerlek izi oluşumu ve düşey deplasmanlar ölçülmüştür. Bu kapsamda yüklemeler sırasında yapılan ölçümler ve gözlemler şunlardır:

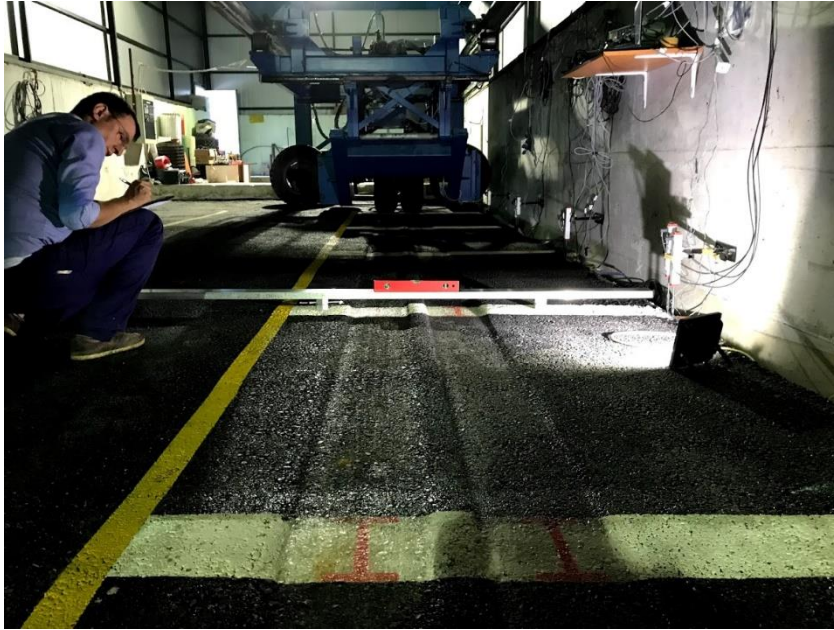
2.5.1.1. Tekerlek İzi Oluşumu Takibi

Asfalt kaplama yüklenmesi sırasında tekerlek izi oluşumları yaşanmaktadır. Bu nedenle bu çalışma kapsamında da tekerlek izleri ölçülmüştür. Tekerlek izi ölçümlerine referans olması için ve asfalt kaplama üzerinde oluşabilecek tekerlek izi hasarlarının hassas tespiti için KTÜ Jeodezi Mühendisliği bölümünden getirilen ölçüm cihazları ile yol kot okumaları yapılmıştır. Bu okumaların yapıldığı yerler işaretlenmiş ve belirli aralıklarla

okumalar tekrar edilmiştir. (Şekil 2.70) Ayrıca tekerlek izinin oluşum şekilleri belirlenebilmesi ve takibi için her güzergahta 10 bin yüklemde bir incelemeler yapılmıştır (Şekil 2.71).



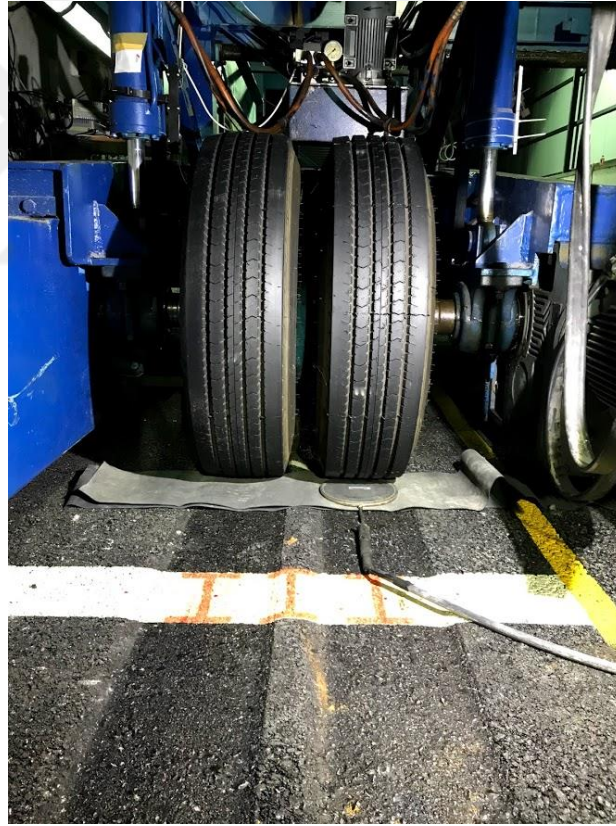
Şekil 2.70. Tekerlek izi oluşumlarının takibi için alınan hassas ölçümler



Şekil 2.71. Tekerlek izi oluşumunun ölçümü ve şeklinin belirlenmesi

2.5.1.2. HYT Tesisinin Yük Değerinin Basınç Hücresi ile Takibi

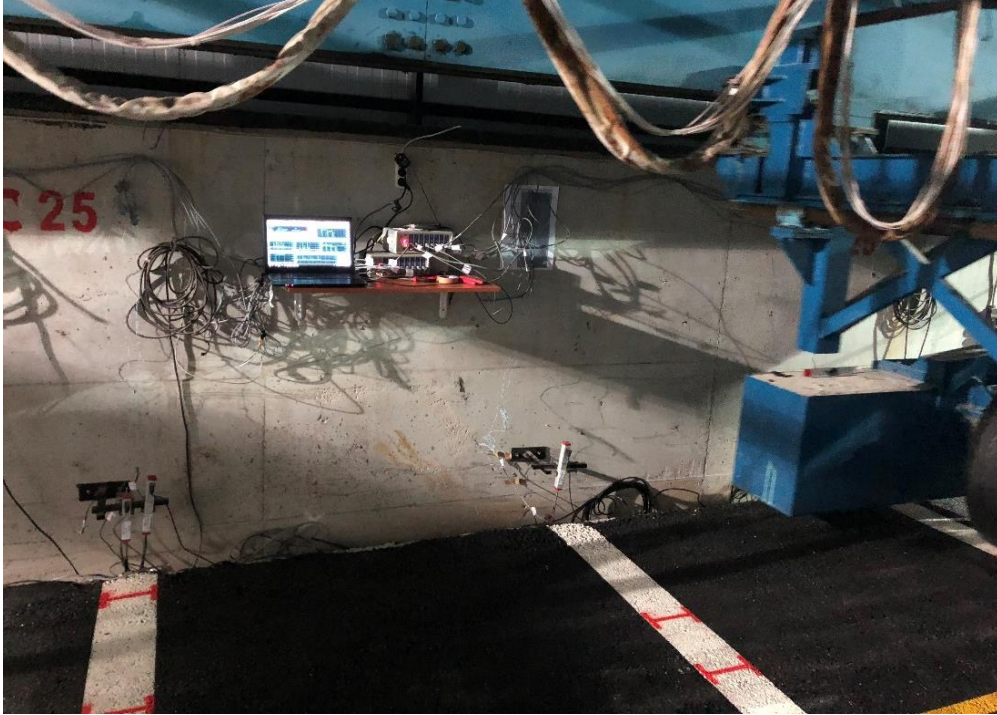
HYT Tesisinde yüklenecek yük 64 kN'a ayarlanmış ve yüklemeler bu şekilde başlamıştır. Ancak zamanla oluşan deformasyonlar nedeniyle gerek kaplama üzerinde alınan basınç hücresi ölçümlerinde gerekse asfalt içinde gömülü bulunan basınç hücrelerinin değerinde değişmeler olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle Şekil 2.72'de görüldüğü gibi yük belirli aralıklar ile takip edilerek yüzeyde 64 kN olacak şekilde piston ile düzenlemeler yapılmıştır. Yüklemelerden kaynaklı ileri derece sıkışma ve tekerlek izleri nedeniyle asfalt içerisinde bulunan basınç hücrelerinde farklı değer okumaları da tespit edilmiştir. Basınç hücreleri değerleri okunurken asfalt içinde ve ortamda ölçülen sıcaklık değerleri de kayıt edilmiştir.



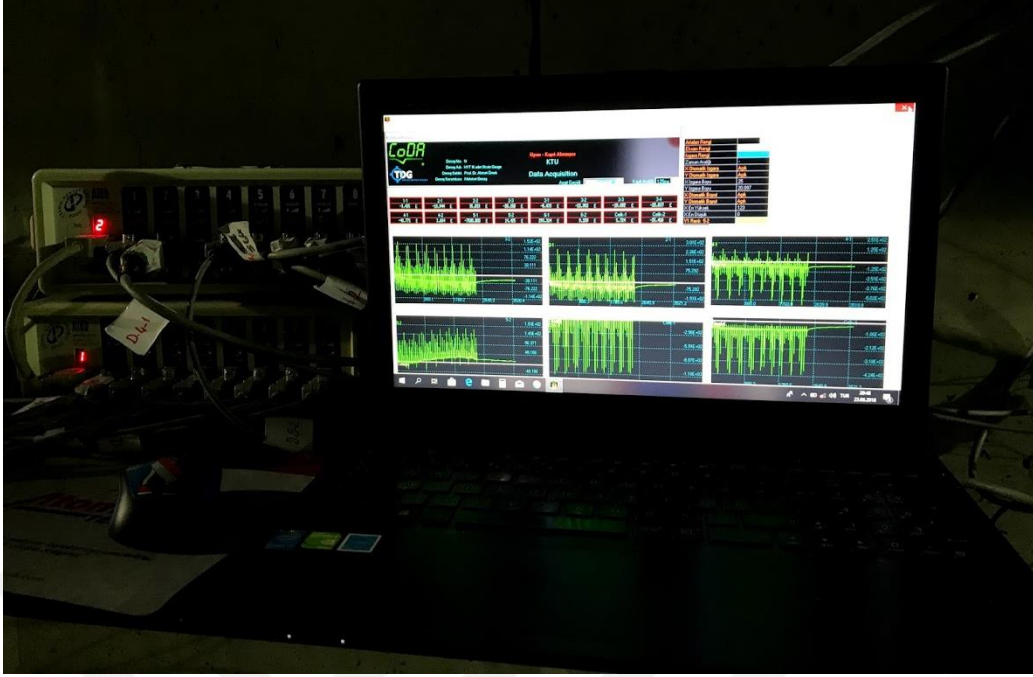
Şekil 2.72. Basınç hücreleri ile hem yüzeyde hem de asfalt içinde oluşan basınç gerilmelerinin ölçülmesi.

2.5.1.3. Gerinim Ölçerlerin ve LVDT'lerin Değerlerinin Takibi

Sistemin yüklenmesi esnasında, daha önce yerleştirilmiş gerinim ölçerlerden ve plak kenarında bulunan LVDT'lerden değerlerin okunması işlemine geçilmiştir. Gerinim ölçerlerin yükleme başladığında, 6,000, 7,000, 8,500, 11,500, 15,000, 20,000, 25,000, 30,000, 50,000, 70,000, 100,000 yüklemelerde değerleri okunmuştur. Değerlerin okunması sırasında ortamın ve asfalt içinin sıcaklığı da kayıt edilmiştir. LVDT değerlerinin ise gerinim ölçerler kadar sık okunmasına gerek görülmemiş yükleme başladığında ortasında ve sonunda okunma yapılmıştır. Şekil 2.73 ve 2.74'te yüklemelerde yapılan okuma çalışmaları görülmektedir.



Şekil 2.73. Veri toplama cihazı ile birim şekil değiştirme verilerinin kayıt edilmesi



Şekil 2.74. Deneyler sonunda veri toplama cihazının ekranı

2.5.1.4. Ultrasonik Tomografi Cihazı ile Ölçüm Alınması

Daha önce beton kaplama yorulma işlemleri sırasında KTÜ Jeofizik Bölümünde buluna Ultrasonik Tomografi (UT) cihazı ile beton kalınlığı boyunca ölçüm alınmaya çalışılmış fakat başarılı olunmamıştır. Ancak yapılan araştırmalar da Zimer Mühendislik adında özel bir firmada daha gelişmiş UT cihazı olduğu öğrenilmiş, ve firma HYT tesisine çağırılmıştır. Firma asfalt kaplamalarda derz üzerinde derinlemesine çatlak ölçümü yapabilmek için Şekil 2.75'te görüldüğü gibi ölçüm almış ancak bu cihazdan da istenilen sonuçlara ulaşamamıştır.



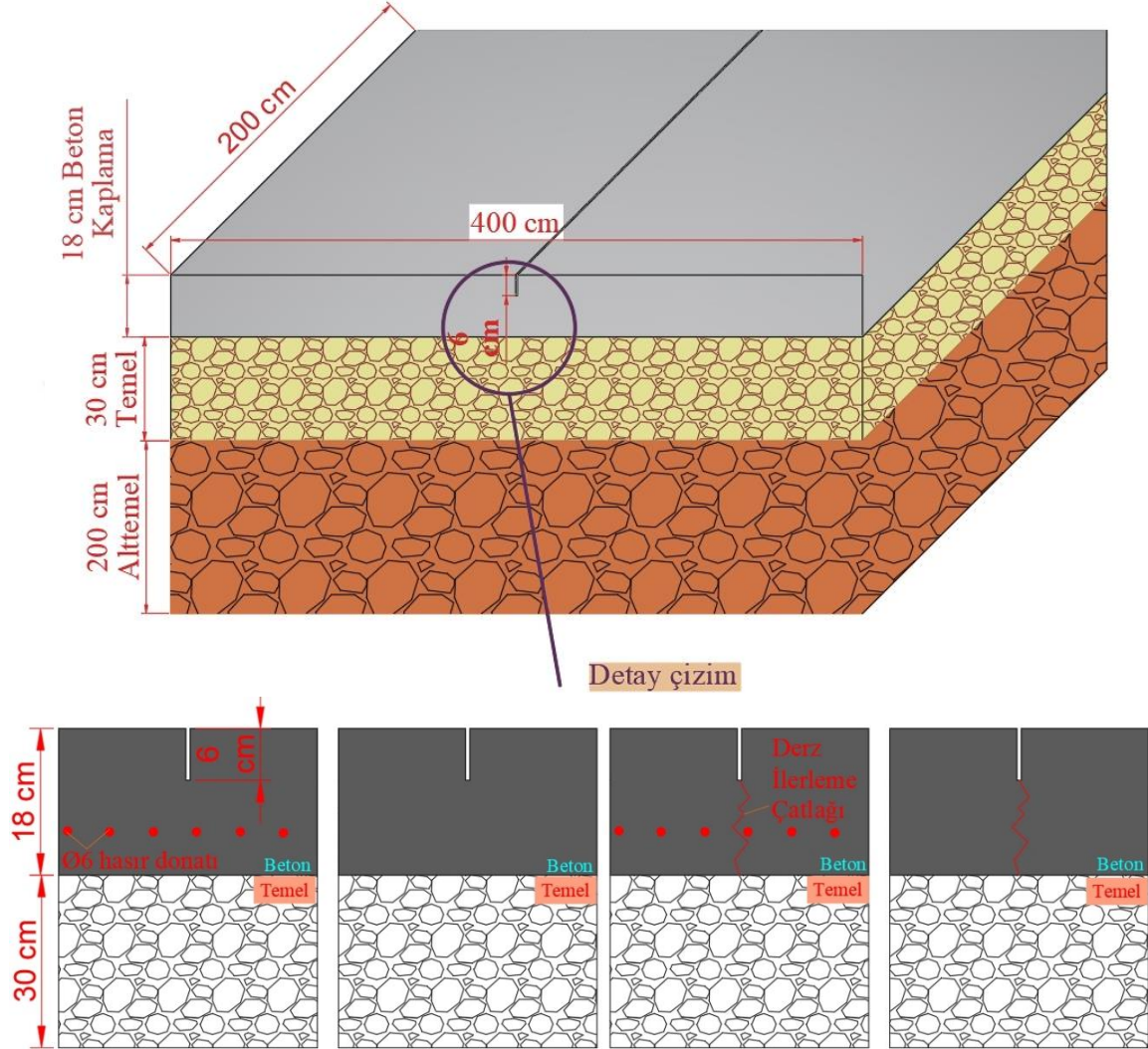
Şekil 2.75. Zimer Mühendislik'e ait UT cihazı ile asfalt kaplamada ölçüm alınması

2.6. Sonlu Eleman (SE) Metodu Modelleri Oluşturulması

Beton ve asfalt kaplamalar yükleme yapılması esnasında sonlu eleman metodu ile yapılan çalışmaların modellerinin geliştirilmesi için çalışmalar başlatılmıştır. Böylelikle mekanistik-ampirik çalışmalarda elde edilecek verilerinin sonuçları SE'dan elde edilecek veriler ile karşılaştırılarak SE sonuçların doğruluğu kontrol edilmiştir. SE sonuçların güvenilirliği sağlandıktan sonra, ME çalışmalarında tespit edilmesi imkânsız veya zor olan değerler SE analizlerinden tespit edilmiştir. Örneğin plak alanında gerilmelerin dağılımı, çatlakların plak altında ilk başlangıç yerleri gibi veriler SE ile yapılan analizlerden alınmıştır.

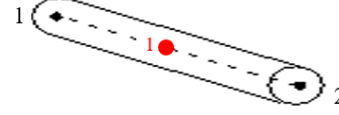
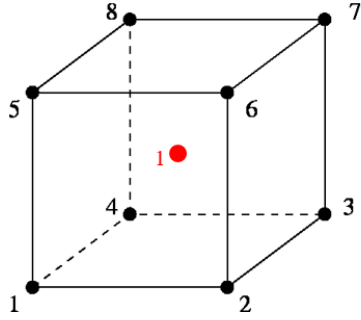
Çalışma için tasarlanan SE modeli 3 boyutlu ABAQUS version 6.12 kullanılarak hazırlanmıştır [179]. Beton plak modelleri doğrusal olmayan (nonlinear) analizler ile çözülmüştür. SE analizleri olarak beton plakların yorulma işlemi modellenmiştir. Beton kaplamanın plak ölçüleri, kalınlık 18 cm, eni boyu 400*200 cm ve ortasından yarım derz geçecek şekilde girilmiştir. Beton kaplama için Şekil 2.76'da hazırlanan modellerin derz detayları görülmektedir. Modellerden biri hasır donatıya sahip model, diğeri ise donatısız

haldedir. Önce bu iki model hazırlanmış sonra aynı modellere yarım derz ilerleme çatlakları koyulmuştur.



Şekil 2.79. Beton kaplama için hazırlanan 4 farklı model

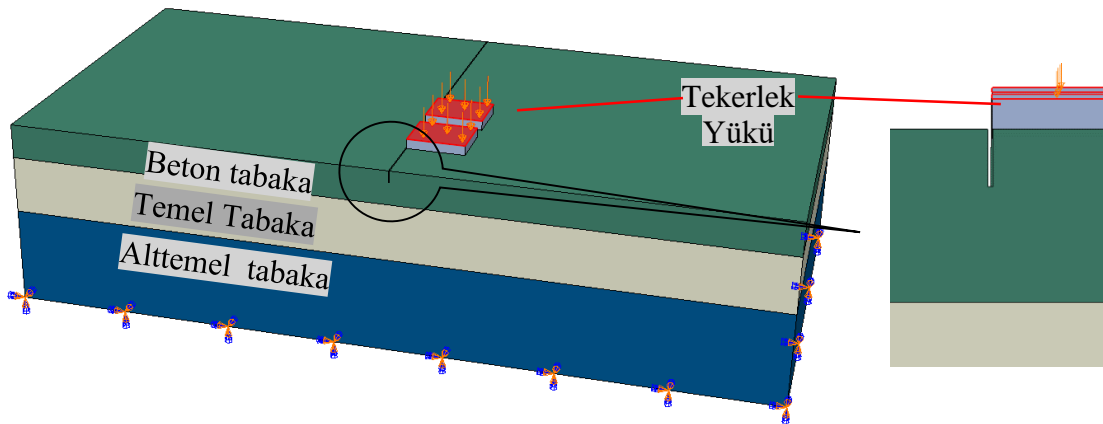
Beton yollarda bulunan yarım derzlerin ve yarım derzlerde yüklerden dolayı oluşan derz ilerleme çatlaklarının sayısal davranışını belirlemek için üç boyutlu nonlinear sonlu eleman analizi (ABAQUS/Standard module) kullanılmıştır [179]. Beton plak, temel ve alttemel modellenmesinde C3D8R eleman tipi kullanılmıştır. Bu eleman tipi gerilme ve şekil değiştirme analizlerinde daha çok tercih edilmektedir. C3D8R eleman tipi Şekil 2.77’de görüldüğü gibi 8 düğüm noktasına sahiptir ancak azaltılmış integrasyon kullanılarak nokta sayısı 1 e düşürülmüştür [167]. Hasır donatıları modellemek için de 2 düğüm noktalı üç boyutlu doğrusal çubuk elemanları modeli olan T3D2 eleman tipi kullanılmıştır (Şekil 2.81).



Şekil 2.77. C3D8R eleman tipi

Şekil 2.78. Hasır donatı için T3D2 [167].

SE modelinde plaklar üzerine tekerlek basıncını benzeştirebilmek için ME çalışmalar sırasında tekerleklerin plağa yüklü basması sırasında kapladıkları alan ölçülmüştür. 2 tekerleğin yükü de ölçülen alana yayılı olarak Şekil 2.79'da görüldüğü gibi verilmiştir. Modelleme yapılırken asfalt, beton, temel ve alt temel tabakalarının birbirleriyle temas eden yüzeyleri arasındaki sürtünme dikkate alınarak ABAQUS yazılımında “tangential” adı ile mevcut olan katı yüzeyler arasında kullanılan özellik kullanılmıştır. HYT tesisinde alttemel altında kaya bulunmaktadır. Bu durumu idealize edebilmek için sınır koşulları olarak alttemel altı ankastre mesnet alınmıştır. Bu nedenle modelin alt kısmında bütün serbestlikler (hareketler) kısıtlanmıştır.



Şekil 2.79. SE'da oluşturulan model tekerlek basınçları ve sınır koşulları

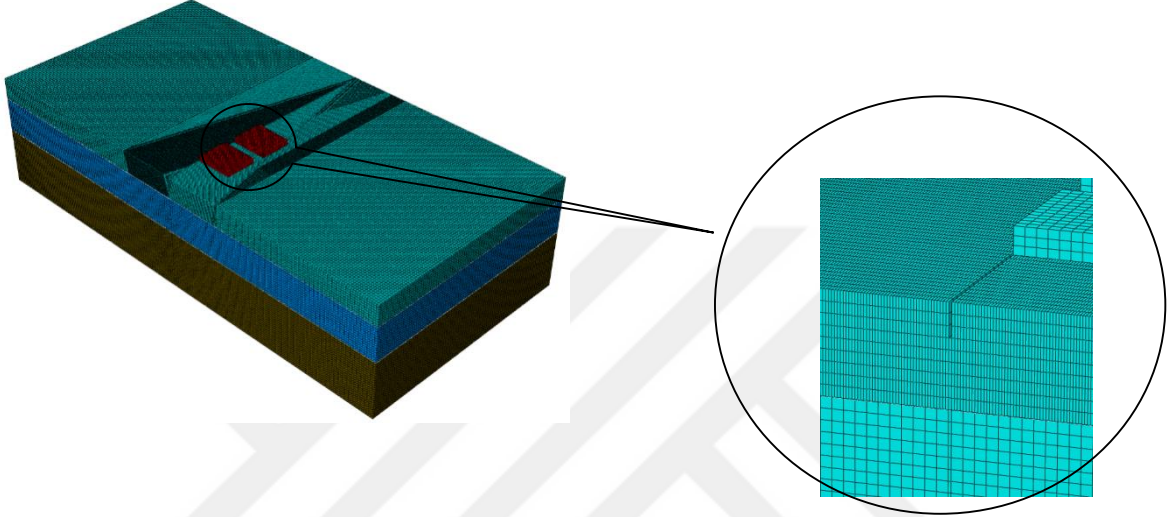
SE modellerinin temel amaçlarından biri, yarım derzlere yakın yerde oluşan çatlak oluşturan gerilmelerin tespit edilmesidir. Bu tespitin sağlanabilmesi için ve çatlak ilerlemesini/rijitlik azalmasını takip edebilmek için beton hasar plastisite (CDP-Concrete Damaged Plasticity) malzeme modeli kullanılmıştır. ABAQUS gibi sonlu eleman paket programlarına CDP modeli için tek eksenli çekme ve basınç için gerilme/birim şekil değiştirme eğrisi tanımlanması gerekmektedir. ME deneylerinde beton mukavemet özellikleri C 20/25 beton sınıfına göre kullanılmıştır. Bu nedenle SE CDP modelinde kullanılacak beton kaplama için gerilme birim şekil değiştirme eğrisi bu beton tipine göre idealize edilmiştir. Rijitlik azalması parametreleri içinde çekme ve basınçta CDP modelinin mekanistik özellikleri tanımlanmıştır.

Tablo 2.4'te CDP için belirlenen mekanik parametreler verilmiştir [180]. Zemin ve sıkıştırılmış temel malzemelerinin simülasyonu olarak en sık kullanılan model Drucker Prager modeli olduğundan bu çalışmada da pekleşen Drucker Prager modeli ile temel ve alttemel tasarlanmıştır. Temel malzemesinin elastisite modülü 800 MPa alttemelin elastisite modülü ise 250 MPa alınmıştır. Her iki temel tipi için de poisson oranı 0,3 alınmıştır [181].

Tablo 2.4. C25 beton için malzeme özellikleri ve çeşitli parametreler [180,182]

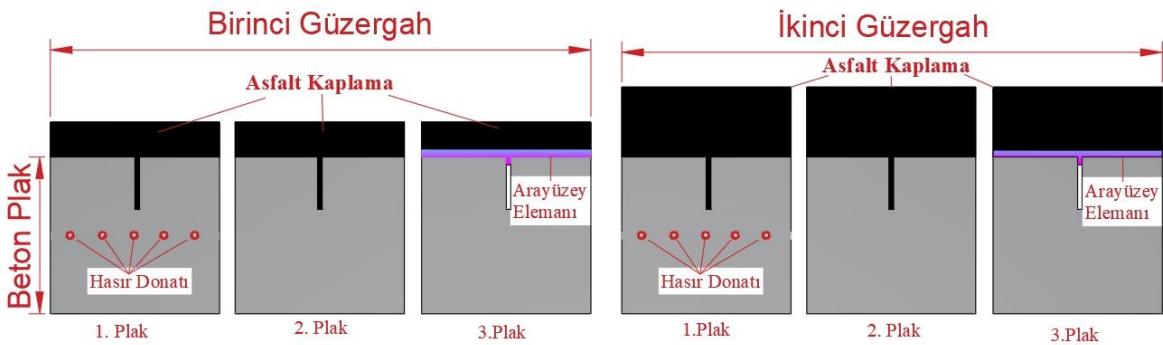
| Betonun malzeme özellikleri ve parametreleri | | |
|--|-----------------------------|--------|
| Başlangıç Elastisite Modülü | E_o (MPa) | 28000 |
| Poisson Oranı | ν | 0.2 |
| Beton Yoğunluğu | ρ (kg/m ³) | 2400 |
| Basınç Dayanımı | F_{ck} (MPa) | 30 |
| Basınçta izin verilen en yüksek gerinim | ϵ | 0.002 |
| Nihai gerinim | ϵ_u | 0.0034 |
| Çekme Dayanımı | F_{ctk} (MPa) | 1.9 |
| Dilatasyon açısı | Ψ | 36 |
| Eksantrisite | e | 0.01 |
| Çekmenin en yüksek hasar parametresi | dt | 0.99 |
| Malzeme Hasar Parametreleri (The ratio of the Second Stress Invariant on the Tensile Meridian to That on the Compressive Meridian) | K_c | 0.667 |
| Malzeme Hasar parametreleri (Ratio of Initial Equibiaxial Compressive Yield Stress to Initial Uniaxial Comp. Yield Stress) | F_{bo}/F_{co} | 1.16 |

Birkaç deneme çalışması yapıldıktan sonra SE modeli için ağ sıklığı (mesh size) seçilmiştir. Buna göre; ağ sıklığı temel ve alttemel de 20 mm, beton plakta ise 5 mm olarak belirlenmiştir. Daha sık ağ mesafesi olması analiz süresini oldukça uzatmaktadır. Ağ şekillerinin detayı Şekil 2.80’te verilmiştir.



Şekil 2.80. SE modellerinde kullanılan ağ şekli, derze yakın kısımlarda bulunan sık ağ

Şekil 2.84’de asfalt kaplama yapıldıktan sonra oluşturulan modeller görülmektedir. Asfalt kaplamaların sonlu eleman ile ilgili özellikleri olarak poisson oranı 0,35 birim hacim ağırlığı 2400 kg/m³ girilmiştir. Elastisite modülü olarak bir model için 3500-4000-5000 MPa değerleri denenmiş deneysel sonuçlara en yakın değerlerin alındığı 4000 MPa bütün modellere uygulanmıştır [183].



Şekil 2.84 SE metodu ile beton üstü asfalt kaplama modelleri

2.7. Maliyet Hesapları

Farklı derz tipleri, farklı asfalt kalınlıkları, donatılı/donatsız beton ve ara yüzey güçlendirmesi gibi farklı modellerin değerlendirildiği bu çalışma kapsamında nihai hedeflerden biride fayda maliyet ilişkisinin kurulmasıdır. Bu nedenle farklı maliyetlere sahip kompozit kaplamaların (beton üstü ince asfalt kaplamaların), beton ve asfalt kaplamalara karşılaştırması yapılmıştır. İmalatların tamamı 2018 yılında yapıldığından, bu yıla ait birim fiyatlar kullanılmıştır. Maliyet hesaplarında kullanılan pozlar KGM, MSB (Milli Savunma Bakanlığı ve ÇŞB'na (Çevre Şehircilik Bakanlığı) aittir. Ayrıca 2 adet özel poz kullanılmıştır.

Maliyet analizlerine asfalt ve beton kaplamaların maliyetleri hesaplanarak başlanmıştır. Tablo 2.5’de görüldüğü gibi AASHTO tarafından esnek ve rijit üstyapı tasarımı için ESAL’e göre kalınlık tayinleri yapılmıştır. Doğu Karadeniz Bölgesinde köy ve mahalle yolları genellikle hizmet ömrü boyunca 3-10 Milyon ESAL’in altında yüklemeye maruz kalan yollardır. Bu nedenle tablonun en düşük üstyapı kalınlıklarına göre maliyet hesabı yapılmıştır. Maliyet hesaplarının tamamı 7 metre yol platform genişliğine sahip 1 km yol için yapılmıştır. Fiyatlarda yüklenici karı ve diğer giderler eklenmiş, KDV eklenmemiştir. Aksi belirtilmedikçe nakliye bedelleri ilgili poz içerisinde bulunmaktadır.

Tablo 2.5 AASHTO 1993 ESAL sayısına göre kalınlıklar [145].

| Esnek Üstyapı | T8,2: 8,2 tonluk eşdeğer standart dingil yükü tekrar sayısı - Yolun hizmet ömrü boyunca | | | | | | | | | | |
|-------------------------------|---|--------------|------------|--------------|------------|--------------|--------------|---------------|----------------|----------------|-------------|
| Üstyapı (cm) | 3-10 Milyon | 10-20 Milyon | 20-30 Mil. | 30-40 Mil. | 40-50 Mil. | 50-65 Milyon | 65-80 Milyon | 80-100 Milyon | 100-160 Milyon | 160-250 Milyon | >250 Milyon |
| Aşınma | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Binder | 8 | 6 | 6 | 6 | 7 | 7 | 7 | 8 | 8 | 8 | 8 |
| Bitümlü Temel | 0 | 8 | 9 | 10 | 10 | 11 | 12 | 12 | 14 | 16 | 18 |
| P. miks Temel | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 |
| Kırmataş Temel | 25 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 25 | 25 | 25 | 25 |
| Derzli Donatsız Rijit Üstyapı | T8,2: 8,2 tonluk eşdeğer standart dingil yükü tekrar sayısı - Yolun hizmet ömrü boyunca | | | | | | | | | | |
| Üstyapı (cm) | 3-10 Milyon | 4-10 Mil. | 20-30 Mil. | 30-40 Milyon | 40-50 Mil. | 50-65 Mil. | 65-80 Milyon | 80-100 Milyon | 100-160 Milyon | 160-250 Milyon | >250 Milyon |
| Beton Kaplama | 19 | 22 | 23 | 25 | 25 | 26 | 27 | 30 | 33 | 36 | 38 |
| Kırmataş Alttemel | 20 | 20 | 20 | 20 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 |

Asfalt kaplama olarak BSK (Bitümlü Sıcak karışım) Tablo 2.4’e göre 25 cm kırmataş temel, 20 cm plentmiks temel, 8 cm binder kaplama ve 5 cm aşınma tabakasından oluşacak

şekilde maliyeti çıkartılmıştır. Yol platform genişliği 7 metre olmasına rağmen binder tabakasına kadar iki tarafta 0,75 m banket kısımları da eklenmiştir. Bitüm Kırıkkale rafinerisinden temin ve nakliye edilmiş şekilde hesaplanmıştır. Plent konkasör arası, plent kaplama yapılacak yol arası ve konkasör kaplama yapılacak yer arası 15 km olarak belirlenmiştir. Bitümlü malzemelerde bitüm oranı TRBB'nin kullandığı gibi ağırlıkça aşınma ve binderde %5 plentmix temelde ise %4,7 alınmıştır. Alttemel malzemesinin figüre sıkışma oranı 1.1 alınmıştır. Buna göre yolda 1 metre kalınlığında alttemel yapılabilmesi için 1.1 m kalınlıkta malzeme getirilmesi gerekmektedir. Kompozit kaplamalarda bulunan ince asfalt kaplama maliyetleri 5 ve 8 cm sıkışmış kalınlığa sahip binder tabakası olarak hesaplanmıştır. Nakliye pozları ve asfalt özellikleri BSK'ya ait özellikler ile aynıdır.

Beton kaplamanın maliyet hesabı da Tablo 2.4'de bulunan hizmet ömrü boyunca 3-10 milyon ESAL'm altında yüklemeye sahip rijit kaplamaya göre yapılmıştır. Ancak beton kalınlık değeri tabloda gösterildiği gibi 19 cm değil, deneylerde ve arazide yapılan ölçümlerde tespit edilmiş olan 18 cm olarak alınmıştır. Alt temel tabakası 20 cm alınmıştır. Nakliyele 15 km'ye göre hesaplanmıştır. Donatılı betonda, fazladan hasır donatı ve nakliyesi eklenmiştir. Hasır donatı olarak Ø6 150*150 açıklıklara sahip birim ağırlığı 1,48 kg/m² olan donatı seçilmiştir. Nakliye mesafesi Kardemir Karabük Demir Çelik fabrikasına göre hesaplanmıştır.

Ara yüzey güçlendirme malzemesine ait maliyet, HPM 120 ve TEX AR720 adlı iki özel poz ve kalıp pozu ile oluşturulmuştur. Özel pozlar üretici firmadan alınan teklife göre belirlenmiştir. Metraj hesabı yukarıda detaylı anlatıldığı gibi her derzde 25 cm olacaktır şekilde hesaplanmıştır. Bölgede derz mesafeleri 5 metre olduğundan maliyet hesabında da 1 km'de derz sayısına göre hesap yapılmıştır.

2.8. Özetle Yapılan Çalışmalar

Çalışmanın mekanistik ampirik kısımlarını oluşturan bölümü KTÜ HYT tesisinde yaklaşık 20 ay gibi bir sürede bitirilmiştir. Çalışma esnasında birçok aksaklıklar yaşanmış ve bu aksaklıklara çözüm önerileri üretilmiştir. Genel olarak çalışmaların özeti ve ardından çalışmaları anlatan akış diyagramı şöyledir;

1. KTÜ bünyesinde bulunan HYT tesisi, bu çalışma için değerlendirilmiş ve gerekli imalat yapılarak hazırlanmıştır. Çalışma ince derzler üzerinde yapılacağından, daha önce

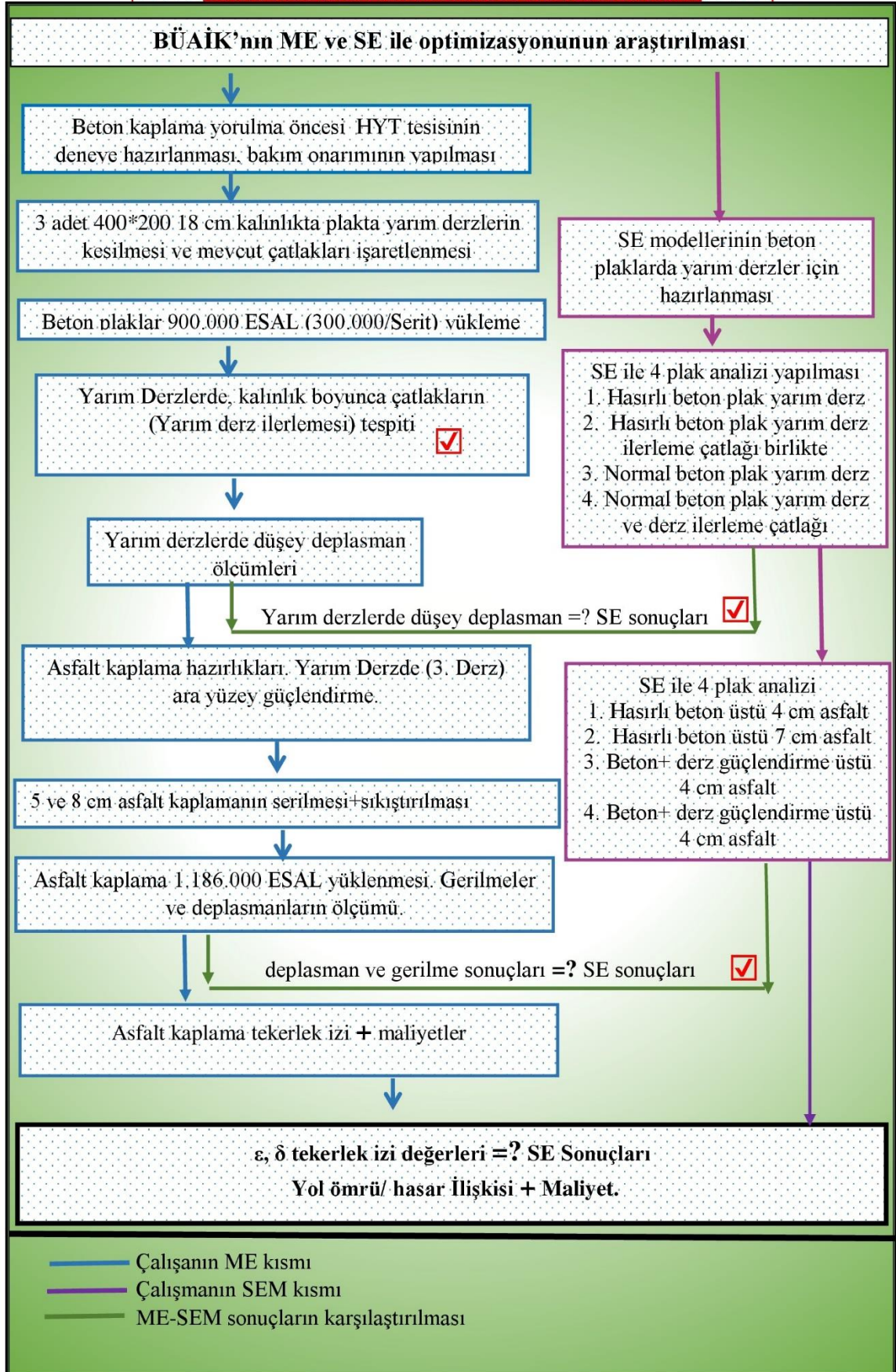
bulunan 18 cm. kalınlığına ve 4*6 m. ölçülerine sahip plakların ortalarına yarım derz uygulanarak yapılmıştır.

2. Tesis duvarlarına her bir yarım derzin sağına soluna olmak üzere iki tane LVDT yerleştirilmiştir. Bu cetveller derzlere en yakın noktalarda oluşan düşey deplasmanı ölçmüştür.
3. Yüklemeler öncesi gözlemsel olarak mevcut çatlaklar tespit edilmiş, kaplama boyası ile işaretlenmiş ve daha sonrada bilgisayar ortamına aktarılmıştır.
4. Basınç hücrelerinin kalibrasyonu yapılmış ve yük yaklaşık 780 kPa'ya yani tekerlek başı 32 kN olmak üzere toplamda 64 kN'a ayarlanmıştır.
5. Plaklar her bir güzergahda 25 bin olmak üzere toplam 75 bin defa yani arazi koşullarında yaklaşık 900.000 ESAL yüklenmiştir.
6. Yüklemeler sırasında gözlemsel olarak plak üzerinde ve yarım derzlerde plak kalınlığında oluşan çatlaklar takip edilmiştir.
7. LVDT'ler vasıtasıyla yüklerin plaklar üzerinde hareketi sırasında derzlerde oluşan düşey deplasmanlar ölçülmüştür. Bu ölçüm 25.000 yükleme tekrarının başında ortasında ve sonunda yapılmıştır.
8. Asfalt kaplamalar için olan gerinim ölçerlerin maliyetinin yüksek olmasından dolayı mevcut imkânlar ile üretimi gerçekleştirilmiş, test ve kalibrasyonu yapılmıştır.
9. Asfalt kaplama öncesi hazırlıklar yapılmıştır. Güçlendirme yapılacak yarım derzin güçlendirme uygulaması yapılmıştır. Basınç hücreleri, LVDT'ler, termokupllar ve gerinim ölçerler plak üzerinde yerlerine yerleştirilmiştir.
10. Güzergahların sağ tarafına (kuzeyde kalan) 10 cm., sol tarafına (güneyde kalan) da 7 cm kalınlığında asfalt dökülmüş, sıkıştırılmış ve 8 cm. ile 5 cm. haline getirilmiştir.
11. Asfalt üzerinde gerekli yerlerde şerit çizgileri, derz çizgileri ve ölçüm cihazlarının buldukları yerler işaretlenmiştir.
12. Asfalt kaplamada her bir güzergah 780 kPa tekerlek basıncı, yani tekerlek başı 32 kN olmak üzere toplamda iki tekerlekte 64 kN yükle 100.000 kere yüklenmiştir. Arazide bu yüklemenin karşılığı 1,186,000 yüklemedir. Toplamda bütün asfalt kaplamalar 2,372,000 ESAL yüklenmiştir.
13. LVDT'ler ile asfalt yapıldıktan sonra beton üstü ince asfalt kaplama plağında oluşan düşey deplasman ölçülmüştür. Gerinim ölçerlere ait veriler başlangıçta 6000, 7000, 8500, 11500, 15000, 20000, 25000, 30000, 50000, 70000, 100000 yüklemelerde ölçülmüştür. Gerinim Ölçerlerin verileri toplanacağı zamanlarda termokupllar ile

sıcaklık ölçümü de yapılmıştır. Basınç hücreleri ait verilerde deney başında, ortasında ve sonunda ölçülmüştür.

14. Tekerlek izi oluşumları, Jeodezi Mühendisliği bölümünden gelen ölçüm cihazları ile takip edilmiştir. Ölçümler deney başlangıç ortalarında birkaç kere ve bitişinde alınmıştır.
15. Mekanistik ampirik (ME) çalışmaları sırasında sonlu eleman metodu (SE) ile modeller oluşturulmuş ve sonuçlar alınmıştır.
16. ME sonuçları SE sonuçlarını doğrular şekilde çıkmıştır. Bu nedenle ME’de elde edilemeyecek bazı veriler SE kullanılarak elde edilmiştir.
17. Farklı derz tipleri, asfalt, beton ve kompozit kaplamalar için maliyet hesapları yapılmıştır.

YAPILAN ÇALIŞMALAR AKIS DİYAGRAMI



3. BULGULAR VE İRDELEMELER

Mekanistik-Ampirik (ME) yöntemlerle yapılan çalışmanın deneyler kısmı 20 ay sürmüştür. Bu bölümde; Karadeniz Teknik Üniversitesi Ulaşım Laboratuvarı ve Hızlandırılmış Yol Testi (HYT) Tesisinde gerçekleştirilen çalışmada, yorulmuş veya mukavemet değerleri düşük beton yolların ince asfalt kaplama ile iyileştirmesinin optimizasyonu için yapılan deneylerin sonuçları ve birbiriyle olan bağlantıları verilmiştir. İlk sonuçlar beton plakların yorulması sırasında alınmış, daha sonra ise asfalt kaplamanın yorulması sonuçları elde edilmiştir. Elde edilen bütün sonuçlar sonlu eleman (SE) metodu ile karşılaştırılmıştır. ME sonuçları SE sonuçlarını doğruladıktan sonra, SE sonuçları da bu bölüm içerisinde verilmiştir. Son olarak deney yapılan kaplama tiplerinin maliyetleri hazırlanmış ve sonuçlarla maliyetlerin beraber değerlendirilmesi yapılmıştır.

Çalışmanın bu bölümü aşağıdaki sıralamaya göre ilerlemiştir.

1. Beton plakların yorulma (yükleme) öncesi çatlaklarının miktarı ve yerleri incelenmiştir.
2. Beton plakların yüzeyinde çatlakların, her bir güzergâhta 25,000 yüklemes sonrasında uzama ve değişimleri incelenmiştir.
3. Plaklar üzerinde bulunan yarım derzlerde, beton kaplamanın yorulması sırasında derz ilerleme çatlağının ne zaman oluştuğu incelenmiştir.
4. Her bir beton plak güzergahının yorulması sırasında, yarım derzlerin sağına ve soluna koyulan LVDT'lerle, oluşan düşey deplasman, δ_{ave} ve LTE değerleri bulunmuş ve incelenmiştir.
5. Beton plak, asfalt kaplama ile kaplandıktan sonra, yarım derzlerin sağına ve soluna koyulan LVDT'lerle, oluşan düşey deplasman, δ_{ave} ve LTE değerleri bulunmuş ve incelenmiştir. Asfalt kaplama öncesi beton plakta oluşan değerler ile karşılaştırılmıştır.
6. BÜİAK plağının alt yüzeyinde oluşan basınç gerinim değerleri verilmiş ve incelenmiştir.
7. BÜİAK plağının alt yüzeyinde oluşan çekme gerinim değerleri verilmiş ve incelenmiştir.
8. BÜİAK üzerinde oluşan tekerlek izi değerleri verilmiş ve incelenmiştir.

9. Asfalt kaplamanın alt ve üst yüzeyinden elde edilen basınç değerleri verilmiş ve incelenmiştir.
10. Beton kaplamada SE ile elde edilen düşey deplasman ve gerilme değerleri verilmiş ve değerlendirilmiştir.
11. BÜİAK'da SE ile elde edilen asfalt alt yüzey basınç ve çekme gerinimleri, asfalt kaplama sonrası betonda oluşan düşey deplasmanlar, plak genelinde oluşan çekme ve basınç gerilme değerleri verilmiş ve değerlendirilmiştir.
12. Maliyet hesapları verilmiş ve değerlendirilmiştir.
13. Genel olarak bütün bulguların değerlendirilmesi yapılmıştır.

3.1. Mevcut Beton ile İlgili Bulgular

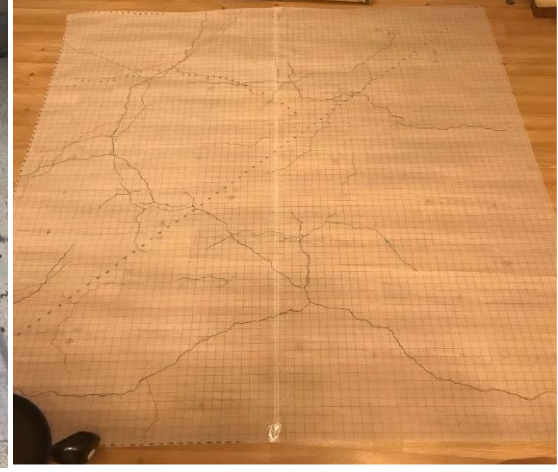
HYT tesisinde mevcut halde 400*600 cm. ölçülerine sahip beton plaklar bulunmaktadır. Bu plaklar ortadan yarım derzler ile iki parça haline getirilmiştir. Derz kesme işleminden hemen sonra mevcut beton plaklar üzerindeki çatlaklar titizlikle işaretlenmiştir. Daha sonra Şekil 3.1 ve 3.2'de görüleceği gibi aydınır kağıdı kullanılarak dijital ortama aktarılmıştır. Buna göre deneylerin yapılacağı 2 güzergahta yükleme öncesi çatlakların uzunlukları ve birim alanda bulunan çatlak miktarları Tablo 3.1 ve 3.2'de verilmiştir. Şekil 3.1,3.2 ve 3.3'te örnek bir dijital ortama aktarılmış plak detayı görülmektedir. Burada her bir renk çizgiler farklı plaklarda bulunan çatlakları temsil etmektedir.

Tablo 3.1. Beton plaklarda yükleme öncesi tespit edilen çatlaklar

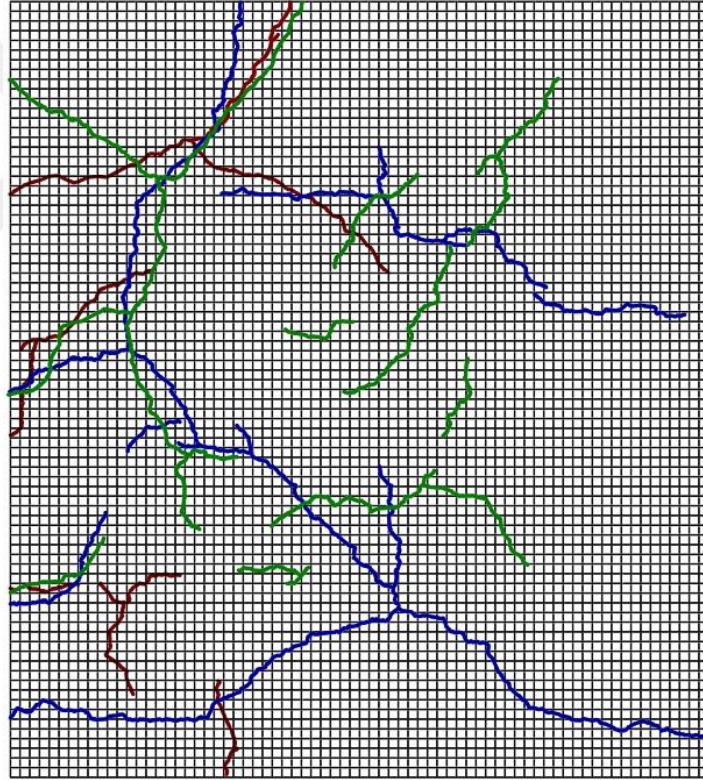
| | Kuzey Tarafı | | Güney Tarafı | |
|-----------------|--------------|---------------------|--------------|---------------------|
| | (m) | (m/m ²) | (m) | (m/m ²) |
| 1. Plak | 0.847 | 0.106 | 1.680 | 0.210 |
| 2. Plak | 8.411 | 1.051 | 10.900 | 1.363 |
| 3. Plak | 6.510 | 0.814 | 5.620 | 0.703 |
| Ortalama | 5.256 | 0.657 | 6.067 | 0.758 |

Tablo 3.2. Yükleme öncesi beton plaklarda gözle tespit edilen çatlakların oranları

| En Yüksek Çatlak oranı | En Düşük Çatlak Oranı | Ortalama Çatlak Oranı |
|---------------------------------------|------------------------|-------------------------|
| 1.3625 m/m ² Kuzey 2. plak | 0.087 m/m ² | 0.7075 m/m ² |



Şekil 3.1. Aydınlar kâğıdı üzerinde çatlaklar Şekil 3.2. Çatlakların sayısallaştırılması



Şekil 3.3. Yüklemeler öncesi plakta mevcut çatlaklar

Yüklemeler bittiğinde, çatlaklarda az miktarda birkaç cm'lik artış görülmüştür. Bu değişimin, yükleme öncesinde mevcut çatlakların işaretlenmesi sırasında tespit edilemeyecek kadar ince çatlakların yüklemeler sebebiyle tespit edilebilir hale gelmesi veya işaretlenme sırasında gözden kaçan çatlaklardan oluştuğu tahmin edilmektedir.

Çatlaklar incelendiğinde genelde derin olmayan yüzeysel çatlaklar olduğu tespit edilmiştir. Çatlakların bu halinin, betonun ilk yapımı sırasında oluşan rötre çatlakları veya genleşme çatlakları olabileceği düşünülmüştür. Ayrıca çatlakların yüklemeler nedeniyle artmaması, plak uzunluğu boyunca 2 metrede bir yarım derz veya tam derze denk geliyor olması ve mevcut rötre çatlaklarının oluşan gerilmeleri sönmülmesi nedenine bağlanmıştır. Yükleme öncesi çatlakların hasır donatılı plaklarda ortalama 0.158 m/m^2 olduğu halde hasır donatı koyulmamış plakların ortalama birim m^2 'de çatlak oluşumunun yaklaşık 6 kat arttığı ve 0.983 m/m^2 olduğu görülmüştür. Bu durum hasır donatıların ilk çatlak oluşumu üzerinde önemli etkisini göstermektedir. Ayrıca ortada bulunan 2 nolu plaklar diğer plaklara göre daha fazla çatlamışlardır. Son olarak deney yapılmayan orta güzergâha yakın bölgelerde çatlak oranı diğer kısımlara göre fazladır. Genel olarak hiçbir plakta çatlaklar 1.5 m/m^2 seviyesine ulaşmamıştır.

Literatürde beton plakların derz dolgu malzemelerinin değişimi dışında bakım onarım ihtiyacı duymadan uzun süre hizmet verebildiğinden bahsedilmektedir [23-26]. Nitekim her güzergahta uygulanan 25.000 geçişli ağır tonaj yüklemeler (aks yarısında 59.3 kN) neticesinde, çatlak oluşumuna rastlanmaması ve mevcut çatlakların dikkate alınmayacak kadar az bir değer olan 1-2 cm uzamaları bu sonucu doğrular niteliktedir.

3.2. Beton Kaplamalara Yapılan Yüklemeler

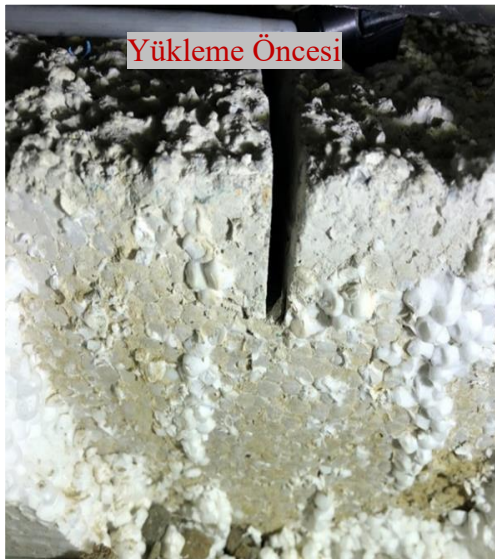
Yaklaşık 3 ay gibi kısa bir sürede günlük 1000 geçiş yapılarak 75,000 yükleme tamamlanmıştır. Yükleme cihazı, kapasitesi altında yükleme sayısı ile çalıştırılmış böylece makine aksamı dinlendirilmiş ve deney sonuçları daha sık takip edilmiştir. Araştırmacılar tarafından yüklemeler sırasında oluşacak çatlakların sürekli gözlemsel olarak takip edilmesi, yükleme cihazının hareketi sırasında imkânsız olduğundan makine durduktan sonra yüklemenin oluşturduğu hasarlar incelenmiştir. Çalışma kapsamında beton plakların yorulması esnasında iki konu düzenli olarak takip edilmiştir. Birincisi LVDT'ler ile plakların düşey doğrultuda yaptıkları hareket, ikincisi ise yarım derzlerin devamında oluşan çatlakların gözlemsel takibidir. Yarım derzlerin devamı olan derz ilerleme çatlakları sistem durdukça (1000 yükleme aralığında) takip edilmiştir. Bu nedenle sonuçlar 1000 yükleme aralıklarında verilmiştir.

3.2.1. Yarım Derz Kesimlerinin, Beton Tabanına Doğru Çatlaması

Bu çalışmada derzler yarım derz olarak kesilmiştir (1/3 oranında). Beton plakların yüklenmesi sırasında yarım derzler plak tabanına doğru bir çatlak oluşturmaktadır. Bu çatlak üzerinde oluşan girinti ve çıkıntılar plakların birbirine kenetlenmesine ve sürtünme kuvveti ile birlikte yük aktarımı yapmasına fırsat sağlamaktadır. Ancak çatlak oluşuktan sonra, oluşmadan önceki haline göre daha düşük yük aktarımı yapmaktadır. Tablo 3.3'te yarım derzlerin kaç ağır yüklemde çatladığı ile ilgili bilgi verilmiştir. Bu çatlakların gözlemsel olarak takip edilmesinden dolayı mikro çatlak oluşumları veya benzeri detaylar takip edilememiştir. Şekil 3.4 ve 3.5'te yarım derzlerin çatlak oluşumundan önceki ve sonraki hali görülmektedir. Şekil 3.6'daise yarım derzlerin çatladıktan sonraki halleri görülmektedir.

Tablo 3.3. Yarım derzlerin, devam kısmının çatlaması

| | Kuzey Tarafı (Yükleme) (ESAL 64kN*2) | Güney Tarafı (Yükleme) (ESAL 64kN*2) |
|-----------------------|---|---|
| 1.Derz Hasır Donatılı | 10,000-11,000 (124,530 ESAL) | 11,000-12,000 (136,390 ESAL) |
| 2. Derz Donatısız | 4,000-5,000 (53,370 ESAL) | 4000-5000 (53,370 ESAL) |
| 3. Derz Donatısız | 3,000-4,000 (41,510 ESAL) | 4000-5000 (53,370 ESAL) |



Şekil 3.4. Yüklemeye öncesi derz



Şekil 3.5. Derz ilerleme çatlakları



Şekil 3.6. Yüklemeler nedeniyle oluşan diğer derz ilerleme çatlakları

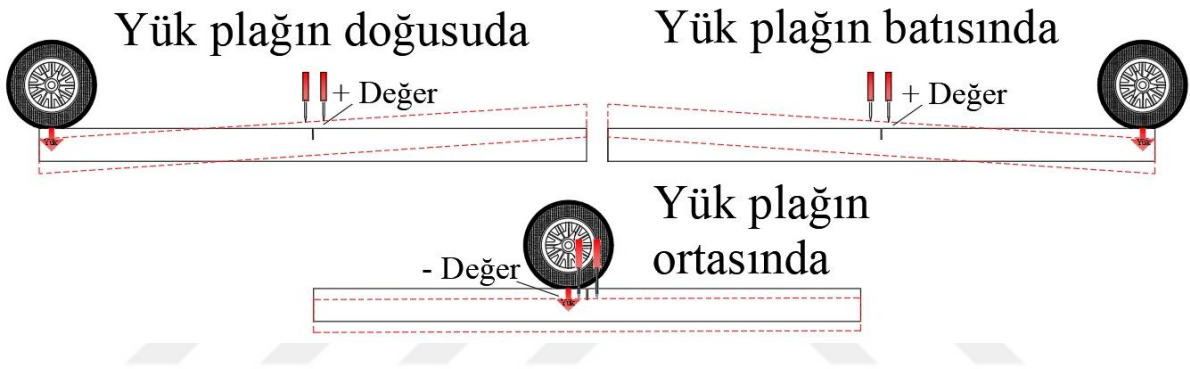
Çatlak oluşumları gözlemsel olarak incelendiğinde aşağıdaki sonuçlar tespit edilmiştir:

- Çatlak oluşumları bütün plaklarda erken denebilecek bir dönemde oluşmaktadır. (Arazi koşullarında 150,000 ESAL'den erken)
- Hasır donatılı yarım derzlerde, diğer derzlere göre en az 2 kat daha fazla yükleme yapıldıktan sonra derz ilerleme çatlakları oluşumu gözlemlenmiştir. Buna göre normal derzler 3,000-5,000 geçiş aralığında çatlarken, hasır donatılı derzler 10,000-12,000 geçiş aralığında çatlarmaktadır. Arazi şartlarında bu rakamlar, donatısız beton yollarda yaklaşık 40,000-53,000 ESAL aralığında, hasır donatılı beton yollarda ise yaklaşık 125,000-135,000 ESAL aralığında çatlak oluştuğunu göstermektedir. Bu durumda 20 yıl için 3 milyon ESAL yüke göre tasarlanan yol kaplamalarında, birinci yılda derz ilerleme çatlaklarının oluştuğu sonucuna ulaşılmıştır.

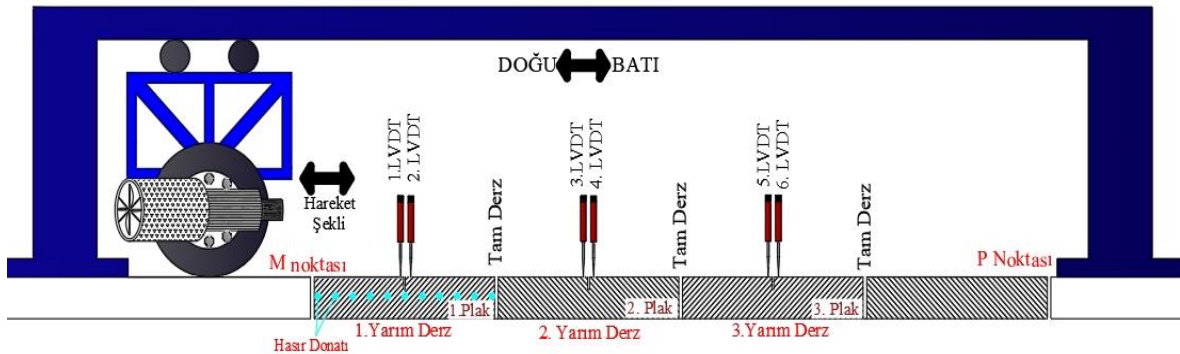
3.2.2. Plaklarda Oluşan Düşey Deplasmanlar ve LTE

Beton plaklar yüklenirken gözlemsel olarak çatlak oluşumunun takip edilmesinin yanında, LVDT'ler vasıtasıyla 3 defa (ilk yüklemelerde, yüklemelerin ortasına gelindiğinde ve son yüklemelerde) düşey deplasman ölçümü yapılmıştır ve elde edilen veriler karşılaştırılmıştır. Ölçümler yirmişer yükleme şeklinde yapılmış olup ölçümler

sırasında LVDT'lerin neredeyse tamamının sinüzoidal fonksiyona göre değerler verdiği görülmüştür. Değerler artı ve eksi olarak çıkmaktadır. Şekil 3.7'de görüldüğü gibi artı değerlerdeki yükün, plağın doğu veya batı ucunda olduğu, plağın orta kısmının havaya kalkmakta olduğu ve LVDT'lerin pozitif değer okuduğu tespit edilmiştir. Eksi değerlerde ise yükün yarım derze yakın olmasından dolayı LVDT'ler ve plak zemine doğru düşey deplasman yapmakta olup, LVDT'nin ucunun aşağıya doğru kaydığı belirlenmiştir. Şekil 3.8'de yükleme sisteminin en kesiti görülmektedir. En kesitten takip edilerek yükleme sırasında plakların ve LVDT'lerin davranışları aşağıda açıklanmıştır.



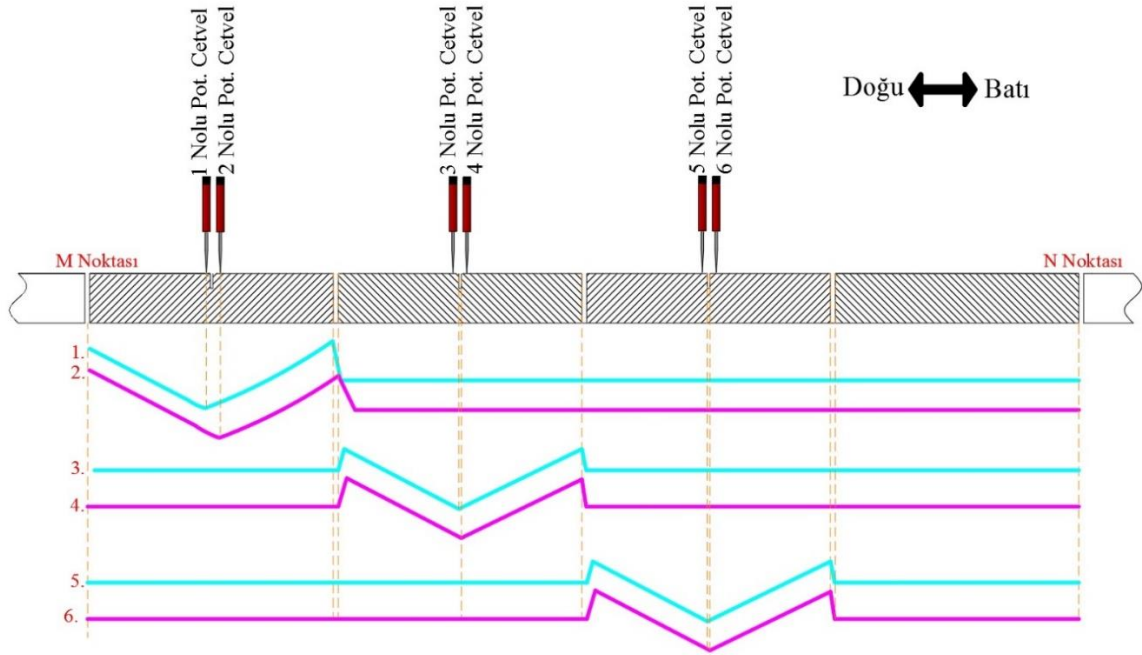
Şekil 3.7. Yükün bulunduğu yere göre plakta oluşan değişimler



Şekil 3.8. Deney düzleminin en kesiti

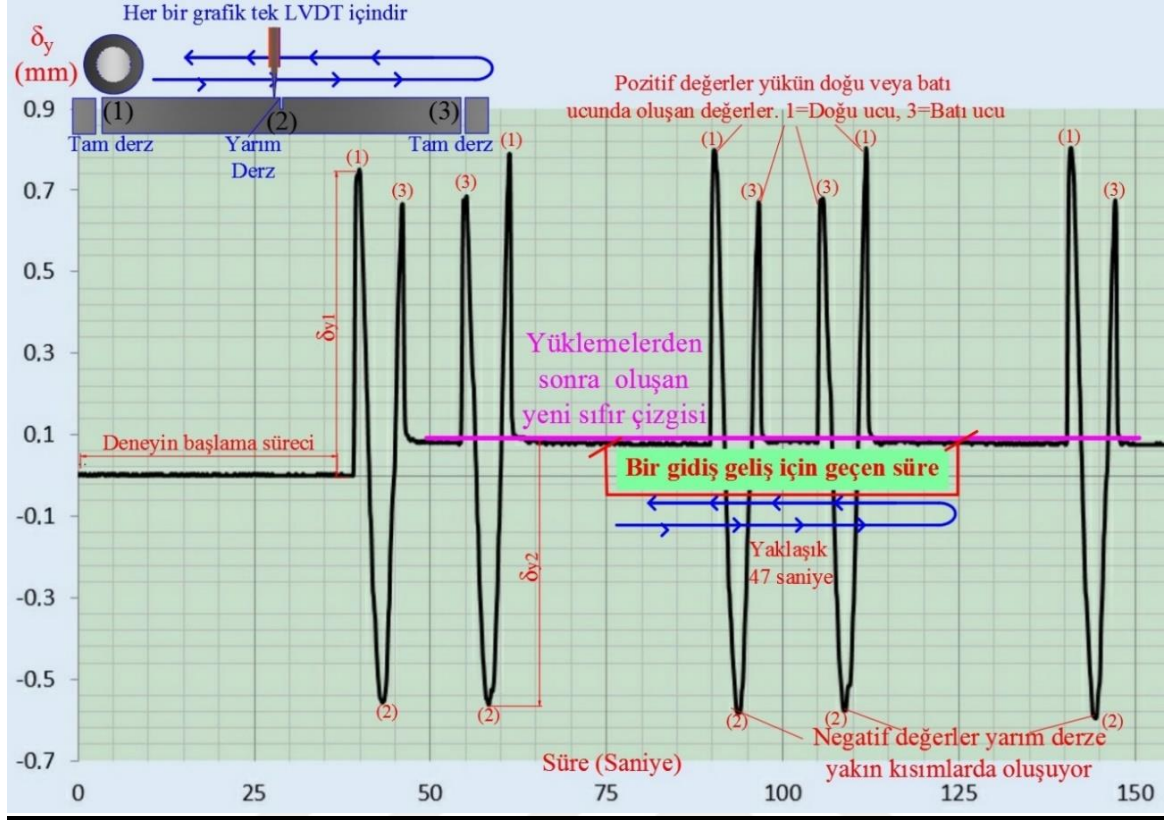
Bu çalışmada, KTÜ-HYT tesisinde tekerlekler aynı doğrultu üzerinde gidip gelerek yükleme yapmaktadır. Piston yardımıyla toplamda 64 kN yüke ayarlanmış tekerleklerin Şekil 3.9'da görüldüğü gibi önce M noktasına geldiğinde yaptığı basınç etkisi ile 1 nolu

plağının batı ucunu yukarı kaldırdığı gözlenmiştir. Bu nedenle 1 ve 2 numaraları LVDT'lerin ilk değerleri artı olarak çıkmaktadır. Ancak plağın batı ucundaki tam derzlerin olduğu yer, yarım derzlerin olduğu yerden daha fazla kalkmaktadır. Başlangıçta bu fark fazla olmasına rağmen yüklemelerin yaklaşık olarak ortasında yapılan ölçümlerde fark azalmaktadır. Azalmanın nedeni ise 1. yarım derzde çatlak ilerlemesi oluşmasıdır. Yüklü tekerlek ilerleyerek 1 ve 2 nolu LVDT'lerin bulunduğu kısımdan geçerken 1 ve 2 nolu LVDT'lerden okunan değer basıncın etkisi ile eksi olmaktadır. Birinci tam derzin önüne geldiğinde ise 1 ve 2 nolu LVDT'ler tekrar artı değer kazanmaktadır. 1. tam derzi geçildikten sonra, yük 1 nolu plaktan çıkmakta ve 1 nolu plakta birkaç saniye süreyle yük etkisiyle oluşan değerlerde geriye dönüş yaşanmaktadır. Ardından yük 2 nolu plakta etkili olmaya başlamakta ve 1. tam derz üzerinde tekerlek bulunurken 3 ve 4 nolu LVDT'ler artı değer göstermektedir. 3 ve 4 nolu LVDT'ler önünden tekerlekler geçerken ölçülen değerler eksi olmakta 2. tam derzin önüne geldiğinde ise tekrar artıya dönmektedirler. P noktasına gelindiğinde bütün sistem ilk haline dönmeye çalışmaktadır. Tekerlek P noktasından sonra geri dönme işlemine geçmektedir. Bu nedenle yukarıdaki değerlendirmelerin her biri aynı şekilde tekrarlanmaktadır. Elde edilen grafiklerin tamamında yukarıda özeti verilen detaylı değerlendirme şekline uygun hareket ettiği tespit edilmiştir. Okumalar 20 geçişe göre yapılmıştır. Okunan değerler tablo ve grafikler ile özetlenmiştir. Bu tablo ve grafiklere bakarak önce her bir LVDT'nin kendi içinde yükleme öncesinde ve sonrasında değerlendirilmesi, daha sonra yarım derzlerde bulunan LVDT'lerin ortalama değerlerini yükleme öncesinde ve yükleme sonrasında değerlendirilmesi yapılmıştır. Şekil 3.10'da özet olarak her bir LVDT'nin yükleme anındaki davranışı görülmektedir. Yükleme ilgili plaktan uzaklaştığında LVDT'ler yükün tekrar kendi plağına gelmesini beklemektedir. Şekil 3.10'da her bir LVDT farklı bir renk ile gösterilmiştir. 1 ve 2 nolu LVDT'ler tekerlekler 1 nolu plağın üzerinde hareket ederken değer kazanmışlardır. 2 nolu plakta 3 ve 4 nolu LVDT'ler, 3 nolu plakta ise 5 ve 6 nolu LVDT'ler değer üretmiştir.



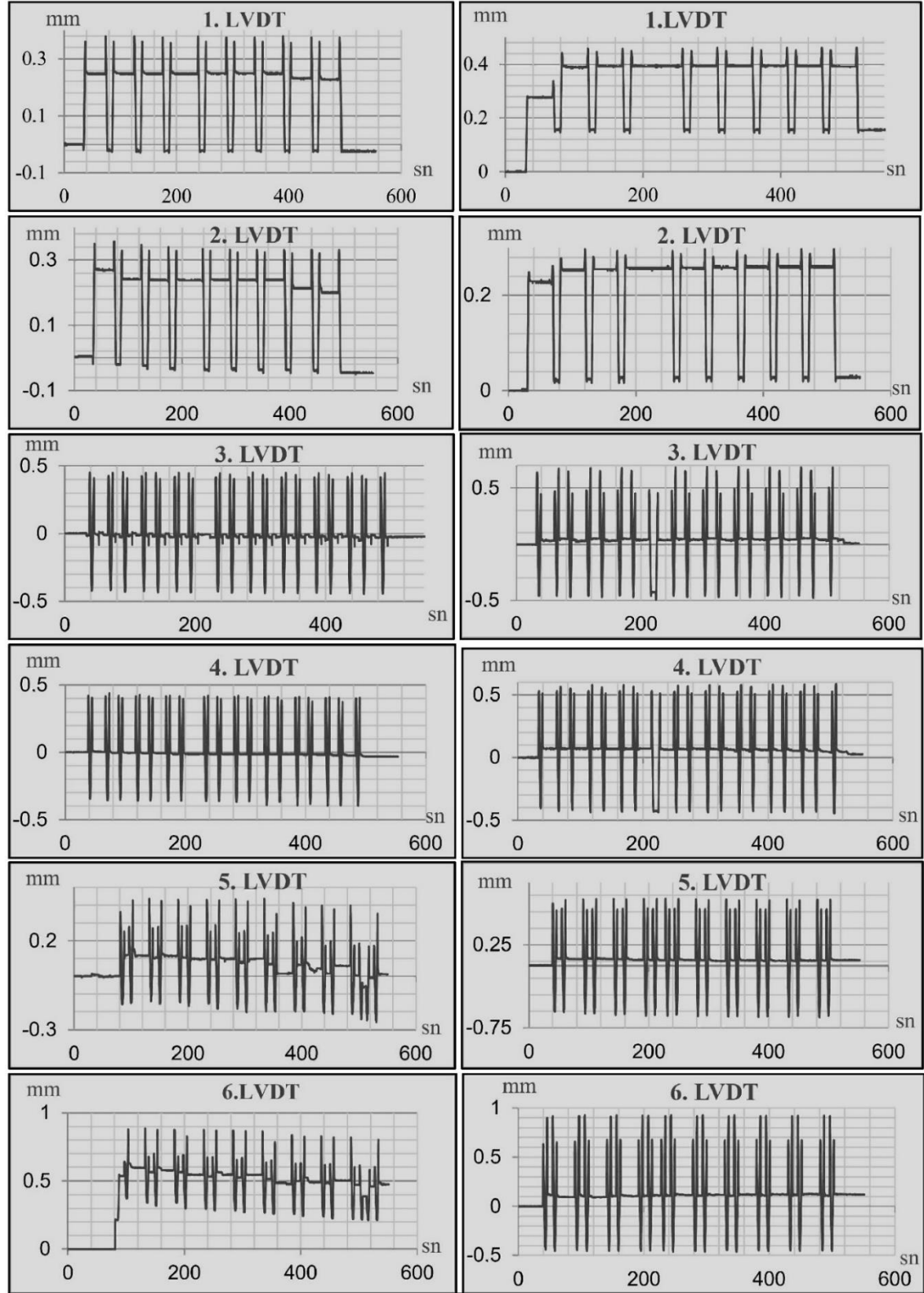
Şekil 3.9. LVDT'lerin yaklaşık olarak hareket şekilleri

Aşağıda LVDT'lerin sonuç grafikleri verilmektedir. Grafiklerin nasıl değerlendirileceği örnek olarak Şekil 3.10'de verilmiştir. Grafiklerde x eksenini zamanı göstermektedir. Deneylerin süresi yaklaşık 600 saniyedir (10 dakika). Her bir gidiş geliş yaklaşık 47 saniye sürmektedir. Her bir deney 10 gidiş geliş (tur) olmak üzere toplamda 20 yükleme olarak belirlenmiştir. Y eksenini ise oluşan sapmaları mm. cinsinden vermektedir. Genelde grafiklerde yüklemeler sonrası plaklar kendilerini toplamakta ve eski haline geri dönmeye çalışmaktadır. Bazı plaklar hızlı yükleme nedeniyle kendini tam toparlayamamaktadır. Bunun nedeni zeminin davranışı ile alakalıdır. Genel olarak plaklar arasında zeminden kaynaklı yük aktarımı olmasından dolayı yüklemeler yapılırken, yükün bulunmadığı plaklarda çok küçük de olsa değer değişimleri görülmektedir.

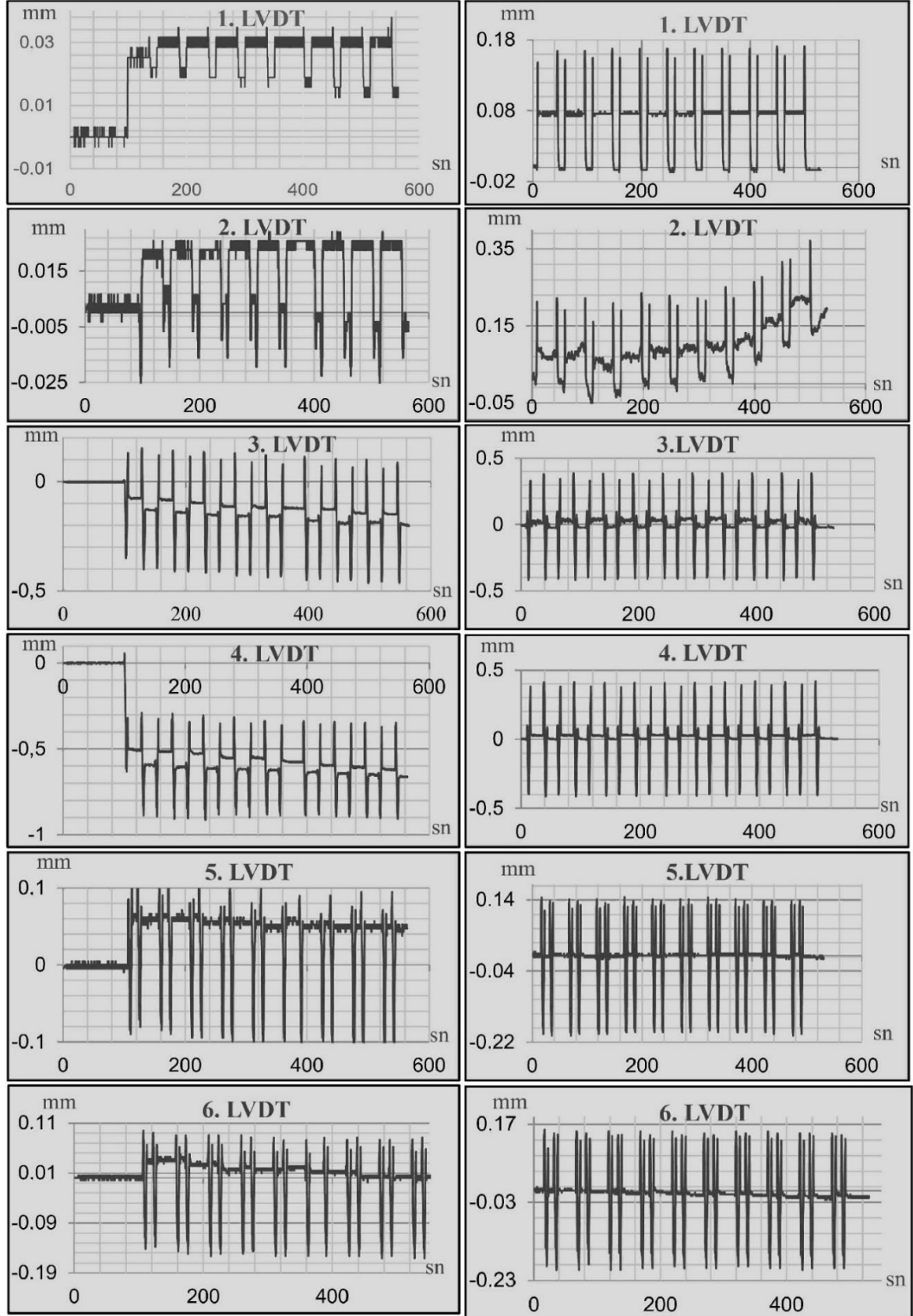


Şekil 3.11. Örnek bir grafik inceleme

Örnek grafik incelemesine göre aşağıda Şekil 3.12’de kuzey güzegahta, Şekil 3.13’te güney güzergâhta okunan LVDT değerlerinin grafikleri verilmiştir. Grafiklerin verildiği sayfaların sağ tarafı başlangıç verilerini, sol taraf aynı LVDT’nin 25,000 yükleme sonra elde edilen sonuçlarını vermektedir.

Başlangıç LVDT değerleri**25 000 Yükleme sonrası LVDT değerleri**

Şekil. 3.11. Kuzey güz. LVDT yüklemelerinin başlangıç ve 25,000 yükleme grafikleri

Başlangıç LVDT değerleri**25 000 Yükleme sonrası LVDT değerleri**

Şekil 3.12. Güney güz. LVDT yüklemelerinin başlangıç ve 25, 000 yükleme grafikleri

3.2.3. LVDT Ölçümlerinden Elde Edilen Veriler

LVDT'lerde hem artı hem eksi hareket eden plakların hareketi incelenirken, bu iki değer arasındaki farka (toplam yer değiştirmeye) göre değerlendirmenin kritik olduğu gözlenmiştir. Kuzey tarafında bulunan donatılı plaklardaki yarım derz ve onun sağ ve solunda duran 1 ve 2 nolu LVDT'ler hariç diğer bütün LVDT'lerde yüklemeler bittiğinde oluşan deplasman farkı artmaktadır. 1 ve 2 nolu LVDT'lerde ise deplasman farkı azalmaktadır. Bu durumun nedeni deneyden kaynaklı bir hata olabileceği gibi zemin ile alakalı da olabilir. Tablo 3.4'de detaylı bir şekilde grafik sonuçları verilmiştir. Buna göre aşağıdaki tabloda en yüksek ve en düşük değer ile bu iki değer arasında fark verilmiştir;

Tablo 3.4. LVDT'lerde okunan en yüksek ve en düşük değerler

| LVDT No | Kuzey Tarafı İlk Yükleme | | | Kuzey Tarafı Son Yükleme | | |
|---------|--------------------------|---------------|-----------|--------------------------|---------------|--------------|
| | En yüksek (mm) | En Düşük (mm) | Fark (mm) | En yüksek (mm) | En Düşük (mm) | Fark (mm) |
| 1 | 0.379 | -0.027 | 0.406 | 0.45 | 0.145 | 0.305 |
| 2 | 0.357 | -0.042 | 0.399 | 0.293 | 0.0194 | 0.2736 |
| 3 | 0.451 | -0.438 | 0.889 | 0.67 | -0.49 | 1.16 |
| 4 | 0.413 | -0.384 | 0.797 | 0.574 | -0.4367 | 1.0107 |
| 5 | 0.437 | -0.244 | 0.681 | 0.804 | -0.605 | 1.409 |
| 6 | 0.871 | 0.26 | 0.611 | 0.913 | -0.4639 | 1.3769 |
| LVDT No | Güney Tarafı İlk Yükleme | | | Güney tarafı Son Yükleme | | |
| | En yüksek (mm) | En Düşük (mm) | Fark (mm) | En yüksek (mm) | En Düşük (mm) | Fark (mm) |
| 1 | 0.0347 | 0.0126 | 0.0221 | 0.167 | -0.0066 | 0.1736 |
| 2 | 0.029 | -0.025 | 0.054 | 0.368 | -0.0613 | 0.4293 |
| 3 | 0.1287 | -0.463 | 0.5917 | 0.331 | -0.408 | 0.739 |
| 4 | -0.337 | -0.887 | 0.55 | 0.369 | -0.408 | 0.777 |
| 5 | 0.1231 | -0.1089 | 0.232 | 0.1467 | -0.203 | 0.3497 |
| 6 | 0.085 | -0.1562 | 0.2412 | 0.1515 | -0.203 | 0.3545 |

Tablo 3.4'deki veriler incelendiğinde, LVDT'lerin en yüksek ve en düşük değerleri ve bu iki değer arasında oluşan farkların olduğu ortalama değerler Tablo 3.5'te detaylı olarak verilmiştir. Bu hazırlanan tabloda yüklemelerin başında ve sonunda oluşan değer farklılıklarının yüzdelik değişimi de tabloya eklenmiştir. Sadece güney güzergâhta 6. Derz farklı bir davranış gösterdiği için en yüksek ve en düşük değer ortalamasına katılmamış ancak fark ortalamasına katılmıştır.

Tablo 3.5. LVTD'lerin değerlerinin ortalaması ve değişim yüzdeleri

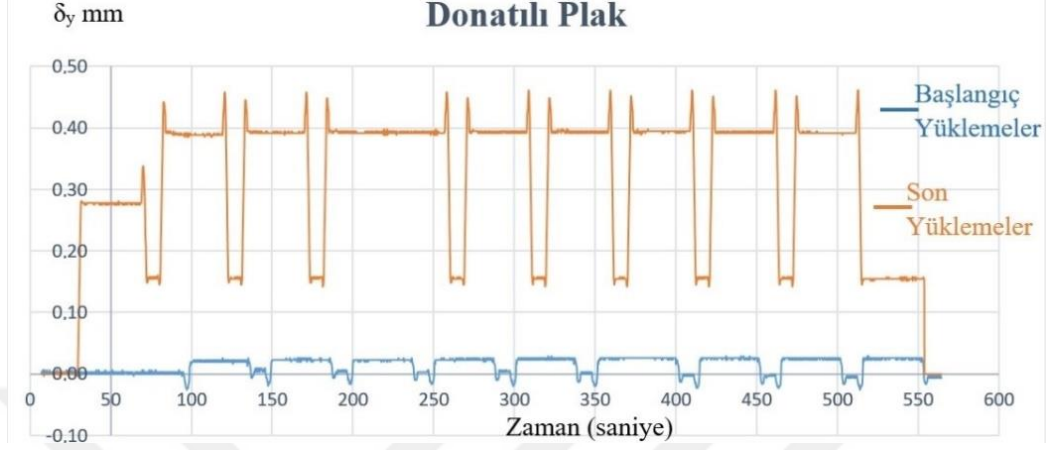
| | | Başlangıç Yüklemeleri (mm) | Son Yüklemeler (mm) | Değişim % |
|------------------------|------------------------------------|----------------------------------|---------------------------|--------------|
| KUZEY TARAF | Yüksek Değerler ortalaması: | 0.484 | 0.617 | 27.48 |
| | Düşük Değerler Ortalaması: | -0.1458 | -0.305 | 109.19 |
| | Farkın Ortalaması: | 0.6305 | 0.922 | 46.23 |
| GÜNEY TARAF | Yüksek Değerler ortalaması: | 0.08* | 0.255 | 218.75 |
| | Düşük Değerler Ortalaması: | -0.1481 | -0.2149 | 45.10 |
| | Farkın Ortalaması: | 0.281 | 0.47 | 67.26 |

Tablo 3.5'te yıldız ile işaretlenmiş değe artı çıktığından ortalamaya alınmamıştır. Yapılan analizler incelendiğinde 3. yarım derzde bulunan 5 ve 6. LVDT'lerden alınan ölçümlerin ortalaması yaklaşık 1.4 mm değerindedir. Bu değer bir tekrarı olmadığı ve 12 LVTD ölçümünde en yakın değer yaklaşık 1 mm olduğu görülmüştür. Bu hali ile bile ortalama oluşan deplasman farkı yükleme başladığında 0.28-0.63 mm. arasındayken yükleme bittiğinde bu değer 0.47 ile 0.92 mm. civarına çıkmıştır. Grafikler incelendiğinde genellikle sinüzoidal şekil tespit edilmiş olup birkaç grafikte bu şekilden küçük değerlerde (0.1-0.3 mm) kaymalar tespit edilmiştir. Grafiklerde oluşan bu farklı şekillerin plağın altındaki zeminden kaynaklandığı anlaşılmaktadır. Zeminde yükten dolayı oluşan deplasmanların elastik şekilde geri dönüşü olmaması bu kaymaların nedenidir. Bazı grafiklerde tekrar yüklemeler sırasında çeşitli değişik değerler görülmekte ancak tablolar incelendiğinde, bu değişik değerlerinin dikkate alınmasına gerek olmadığı ortaya çıkmaktadır. Ara ölçümlerde elde edilen grafikler sonuçları değiştirmeyeceğinden veya farklı sonuçlara neden olmayacağından ayrıca verilmemiştir.

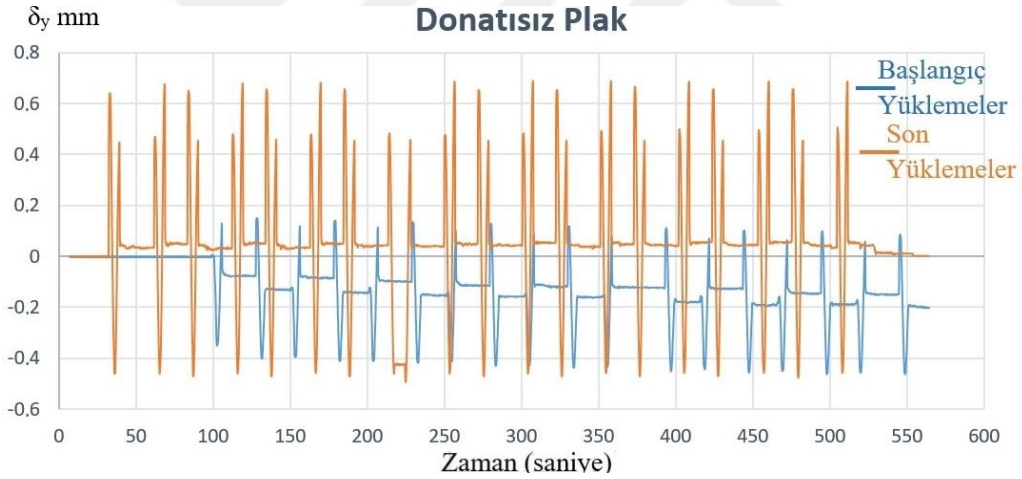
Aşağıda genel değerlendirmeler sonucu elde edilen veriler bulunmaktadır.

- Beton plaklarda yüklemelerden dolayı oluşan düşey sapmalar karşılaştırıldığında, başlangıca nazaran 25,000 yükleme sonrası oluşan düşey deplasmanlarda artış olduğu belirlenmiştir. Bu artış ortalama 0.241 mm. (%53) civarındadır. Şekil 3.13'te donatılı plakta, Şekil 3.14'te ise donatısız plakta yükleme başlangıcı ve 25,000 yükleme sonrası oluşan değişim görülmektedir. Grafikler incelendiğinde donatısız plaklarda farkın daha az olduğu net bir şekilde görülmektedir.
- 25,000 geçiş yapıldıktan sonra yüklemeler esnasında plakların doğu veya batı ucundayken derzin bulunduğu yerde oluşan kalkma artmaktadır. Bu değer plaktan plağa değişmekte, 0.5 mm'ye kadar (%25-200 arası) artış oluşmaktadır. Bu artışın temel

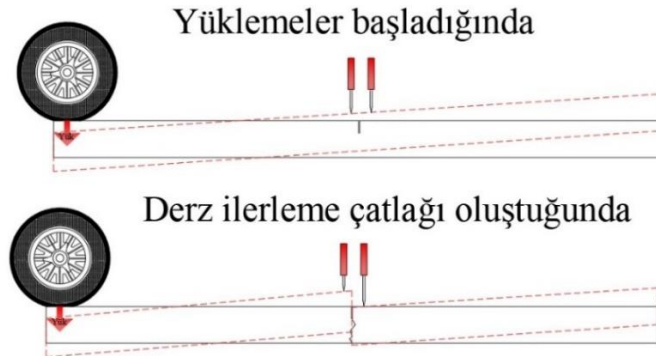
sebebi aşağıda Şekil 3.15'te görüldüğü gibi derz ilerleme çatlakları ile yük aktarım kapasitesi azalan plakların, yüklenen tarafın daha fazla yük almasıdır.



Şekil 3.13. Donatılı plakta başlangıç ve 25,000 yükleme sonrası oluşan deplasmanlar



Şekil 3.14. Donatısız plakta başlangıç ve 25,000 yükleme sonrası oluşan deplasmanlar



Şekil 3.15. Derzdeki çatlakın ilerlemesi nedeniyle plakta oluşan değişim

- Son yüklemelerde başlangıç yüklemelerine nazaran. derzlerin üzerine yük geldiğinde daha fazla eksi yönde deplasman oluşmaktadır. Plakların yük nedeniyle eksi yönde yaptığı deplasman, 25,000 yüklemeden sonra düşey yönde 0.15-0.06 mm (%45-109) aralığında artış göstermektedir. Bu fark yüklemelerin zemindeki granüler malzemeyi sıkıştırmasından dolayı oluşmaktadır.
- Birinci yarım derzin bulunduğu plaklarda sağ ve sol tarafların ikisinde de hasır donatı bulunmaktadır. Birinci derzin üzerinde bulunan 1 ve 2 nolu LVTD değerleri bu hasır donatı nedeniyle, 2 ve 3 nolu yarım derzler üzerinde bulunan LVTD'lerden daha düşük çıkmaktadır. Bu durum, hasır donatının bulunduğu plağın düşey deplasmanını bir miktar engellediği sonucunu vermektedir. Hasır donatı gerek yükleme başlangıcında gerekse deneyler bittiğinde yaklaşık olarak %45 ile %90 arasında yarım derzlerin daha az düşey deplasman yapmasını sağlamaktadır.
- Yarım derzlerin devamında çatlak oluşması, yüklemelerden dolayı yukarı ve aşağı toplam düşey deplasman farkını artırmaktadır. Yani derz ilerleme çatlakları oluşuktan sonra yarım derzler plak üzerindeki yük nedeniyle hem daha çok artı değer oluşturmakta, hem de yarım derz üzerinde yük nedeniyle daha fazla mutlak eksi değer oluşmaktadır.
- LVTD'lerin değerlerinde oluşan ortalama fark, yüklemeler bittiğinde başlangıca göre yaklaşık 0.1-0.3 mm (%46-%67) aralığında artmaktadır.
- LVTD'lerin eksi yönde yaptıkları ortalama değerler -0.305 ile -0.2149 mm civarındadır. Beton kalınlığı 180 mm. olduğunda oluşacak birim şekil değiştirme 0.0018 ile 0.0012 arasında değişmektedir. Ancak eksi yönde oluşan değerlerin de bir kısmının (ne kadar olduğu hesaplanamamıştır) zemine plak halinde çökmeden kaynaklandığı bilinmektedir. Bu hali ile birim şekil değiştirme oldukça düşük değerlerde çıkmaktadır.
- Yüklemelerden sonra kuzey şeritte 3 ve 4 nolu LVDT'lerde okunan hem artı hem de eksi verilerin mutlak değerlerinde büyüme tespit edilmiştir. Bu büyüme 3. LVDT için yaklaşık %60'dan fazladır. 4. LVDT'de bu değer biraz daha düşüktür. LVDT'lerde düşey deplasman değerlerinde artış, beklenen bir durumdur. Zira geçiş sayısı arttıkça yarım derzler çatlamış, aralarında yük aktarımı azalmıştır. Bu durum plakların bütün yükü tek başlarına zemine iletmelerine neden olmuş, zemine gelen fazla basınç kuvveti de bu yönde oluşan düşey deplasmanı artırmıştır.
- Kuzey şeritte 5 ve 6 nolu LVDT'lerde yüklemeler bittikten sonra yaklaşık 1 mm. sapmalar oluşmuştur. Artı ve eksi yönde oluşan deplasman toplamda 1.5 mm'ye

ulaşmaktadır. 5 ve 6. LVDT'lerde genel olarak yükleme sonrası artış görülmektedir. 6. LVDT daha önce eksi değerlere düşmezken yükleme sonrası eksi değerleri de göstermeye başlamıştır. Bunun nedeni alttemelde oluşan sıkışmaların artması ve bu durumun LVDT'lerin ölçtüğü değere yansımadır.

- Güney şeritte 1 ve 2 nolu LVDT'lerin oluşturduğu değerler incelendiğinde ilk geçişlerde artı değerler okunurken son geçişlerde eksi değerle oluşmaya başlamıştır. Ancak düşey yönde oluşan fark az miktarda (0.15-0.37 mm) artmıştır. Bu durum plak olarak hareket edildiği ve yüklemeler sonrasında zeminin daha stabil olarak plaktan gelen yükü karşıladığını göstermektedir. Bu plaklarda hasır çelik olması diğer plaklarda oluşan değerlerden farklılıkları da açıklamaktadır.
- Güney şeritte 3. ve 4. LVDT'ler hem artı hem eksi değerler okurken çatlaktan sonra sadece eksi değerlerde çalışmaya başlamıştır. Değer aralığının mutlak değerinde çok az da olsa bir artış görülmektedir. Bu artış kırılmadan sonra plakların daha az yük aktarmasından kaynaklanmaktadır. 4. LVDT ise sadece eksi çalışırken kırılmadan sonra hem eksi hem artıda çalışmaya başlamıştır. 4. LVDT'nin bulunduğu plağın diğer ucunun başka bir tam derz olmasından dolayı, kırılmadan sonra komşu 3. LVDT'den farklı davranış göstermiştir. Bu durum her ne kadar kenetlenme veya zeminden dolayı yük aktarması olsa dahi yarım derzlerde, derz ilerleme çatlağı oluşuktan sonra plaklar arasında farklı davranışlar olabileceğini göstermektedir.

3.2.4. LTE (Yük Aktarım Verimliliği) ve δ_{ave} Değerleri

Düşey deplasman sonuçları kullanılarak yorum yapmak için dünya genelinde kullanılan iki önemli kriter vardır. Bunlardan birincisi LTE ikincisi ise δ_{ave} değerleridir. Bölüm 1.8.1'de LTE ve δ_{ave} değerleri için hesaplama formülleri verilmiştir. Bu formüller doğrultusunda yükleme öncesinde ve yüklemelerden sonra oluşan LTE ve δ_{ave} değerleri Tablo 3.6'da verilmiştir. LTE değerlerini oluşturan düşey deplasmanlar hesaplanırken, her bir plak yüklemeler sırasında kendi sıfır çizgisini oluşturduğundan burayı sıfırmış gibi kabul ederek aşağıya doğru oluşan deplasmanlarda ölçü alınmıştır. Bu ölçümler Tablo 3.4 ve 3.5'te verilen değerlerden farklıdır. Ayrıca LTE ve δ_{ave} hesaplarında derzin yüklü tarafında okunan düşey deplasman ile yüksüz tarafında okunan düşey deplasman oranı vardır. Şekil 3.16 görüldüğü gibi düşey deplasmanın tam derze yakın yerinde mili saniye değeri tespit edilmiş bu değere göre derzin diğer tarafında oluşan deplasman bulunmuştur.

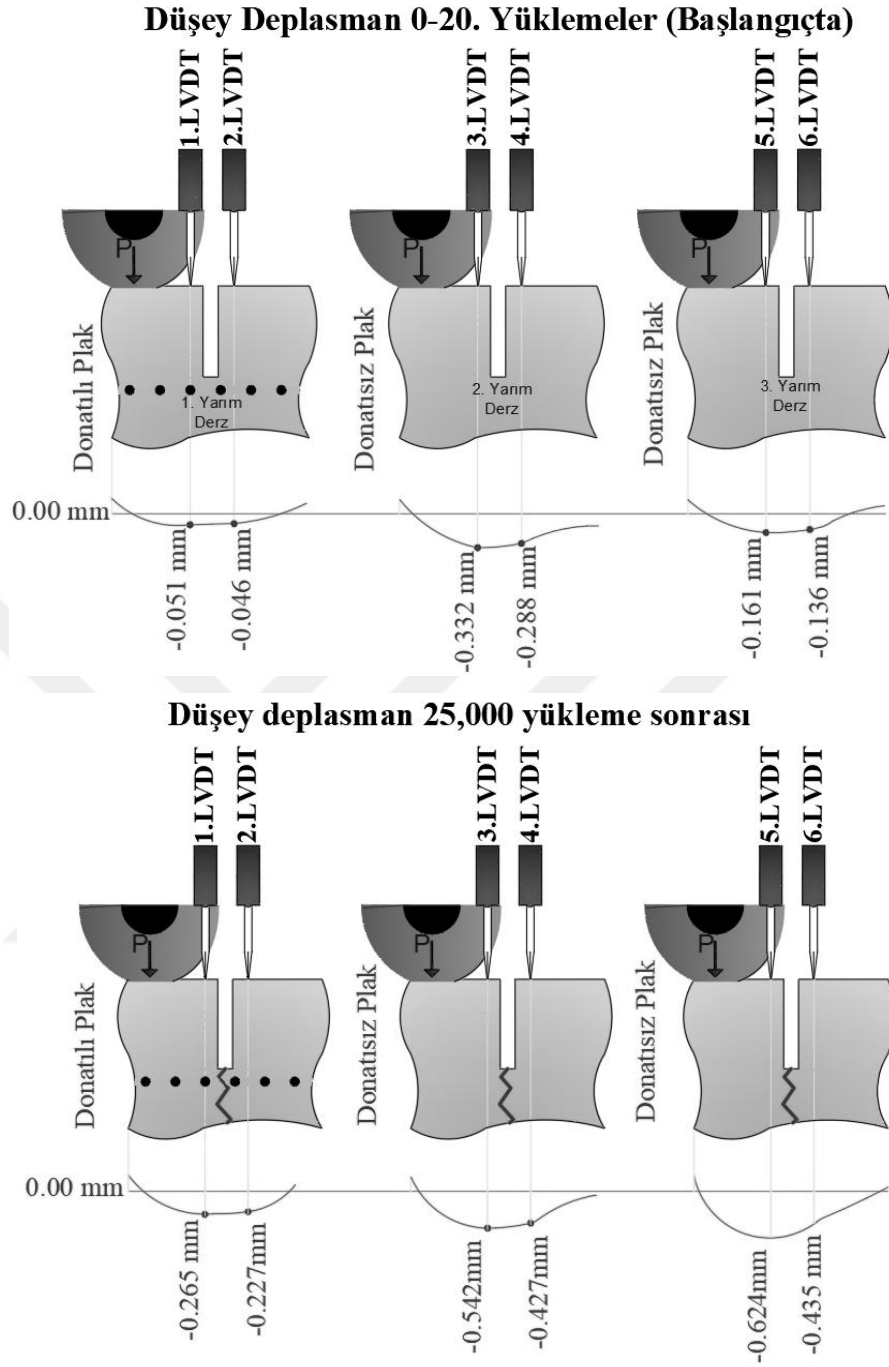
Bu çalışmada sadece doğu batı yönünde LTE değerleri incelenmiştir. Batı doğu yönünde de incelenebilir ancak bu incelemenin çalışmaya daha fazla veri katmayacağı düşünülmüştür. Tablo 3.7’de ise oluşan LTE değerleri hasır donatılı plakların LTE ortalaması ve donatısız plakların LTE ortalaması olarak hazırlanmıştır.

Tablo 3.6. Yüklemelerde oluşan LTE ve δ_{ave} değerleri

| Kuzey tarafı başlangıç yüklemeleri | Düşey Deplasman (δ), μm | | LTE, % (δ_U/δ_L*100) | δ_{ave} , μm ($(\delta_L+\delta_U)/2$) |
|-------------------------------------|---|--------------------------------------|---------------------------------------|---|
| | Derzin yüklü tarafı, $\delta_{yüklü}$ | Derzin boş tarafı, $\delta_{yüksüz}$ | | |
| Hasır Donatılı 1. Yarım Derz | 51 | 46.7 | 89.60 | 48.85 |
| Donatısız 2. Yarım Derz | 332 | 288 | 86.74 | 310 |
| Donatısız 3. Yarım Derz | 161 | 136 | 84.77 | 148.5 |
| Kuzey tarafı 25,000 yükleme sonrası | Düşey Deplasman (δ), μm | | LTE, % (δ_U/δ_L*100) | δ_{ave} , μm ($(\delta_L+\delta_U)/2$) |
| | Derzin yüklü tarafı, δ_L | Derzin boş tarafı, δ_U | | |
| Hasır Donatılı 1. Yarım Derz | 265 | 227.8 | 85.96 | 246.4 |
| Donatısız 2. Yarım Derz | 542 | 427 | 78.78 | 484.5 |
| Donatısız 3. Yarım Derz | 624 | 435 | 69.71 | 529.5 |
| Güney tarafı başlangıç yüklemeleri | Düşey Deplasman (δ), μm | | LTE, % (δ_U/δ_L*100) | δ_{ave} , μm ($(\delta_L+\delta_U)/2$) |
| | Derzin yüklü tarafı, δ_L | Derzin boş tarafı, δ_U | | |
| Hasır Donatılı 1. Yarım Derz | 19 | 16.8 | 88.42 | 17.9 |
| Donatısız 2. Yarım Derz | 283 | 237 | 83.74 | 260 |
| Donatısız 3. Yarım Derz | 151.5 | 121 | 79.86 | 136.25 |
| Güney tarafı 25,000 yükleme sonrası | Düşey Deplasman (δ), μm | | LTE, % (δ_U/δ_L*100) | δ_{ave} , μm ($(\delta_L+\delta_U)/2$) |
| | Derzin yüklü tarafı, δ_L | Derzin boş tarafı, δ_U | | |
| Hasır Donatılı 1. Yarım Derz | 79 | 64 | 81.01 | 71.5 |
| Donatısız 2. Yarım Derz | 363.5 | 270.4 | 74.38 | 316.95 |
| Donatısız 3. Yarım Derz | 184.6 | 134.2 | 72.69 | 159.4 |

Tablo 3.7. Ortalama LTE değerlerinin başlangıç ve 25,000 yükleme sonrası değerleri

| Ortalama LTE | Başlangıç Yüklemelerinde | 25,000 Yükleme Sonrası | Değişim (%) |
|-------------------|--------------------------|------------------------|-------------|
| Hasır Donatılı | 89.01 | 83.835 | 5.81 |
| Donatısız | 83.775 | 73.89 | 11.80 |
| Karşılaştırma (%) | 6.2 | 13.46 | |



Şekil 3.16. LTE hesaplanması için komşu plaklardan alınan deplasman değerleri

Beton plakların yükleme sırasında düşey yer değiştirmelerinin genel değerlendirmesi;

- LTE ile ilgili veriler değerlendirildiğinde, yarım derz kesilmiş 18 cm. kalınlığında donatısız beton kaplamalarda 64 kN (5.93 ESAL) yük altında başlangıç yük transfer

verimliliğinin yaklaşık %83 olduğu, bu oranın hasır donatı kullanılması durumunda %89 civarına ulaştığı belirlenmiştir.

- Beton plaklarda yarım derz yapımı sırasında kesilmeyecek şekilde plağın dip kısmından 6 cm yukarıya yerleştirilen hasır donatı, yüklemeler başladığında yaklaşık %6 yüklemelerin sonunda ise yaklaşık %13,5 daha fazla yük transfer verimliliği sağlamıştır.
- Donatısız plaklar başlangıçta ortalama %83 verimliliğe sahipken yüklemeler bittiğinde %11.80 azalarak ortalama %73.89 yük transfer verimliliğine sahip olmuştur. LTE'de oluşan bu düşüş derzdeki çatlakların ilerlenmesinden kaynaklanmaktadır.
- Plakların tamamı arazi koşullarıyla kıyaslandığında yaklaşık 300,000 ESAL yüklenmesine rağmen yük transfer verimliliği en düşük plak %69.71 oranına kadar düşmektedir. Bu oran ise birçok araştırmacı tarafından etkin yük transferi olarak kabul edilmiştir. (Bkz 1.8.1)

Genel olarak LVDT'lerde yüklemelerin başlangıcı ile sonunda oluşan değerler arasında bir artış beklenmekteydi. Neredeyse bütün LVDT'lerde bu sonuç elde edilmiştir. Ayrıca LTE değerleri de azalma göstererek bu sonucu desteklemiştir. Hasır donatılı derzlerde donatılar sayesinde oluşan deplasman az olduğu gibi yük aktarımı daha çok olmuştur. Yarım derzlerde tekrarlı yükler nedeniyle oluşan derz ilerleme çatlakları nedeniyle düşey sapmaları artmıştır bu durum LTE değerlerine de yansımıştır.

3.3. Asfalt Kaplamalarda Oluşan Değerler

Beton kaplama yorulma işlemi bittikten ve gerekli ölçümler alındıktan sonra asfalt kaplamaya geçilmiştir. 2 farklı asfalt kaplama kalınlığı yapılmıştır. Ayrıca 3. Yarım derz, güçlendirme malzemesi ile güçlendirilmiştir. Bu hali ile yapılan deneylerde elde edilen sonuçlar şöyledir.

3.3.1. Asfalt Kaplamalarda Okunan LVDT Değerleri

Beton üstü ince asfalt kaplaması yapıldıktan sonra LVDT'lerin beton plaklara yerleştirilmesi için asfalt kaplamanın plak kenarlarında yarım derzlere denk gelecek şekilde asfalt kırılmış beton plaklar ortaya çıkartılmış ve LVDT'ler bu alana (yaklaşık 5

cm²) yerleştirilerek ölçüm alınmıştır. Asfalt üzerinde oluşan LVDT ölçümleri güney ve kuzey güzergâhlar için 4 farklı tarihte alınmıştır. İki güzergâhta 6 LVDT'den 4 farklı tarihte alınan ölçümlerden toplamda 48 adet grafik elde edilmiştir. Beton kaplamada her güzergâh 25,000 kere yüklendiği halde asfalt kaplamalar 100,000 kere yüklendiğinden daha fazla LVDT ölçümü yapılmıştır. Grafikler bulgular kısmında paylaşılmamış, yerine oluşan en yüksek ve en düşük değerler ve bu iki değer arasındaki fark Tablo 3.8 ve Tablo 3.9'de verilmiştir. Ayrıca grafikler Ekler kısmına incelenebilmesi için koyulmuştur.

Asfalt kaplama imalatından sonra yapılan ölçümlerde elde edilen grafikler, düzenli olarak sık tekrar edilen tekrarlayan eğrilerinden oluşmaktadır. Bu eğriler birçok grafikte düzenlidir ancak 48 grafiğin 4 tanesinde Şekil 3.17'de görüldüğü gibi farklı değerler oluştuğu görülmüştür. Grafiklerde oluşan bu farklılıklar, LVDT'lerden, asfalt kaplamadan veya zeminden kaynaklı oluşmaktadır. Genellikle bu farklılıklar Şekil 3.18'de görüldüğü gibi eğrilerinin belirli bir tekrar yapısı dışında oluşan şekiller olarak ortaya çıkmıştır. Her bir grafikte en az 20 tekrarlıyan eğrilerde 1 veya 2 tane düzeni bozan değer olduğundan hesaba katılmadan kalan düzenli eğrilere bakılarak değerlendirmeler yapılmıştır. Ayrıca 3 nolu LVDT'nin kuzey güzergahında 16.01.2019 tarihinde yapılan ölçümlerde yaklaşık 100 kata varan yüksek sonuç aldığı görülmüştür. Oysa yarım derzin diğer tarafında bulunan 4 nolu LVDT'den normal sonuçlar alınmaktadır. Bu nedenle bu LVDT'nin bazı ölçümleri dikkate alınmamıştır. Daha sonra yapılan incelemelerle bu değer farkı 3 nolu LVDT'nin ölçümler sırasında içinde bulunan yayın takılması sonucu oluştuğu tespit edilmiştir.



Şekil 3.17. Tekrarlayan eğrileri bozan veriler

Tablo 3.8. Kuzey güz. bulunan LVDT’de oluşan en yüksek, en düşük ve fark değerleri

| | | KUZEY 8 cm kalınlığa sahip asfalt kaplama | | | | | |
|----------------------|---------|---|---------|----------------|---------|---------------|---------|
| | | 1. Yarım Derz | | 2. Yarım Derz | | 3. Yarım Derz | |
| | | 1. LVDT | 2. LVDT | 3.LVDT | 4.LVDT | 5. LVDT | 6.LVDT |
| 1. Ölçüm 05.01.19 | Max. mm | 0.0316 | 0.0065 | -0.0322 | -0.0142 | -0.0047 | 0.0189 |
| | Min.mm | -0.0505 | -0.1065 | -0.2959 | -0.3038 | -0.1041 | -0.1515 |
| | Fark mm | 0.0821 | 0.113 | 0.2637 | 0.2896 | 0.0994 | 0.1704 |
| 2. Ölçüm 16.01.19 | Max. mm | 0.1737 | 0.1872 | 2.3673 | 0.1092 | -0.0047 | 0.0521 |
| | Min.mm | 0.0065 | 0.0065 | -2.4284 | -0.3987 | -0.3597 | -0.355 |
| | Fark mm | 0.1672 | 0.1807 | 4.7957 | 0.5079 | 0.355 | 0.4071 |
| 3. Ölçüm 10.02.19 | Max. mm | 0.1326 | 0.1517 | 0.1769 | 0.2658 | 0.0615 | 0.1041 |
| | Min.mm | -0.0032 | -0.0549 | -0.5082 | -0.5269 | -0.6106 | -0.5018 |
| | Fark mm | 0.1358 | 0.2066 | 0.6851 | 0.7927 | 0.6721 | 0.6059 |
| 4. Ölçüm 22.02.19 | Max. mm | 0.1137 | 0.1356 | 0.3924 | 0.3038 | 0.0331 | 0.0994 |
| | Min.mm | -0.0063 | -0.0161 | -0.6208 | -0.4557 | -0.4923 | -0.4876 |
| | Fark mm | 0.12 | 0.1517 | 1.0132 | 0.7595 | 0.5254 | 0.587 |

Tablo 3.9. Güney güz. bulunan LVDT’de oluşan en yüksek, en düşük ve fark değerleri

| | | GÜNEY 5 cm kalınlığa sahip asfalt kaplama | | | | | |
|----------------------|---------|---|---------|---------------|---------|---------------|---------|
| | | 1. Yarım Derz | | 2. Yarım Derz | | 3. Yarım Derz | |
| | | 1. LVDT | 2. LVDT | 3.LVDT | 4.LVDT | 5. LVDT | 6.LVDT |
| 1. Ölçüm 07.06.18 | Max. mm | 0.2305 | 0.255 | 0.1351 | 0.1234 | 0.2793 | 0.2225 |
| | Min.mm | -0.0947 | -0.0678 | -0.5404 | -0.5363 | -0.3739 | -0.3929 |
| | Fark mm | 0.3252 | 0.3228 | 0.6755 | 0.6597 | 0.6532 | 0.6154 |
| 2. Ölçüm 19.06.18 | Max. mm | 0.3157 | 0.326 | 0.5329 | 0.1376 | 0.2461 | 0.2083 |
| | Min.mm | -0.0063 | -0.0032 | -0.505 | -0.5269 | -0.3597 | -0.3976 |
| | Fark mm | 0.322 | 0.3292 | 1.0379 | 0.6645 | 0.6058 | 0.6059 |
| 3. Ölçüm 16.10.18 | Max. mm | 0.1074 | 0.0968 | 0.0032 | 0.0997 | 0.1609 | 0.0615 |
| | Min.mm | -0.0032 | 0.0097 | -0.0064 | -0.4272 | -0.2414 | -0.3077 |
| | Fark mm | 0.1106 | 0.0871 | 0.0096 | 0.5269 | 0.4023 | 0.3692 |
| 4. Ölçüm 30.12.18 | Max. mm | 0.2273 | 0.2485 | 0 | 0.28 | 0.213 | 0.284 |
| | Min.mm | 0.0347 | 0.0646 | 0 | -0.5411 | -0.2982 | -0.2509 |
| | Fark mm | 0.1926 | 0.1839 | 0 | 0.8211 | 0.5112 | 0.5349 |

Asfalt kaplama sonrası LVDT'lerden alınan sonuçlar incelendiğinde, en yüksek değerlerin kuzey güzergâhta 0.615 mm güney güzergahta ise 0.5329 mm, en düşük değerlerin kuzey güzergahta -0.620 mm güney güzergahta ise -0.5404 mm olduğu görülmektedir. Genel olarak oluşan deplasmanlar 1 mm'nin altında çıkmıştır. LVDT'lerden okunan düşey deplasman değerleri incelendiğinde yükleme sayısı artması ile oluşan deplasman miktarının net bir şekilde arttığı veya azaldığı söylenememektedir. Aynı şekilde oluşan fark ve eksi değerler için de yükleme sayısı ile bir ilişki kurulamamıştır. Bunun nedeninin asfalt kaplamanın yükü aktarırken beton plağa gelene kadar bir miktar sönümlenmesi ve geniş alana yaymasıdır. Ayrıca asfalt kaplama yarım derz üzerinde kesintisiz bir tabaka olarak bulunmakta bu nedenle yükün beton plaktaki gibi tam derz ucunda etkisi, asfalt kaplandıktan sonra oluşmamaktadır. Bu durum deplasmanların daha az çıkmasına ve yükleme sayısı ile deplasman değerleri arasında bir bağıntı kurulmasına engel teşkil etmektedir. Genel olarak ortalama değerler üzerinden yorum yapılması için aşağıda Tablo 3.10, Tablo 3.11 ve 3.12 hazırlanmıştır. Tablo 3.11 ve 3.12'e karşılaştırma yapılabilmesi için asfalt öncesi beton plaktan alınan değerlerde eklenmiştir. Beton plaklarda başlangıç yüklemelerinde derz ilerleme çatlakları bulunmadığından bütün bir plak halinde hareket etmektedir. BÜİAK'ta ise derz ilerleme çatlakları mevcut olan beton plaklar üzerine asfalt kaplama yapılmıştır. Bu nedenle karşılaştırmanın daha doğru yapılabilmesi için beton plak son yüklemelerinin yani derz çatlaklarının olduğu halinin BÜİAK ilk ve son yüklemelerine karşılaştırması verilmiştir.

Tablo 3.10. BÜİAK ilk yüklemeler ve son yüklemelerde LVDT değerleri

| LVDT'lerin okuduğu tüm değerlerin ortalaması | | İlk yüklemeler (mm) | Son yüklemeler (mm) | Değişim mm (%) |
|--|-----------------------------|---------------------|---------------------|-----------------------|
| KUZEY TARAF (8 cm Asfalt) | Yüksek Değerler ortalaması: | 0.001 | 0.179 | 0.178 (%17800) |
| | Düşük Değerler Ortalaması: | -0.168 | -0.346 | 0.178 (%105.9) |
| | Farkın Ortalaması: | 0.169 | 0.526 | 0.357 (%211.2) |
| GÜNEY TARAF (5 cm Asfalt) | Yüksek Değerler ortalaması: | 0.207 | 0.250 | 0.043 (%20.7) |
| | Düşük Değerler Ortalaması: | -0.334 | -0.198 | 0.136 (-%40.7) |
| | Farkın Ortalaması: | 0.541 | 0.448 | 0.093(-%17.1) |

Tablo 3.11. BÜİAK ilk yüklemeler ve beton planlarda son yüklemelerde LVDT değerleri

| LVDT'lerin okuduğu tüm değerlerin ortalaması | | Beton üstü ince Asfalt plak (mm) | Beton Plaklar (mm) | Değişim mm (%) |
|--|-----------------------------|----------------------------------|--------------------|-----------------------|
| KUZEY TARAF (8 cm Asfalt) | Yüksek Değerler ortalaması: | 0.001 | 0.617 | 0.616 (%61600) |
| | Düşük Değerler Ortalaması: | -0.168 | -0.305 | 0.137 (%81.5) |
| | Farkın Ortalaması: | 0.169 | 0.922 | 0.4615 (%273) |
| GÜNEY TARAF (5 cm Asfalt) | Yüksek Değerler ortalaması: | 0.207 | 0.255 | 0.048 (%23.1) |
| | Düşük Değerler Ortalaması: | -0.334 | -0.215 | 0.119 (-%35.6) |
| | Farkın Ortalaması: | 0.541 | 0.47 | 0.071(-%13.1) |

Tablo 3.12. BÜİAK ve beton planlarda ilk yüklemelerde oluşan değerler ve değişim

| LVDT'lerin okuduğu tüm değerlerin ortalaması | | Beton üstü ince Asfalt plak (mm) | Beton Plaklar (mm) | Değişim mm (%) |
|--|-----------------------------|----------------------------------|--------------------|-----------------------|
| KUZEY TARAF (8 cm Asfalt) | Yüksek Değerler ortalaması: | 0.179 | 0.617 | 0.438 (%244) |
| | Düşük Değerler Ortalaması: | -0.346 | -0.305 | 0.041 (-%11.8) |
| | Farkın Ortalaması: | 0.526 | 0.922 | 0.396 (%75.2) |
| GÜNEY TARAF (5 cm Asfalt) | Yüksek Değerler ortalaması: | 0.250 | 0.255 | 0.005 (%2) |
| | Düşük Değerler Ortalaması: | -0.198 | -0.2149 | 0.0169 (%8.5) |
| | Farkın Ortalaması: | 0.448 | 0.47 | 0.022 (%4.9) |

Tablo 3.10,3.11,3.12 incelendiğinde şu bulgular elde edilmektedir;

- Tablo 3.10'da asfalt kaplama yapıldıktan sonra ilk yükleme ve 100.000 geçiş sonrası oluşan düşey deplasmanlarının ortalaması görülmektedir. Buna göre kuzey güzergâhta, plakta oluşan artı veya eksi yönde deplasman değerlerinde artış olduğu görülmektedir. Başlangıç ile 100,000 yükleme sonrası ortalama fark (toplam deplasman) 0.357 mm (%211.2) miktarında artmaktadır.
- Tablo 3.10'da Güney güzergahta ise artı yöndeki deplasmanda 0.048 mm (%23.1) artış olduğu halde eksi yöndeki deplasmanda 0.136 mm (%40.7) miktarında azalma tespit edilmiştir. Bu azalma 5 cm asfalt kaplama plaklarda daha fazla zemin sıkışması olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Asfalt kalınlığının diğer plağa göre az olması yükün daha fazla zemine ulaşmasına bu durumda zeminde daha fazla sıkışmalara neden olduğu düşünülmektedir.
- Tablo 3.10'da LVDT'lerin okuduğu değerler arasında farklar incelendiğinde, asfalt kaplama yapıldıktan sonra en yüksek düşey deplasman boş yarım derzde daha

sonra ara yüzey güçlendirmesi bulunan derzde görülmektedir. En düşük düşey deplasman ise donatılı plakta görülmektedir. Buna göre güney güzergahta ortalama fark, boş yarım derzde 0.23 mm iken ara yüzey güçlendirmesi bulunan derzde 0.53 mm donatılı derzde ise 0.62 mm'dir. Kuzey güzergahta ise değerler sırasıyla; 0.615 mm, 0.42 mm ve 0.144 mm'dir. Kuzey güzergahta ortalama fark değerleri güneye göre yaklaşık 0.01-0.08 mm aralığında azdır. Bunun nedeni kaplama kalınlığıdır.

- 100,000 geçişe rağmen gerek güney güzergahta gerekse kuzey güzergahta deplasman değerlerinde 0.5 mm fark oluşmamaktadır. Plak oynamalarının bu kadar az olması, kalınlık farkının düşey deplasmanlarda çok etkilemediğini göstermektedir.
- Şekil 3.11'de görüldüğü gibi beton plakta oluşan deplasmanlar ile asfalt kaplama yapıldıktan sonra ilk yüklemelerde oluşan deplasmanlar arasında genellikle beton kaplamalardaki deplasmanların daha yüksek çıktığı sonucu görülmektedir. Ancak güney güzergahta bu durum 0.07-0.11 mm miktarında değişmektedir. Ancak bu rakam işlem hatası bile olabilecek kadar küçük bir rakam olduğundan sonuç olarak değerlendirilmemiştir. Buna göre 8 cm asfalt kaplama yapıldığında ilk yüklemelerde beton plakta oluşan düşey deplasmanlardan daha düşük (yaklaşık 0.5 mm) deplasmanlar oluşmaktadır. 5 cm asfalt kaplamada ise beton plaktaki davranışa çok benzer bir davranış sergileyerek yaklaşık aynı miktarda deplasman oluşmaktadır.
- Beton plarlarda son yüklemelerde oluşan deplasman ile asfalt kaplama yapıldıktan sonra 100.000 geçiş sonucu oluşan deplasman değerleri karşılaştırıldığında; 8 cm asfalt kaplama, beton plaktan ortalama 0.396 mm (%75.2) daha düşük deplasman değeri üretmektedir. 5 cm asfalt kaplamada bu değer 0.022 (%4.9) değerini göstermektedir. Bu durumda da 5 cm asfalt kaplama oluşan deplasman beton plakta oluşan deplasmanla neredeyse aynı davrandığı ancak 8 cm asfalt kaplama yapıldığında ise düşey deplasman değeri %75 oranında azaldığı sonucuna varılmıştır.
- Asfalt kaplama yapıldıktan sonra gerek 5 cm gerekse 8 cm asfalt kaplamada plağın batması ile oluşan düşey deplasman (grafiklerdeki eksi değerler), beton plağın son yüklemelerinde oluşan deplasmandan ortalama 0.1-0.01 mm aralığında daha az çıkmaktadır. Bu durum, asfaltın üstünde yükü yayarak zemine ulaştırdığı ve devamlı yüklenmiş beton yollarda artık bu yönde düşey deplasmanların çok az

çıkmağa başladığı sonucu çıkmaktadır. Bu durumda arazide yapılacak beton yollarda birkaç sene yükleme yapılarak altındaki zeminin iyice sıkışmasının sağlanması daha sonra asfalt kaplama yapılmasının faydalı olacağı sonucuna ulaşılmıştır. Bir başka değişle, yıllarca trafik yükü ile yorulmuş beton yollarda asfalt kaplama yapılması, yükün oluşturacağı deplasman nedeniyle oluşacak deformasyonların daha az görülmesini sağlayacağı anlaşılmıştır.

- Asfalt kaplama yapıldıktan sonra alınan LVDT ölçüm verileri dikkatlice incelenmiş ve LTE değerleri hesaplanmaya çalışılmıştır. Ancak hassas ölçümlere rağmen LTE değerleri hesaplanamamıştır. Tablolar incelendiğinde asfalt kaplamanın yük aktarım verimliliğine katkısı olduğu tespit edilmiş, ancak bu katkının hesaplanması için yarım derzin yüklü tarafı ile yüksüz tarafı ayrımı verilerden elde edilememiştir. Tespit edilmeme nedeni ise asfalt kaplama, yarım derzin iki tarafı arasında yük aktarımı yapmakta ve LTE değerleri hesaplandığında kimi yerlerde %100'ün üzerine çıktığı görülmektedir. Veri toplayıcısının saniyenin 1/8'i aralığında veri alması özellikle asfalt sonrası LTE değerlerinin hesaplanamamasında önemli bir faktördür. Ancak yapılan incelemelerde beton üstü ince asfalt kaplama yapılmasının, beton plaklar arası yük aktarımına oranı hesaplanamasa da olumlu katkısı olduğu görülmüştür.

3.3.2. Asfalt Kaplamalarda Ölçülen Gerinim (Birim Şekil Değiştirme) Değerleri

Asfalt kaplama yapılmadan önce yarım derzlerin üzerine gerinim ölçerler yerleştirilmesi ile ilgili detaylı bilgi 2.3 bölümünde verilmiştir. Yerleştirilen gerinim ölçerlerin bazıları asfalt serimi ve sıkıştırma sırasında bazıları ise deneyler devam ederken veri üretmez hale gelmiştir. Tablo 3.13'te deney başlarken ve devam ederken gerinim ölçerlerin veri üretimi hakkında bilgi verilmiştir. Tabloda görüldüğü gibi 14 gerinim ölçerden bir tane kuzey güzergah bir tane de güneyde olmak üzere 2 tanesinden hiç veri alınamamıştır, 12 tanesi ise başarılı bir şekilde (literatürde benzer çalışmalarda elde edilen gerinim değerleri aralığında) veri üretmiştir [34,72,100,101,105,139]. Asfalt kaplama yapımı bittikten sonra deneye başlayan gerinim ölçer oranı %85.70'dir. Literatürde asfalt altına yerleştirilen gerinim ölçerde asfalt imalatı sırasında kayıplar nedeniyle veri alınmasının başarı oranı %70 olarak gösterilir [178]. Bu hali ile çalışma başarılı bir oranda gerinim ölçerlerin çalışması ve veri üretmesiyle başlamıştır. Deneyler sırasında güney

güzergâhta bulunan 2 gerinim ölçerde ise deney sonuna kadar veri alınamamıştır. Deney sonunu göremeyen gerinim ölçerlerden 2.derzde plak kenarında bulunanı yaklaşık deneylerin %50'sinde, yine 2. plakta tekerlek arasındaki bulunan gerinim ölçer ise deneylerin %75'i civarında kesilmiştir. Bu hali ile gerinim ölçerlerden veri alma başarı oranı %80.35'dir.

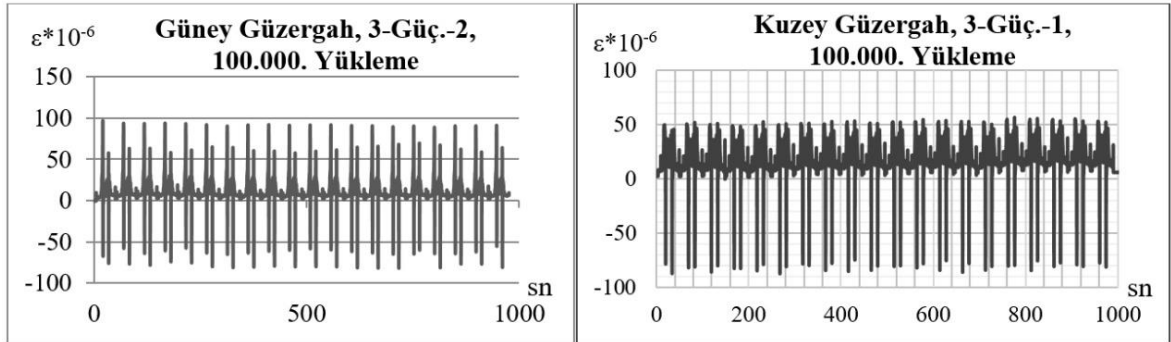
Tablo 3.13. Gerinim ölçerlerin, yerleri kısa adları ve veri toplama durumları

| Kuzey Güzergâh 5 cm Asfalt Kaplama Altı Gerinim Ölçerler | | | | |
|---|--------------------------------------|-----------|-------------------------------------|-------|
| No | Gerinim Ölçerin Yeri | Kısa Adı | Veri Durumu | Deney |
| K1-1 | Donatılı Beton Kuzey Tekerlek Altı | 1-Donatı | <input checked="" type="checkbox"/> | % 100 |
| K2-1 | Donatısız Beton LVDT Kenarı | 2-Kenar | <input checked="" type="checkbox"/> | % 100 |
| K2-2 | Donatısız Beton Kuzey Tekerlek Altı | 2-Teker-1 | <input checked="" type="checkbox"/> | % 100 |
| K2-3 | Donatısız Beton Tekerlek Arası | 2-Ara | <input checked="" type="checkbox"/> | % 100 |
| K2-4 | Donatısız Beton Güney Tekerlek Altı | 2-Teker-2 | <input checked="" type="checkbox"/> | % 100 |
| K3-1 | Derz Güçlendirme Kuzey Tekerlek Altı | 3-Güç.-1 | Veri Yok | %0 |
| K3-2 | Derz Güçlendirme Güney Tekerlek Altı | 3-Güç.-2 | <input checked="" type="checkbox"/> | % 100 |
| Güney Güzergâh 8 cm Asfalt Kaplama Altı Gerinim Ölçerler | | | | |
| No | Gerinim Ölçerin Yeri | Kısa Adı | Veri Alınma | Deney |
| G1-1 | Donatılı Beton Güney Tekerlek Altı | 1-Donatı | <input checked="" type="checkbox"/> | % 100 |
| G2-1 | Donatısız Beton LVDT Kenarı | 2-Kenar | <input checked="" type="checkbox"/> | % 50 |
| G2-2 | Donatısız Beton Güney Tekerlek Altı | 2-Teker-1 | Veri yok | %0 |
| G2-3 | Donatısız Beton Tekerlek Arası | 2-Ara | <input checked="" type="checkbox"/> | % 75 |
| G2-4 | Donatısız Beton Kuzey Tekerlek Altı | 2-Teker-2 | <input checked="" type="checkbox"/> | % 100 |
| G3-1 | Derz Güçlendirme Güney Tekerlek Altı | 3-Güç.-1 | <input checked="" type="checkbox"/> | % 100 |
| G3-2 | Derz Güçlendirme Kuzey Tekerlek Altı | 3-Güç.-2 | <input checked="" type="checkbox"/> | % 100 |
| Gerinim Ölçerler Veri Alma (Başarı) Oranı: | | | %85.70 | |
| Gerinim Ölçerler Bütün Deneyde Veri Alma Oranı: | | | %80.35 | |

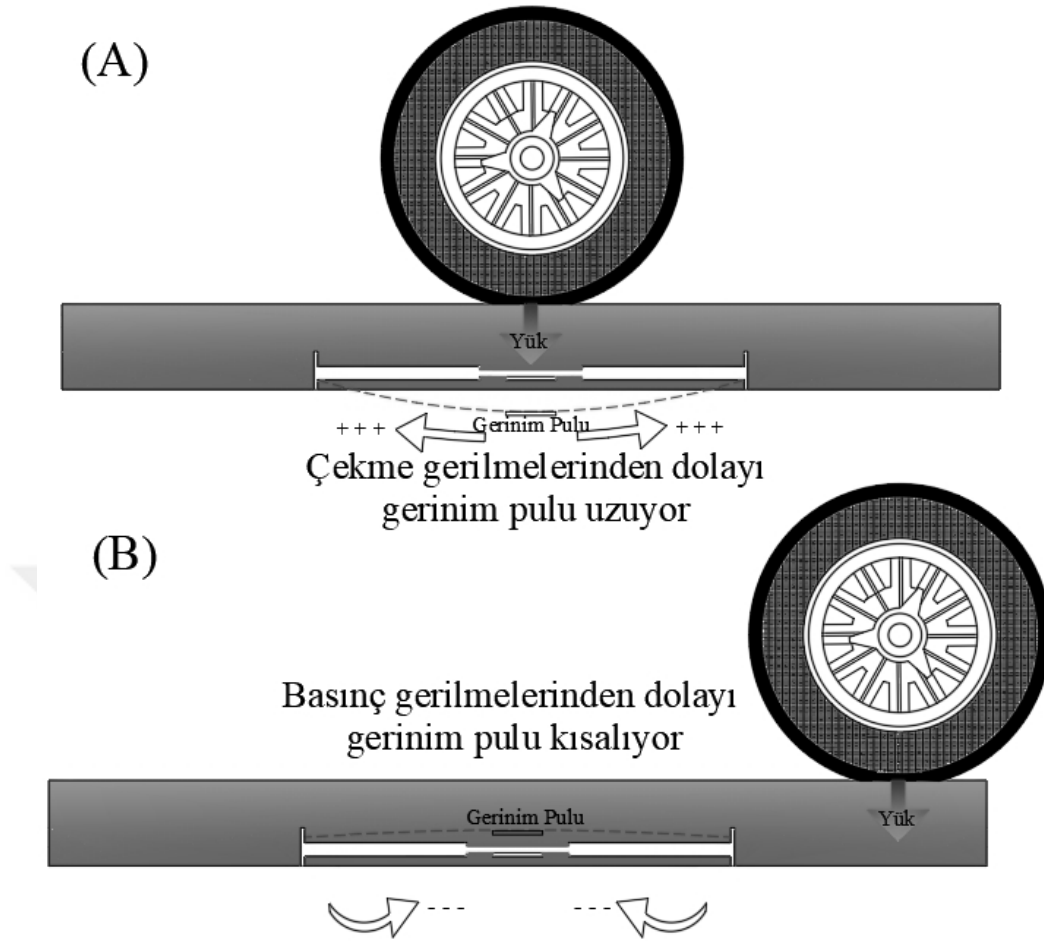
Asfalt kaplama altında bulunan gerinim ölçerlerden 25 farklı tarihte veri alınmış her bir veri alımında 6 grafik oluşmuştur. Toplamda oluşan grafik sayısı 150 tane dir. Bulgular kısmında tablo ve toplu grafikler halinde, grafiklerin özeti verilmiş ve gerekli irdeleme ve tartışma özetler üzerinden yapılmıştır. Ayrıca oluşan grafiklerin örnekleri de aşağıda Şekil 3.18'de verilmiştir. Geri kalan grafikler ise ekler kısmına koyulmuştur. Asfalt kaplamada gerinim değerleri ölçümleri sırasında sıcaklık ölçümleri takip edilmiştir. Tablo 3.14'te HYT tesisi dış ve iç sıcaklıkları ile asfalt alt yüzey sıcaklıkları verilmiştir. Asfalt kaplama alt yüzeyinde 8 ile 28 ° C aralığında sıcaklıkların değiştiği görülmektedir.

Tablo 3.14. Deneyler sırasında farklı tarihlerde sıcaklıklar

| Deney Güzergahı | Tarih | Yükleme | Toplam Yük. | Yükleme Yüzdesi | Dış Ortam Sıcaklık °C | HYT Tesis iç sıcaklık °C | Asfalt alt Yüzey Sıcaklık °C |
|-----------------|-----------|---------|-------------|-----------------|-----------------------|--------------------------|------------------------------|
| Güney | 24.May.18 | 100 | 100 | 0,05% | 22,1 | 22,2 | 21,9 |
| Güney | 22.Haz.18 | 6000 | 6000 | 3,00% | 24,5 | 28 | 27,9 |
| Güney | 23.Haz.18 | 7000 | 7000 | 3,50% | 25,2 | 28,1 | 28,2 |
| Güney | 27.Haz.18 | 8500 | 8500 | 4,25% | 25,7 | 27,4 | 27,6 |
| Güney | 1.Tem.18 | 11500 | 11500 | 5,75% | 24,9 | 26,2 | 26,5 |
| Güney | 20.Eyl.18 | 15000 | 15000 | 7,50% | 20,1 | 20,4 | 20,5 |
| Güney | 5.Eki.18 | 20000 | 20000 | 10,00% | 19,8 | 20,1 | 20,1 |
| Güney | 12.Eki.18 | 25000 | 25000 | 12,50% | 19,1 | 19,2 | 19,1 |
| Güney | 16.Eki.18 | 30000 | 30000 | 15,00% | 18,4 | 18,2 | 17,9 |
| Güney | 16.Kas.18 | 50000 | 50000 | 25,00% | 14,1 | 13,2 | 13 |
| Güney | 8.Ara.18 | 70000 | 70000 | 35,00% | 11,2 | 10,5 | 10,1 |
| Güney | 28.Ara.18 | 100000 | 100000 | 50,00% | 10,5 | 9,4 | 9,1 |
| Kuzey | 5.Oca.19 | 50 | 100050 | 50,03% | 10,3 | 10,1 | 9,2 |
| Kuzey | 7.Oca.19 | 6000 | 106000 | 53,00% | 11,8 | 11,3 | 9,3 |
| Kuzey | 8.Oca.19 | 7000 | 107000 | 53,50% | 12,1 | 10,5 | 9,2 |
| Kuzey | 9.Oca.19 | 8500 | 108500 | 54,25% | 10,2 | 9,8 | 9,4 |
| Kuzey | 12.Oca.19 | 11500 | 111500 | 55,75% | 10,7 | 10,4 | 9,5 |
| Kuzey | 13.Oca.19 | 75000 | 175000 | 87,50% | 11,6 | 11,3 | 9,6 |
| Kuzey | 16.Oca.19 | 20000 | 120000 | 60,00% | 10,8 | 10,2 | 9,5 |
| Kuzey | 18.Oca.19 | 25000 | 125000 | 62,50% | 9,5 | 8,7 | 8,9 |
| Kuzey | 20.Oca.19 | 30000 | 130000 | 65,00% | 8,4 | 8,1 | 8,5 |
| Kuzey | 23.Oca.19 | 40000 | 140000 | 70,00% | 10,1 | 8,9 | 8,6 |
| Kuzey | 30.Oca.19 | 50000 | 150000 | 75,00% | 11,7 | 11,1 | 9,5 |
| Kuzey | 10.Şub.19 | 70000 | 170000 | 85,00% | 10,9 | 10,4 | 9,6 |
| Kuzey | 22.Şub.19 | 100000 | 200000 | 100,00% | 12,7 | 11,5 | 9,7 |



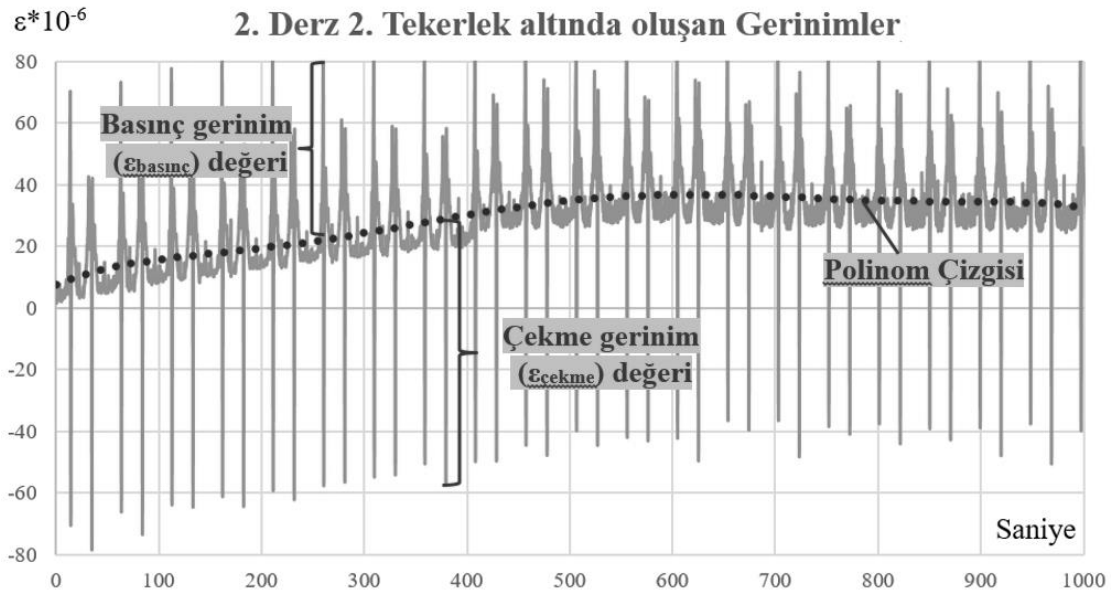
Şekil 3.18. Gerinim grafik örnekleri



Şekil 3.19. Grafikte değerlerin oluşum şekli

Grafiklerin tamamında tekrarlayan eğriler şeklinde artı ve eksi gerinim değerleri oluştuğu görülmüştür. Şekil 3.19 (A) kısmında görüldüğü gibi artı gerinim değerleri asfalt alt tabakasında çekme (gerinim pulunun uzamasından) dolayı oluştuğundan daha kritik değerlerdir. Bu değerler grafikte eksi olan kısımda gösterilmiştir. (Sınır şartları ters girildiğinden). Bu gerinimleri karıştırmamak için çekme gerinimi denilmiştir. Çekme gerinimleri grafiklerin eksi değerlerinden okunmuşlardır. Basınç gerinimleri grafiklerin artı kısmına verilen ad olmuştur ve Şekil 3.19 (B) kısmında görüldüğü gibi oluşmaktadır. Bu değerler ise grafiklerde artı değerlerden okunarak yorumlanmıştır. Grafikler genel olarak değerlendirildiğinde basınç gerilmelerinin oluşturduğu gerinimlerin en yüksek değeri $299 \cdot 10^{-6} \text{ mm/mm}$ dir. Bu değer çekme gerinimlerinden yüksek olmasına rağmen bölüm 1.12'de anlatıldığı gibi asfaltın alt tabanında oluşan çekme gerilmeleri daha kritiktir. Bu nedenle basınç gerinimlerinin değerlendirme sırasında kritik değerler olmadığından daha az irdelenmiştir.

Grafik değerlerinin okunması sırasında yatay sıfır çizgisine göre en düşük veya en yüksek veri değeri alınmamıştır. Zira değerlerde, yüklemelerden dolayı oluşan deplasmanların bir kısmı geri dönmekte dolayısıyla biriken bir fark oluşmaktadır. Bu fark bazı durumlarda asfaltın kendisinden kaynaklanabildiği gibi, bazı durumlarda gerinim ölçer pulunun yapılandırıldığı metal aksamdan da kaynaklanabilmektedir. Değerler tablolar için hazırlanmış polinom eğilim çizgileri kullanılarak değerlendirilmiştir. Şekil 3.20’de örnek bir polinom çizgisi ve değer okunma şekli görülmektedir.



Şekil 3.20. Polinom çizgisi ve değerlerin tespiti

5 cm asfalt kaplama için yapılan deneyler 24 Mayıs 2018 tarihinde başlamış ancak çeşitli aksaklıklar nedeniyle 7 ay kadar sürmüş ve 28 Aralık 2018 tarihinde bitirilmiştir. 8 cm asfalt kaplama için yapılan deneyler ise 5 Ocak 2019 tarihinde başlamış yaklaşık 1.5 ay sonra 22 Şubat'ta son bulmuştur. 5 cm asfalt deneylerinin %20'si Mayıs- Ekim ayları arasında, geri kalan %80'lik kısmı ise Ekim-Aralık ayları içerisinde bitirilmiştir. Bu nedenle plaklar arasında sıcaklık farkından dolayı oluşacak gerinim farklarının olduğu hesaba katılmış ancak 2 farklı asfalt kaplamadaki toplam deneyin neredeyse %90'lık kısmı Ekim-Şubat ayları aralığında yapıldığı için sonuçların beraber değerlendirilmesinde bir sakınca görülmemiştir.

3.3.2.1. Asfalt Kaplamaların Alt Yüzeyinde Oluşan Basınç Gerinimleri

Basınç gerinimleri ile ilgili aşağıda Tablo 3.15 ve Tablo 3.16’te yükleme sayıları, tarihler ve oluşan en yüksek gerinim değerleri görülmektedir.

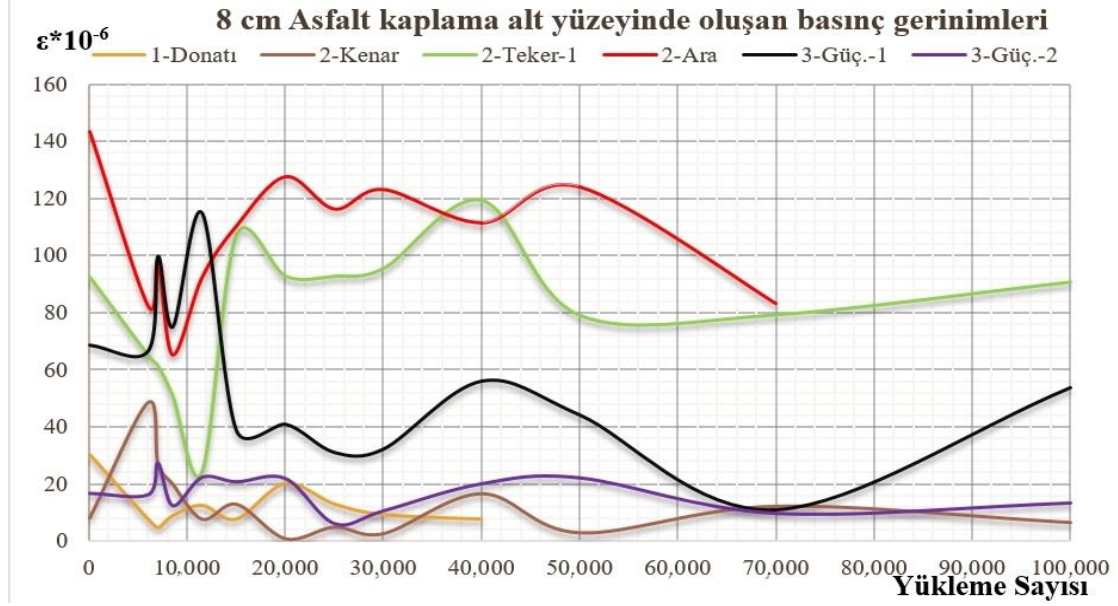
Tablo 3.15. 5 cm asfalt kap. yüklemeler ve oluşan gerinim en yüksek değerleri ($\epsilon \cdot 10^{-6}$)

| Güney güzergâh (5 cm asfalt kalınlığı.) oluşan basınç gerinimleri. (*10⁻⁶) | | | | | | | |
|---|---------|----------|---------|-----------|---------|-----------|----------|
| Tarih | Yükleme | 1-Donatı | 2-Kenar | 2-Teker-1 | 2-Ara | 2-Teker-2 | 3-Güç.-2 |
| 24.May.18 | 40 | 55.64 | 35.03 | 150.893 | 106.243 | 55.86 | 194.62 |
| 22.Haz.18 | 6,000 | 68.23 | 14.88 | 197.145 | 131.65 | 122.27 | 217.066 |
| 23.Haz.18 | 7,000 | 58.84 | 10.76 | 164.63 | 84.033 | 85.178 | 181.84 |
| 27.Haz.18 | 8,500 | 65.94 | 14.19 | 189.58 | 110.36 | 112.19 | 236.56 |
| 1.Tem.18 | 11,500 | 74.41 | 11.44 | 200.35 | 105.32 | 144.39 | 299.49 |
| 20.Eyl.18 | 15,000 | 55.82 | 12.36 | 171.61 | 86.545 | 123.595 | 233.43 |
| 5.Eki.18 | 20,000 | 37.23 | 13.28 | 142.87 | 67.77 | 102.8 | 167.37 |
| 16.Eki.18 | 30,000 | 35.49 | 8.24 | 145.85 | 68.92 | 86.78 | 168.98 |
| 16.Kas.18 | 50,000 | 20.6 | 14.88 | 156.61 | 45.56 | 85.4 | 107.38 |
| 8.Ara.18 | 70,000 | 22.43 | 35.23 | 163.94 | 56.55 | 121.12 | 122.27 |
| 28.Ara.18 | 100,000 | 44.87 | 5.26 | 165.318 | 18.77 | 90.9 | 91.81 |

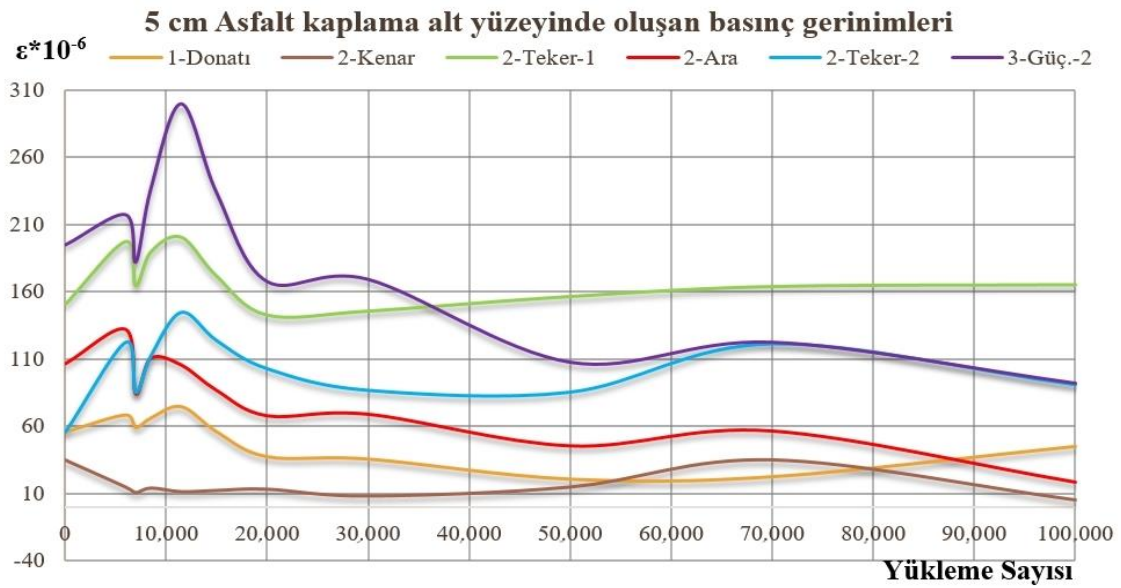
Tablo 3.16. 8 cm asfalt kap. yüklemeler ve oluşan gerinim en yüksek değerleri ($\epsilon \cdot 10^{-6}$)

| Kuzey güzergâh (8 cm asfalt kalınlığı.) oluşan basınç gerinimleri (Değerler*10⁻⁶) | | | | | | | |
|---|---------|----------|---------|-----------|---------|----------|----------|
| Tarih | Yükleme | 1-Donatı | 2-Kenar | 2-Teker-1 | 2-Ara | 3-Güç.-1 | 3-Güç.-2 |
| 5.Oca.19 | 40 | 30.224 | 8.014 | 92.5 | 143.56 | 68.69 | 16.71 |
| 7.Oca.19 | 6,000 | 7.78 | 48.68 | 65.02 | 82.2 | 66.63 | 16.25 |
| 8.Oca.19 | 7,000 | 4.8 | 26.79 | 61.36 | 97.54 | 99.83 | 27.47 |
| 9.Oca.19 | 8,500 | 8.93 | 19.92 | 50.83 | 65.02 | 75.1 | 12.36 |
| 12.Oca.19 | 11,500 | 12.59 | 7.55 | 24.27 | 92.27 | 114.94 | 22.43 |
| 13.Oca.19 | 15,000 | 7.78 | 12.82 | 107.159 | 110.365 | 38.69 | 20.83 |
| 16.Oca.19 | 20,000 | 20.15 | 0.68 | 92.73 | 127.66 | 40.98 | 21.98 |
| 18.Oca.19 | 25,000 | 13.05 | 4.8 | 92.73 | 116.31 | 31.05 | 5.95 |
| 20.Oca.19 | 30,000 | 9.38 | 2.51 | 95.48 | 123.18 | 32.28 | 10.53 |
| 23.Oca.19 | 40,000 | 7.78 | 16.55 | 119.29 | 111.51 | 56.09 | 20.15 |
| 30.Oca.19 | 50,000 | | 2.78 | 78.99 | 124.1 | 44.19 | 22.21 |
| 10.Şub.19 | 70,000 | | 12.13 | 79.22 | 83.11 | 10.99 | 9.61 |
| 22.Şub.19 | 100,000 | | 6.4 | 90.67 | | 53.8 | 13.28 |

Tablo 3.14 ve 3.15 incelendiğinde tekerlek altında oluşan en düşük kritik gerinim değerinin $4.8 \cdot 10^{-6}$ en yüksek olanın da $299.49 \cdot 10^{-6}$ olduğu görülmektedir. Tekerlek altında bulunan gerinim değerleri beklenildiği gibi plak kenarından ölçülen değerlerden daha yüksek çıkmıştır. Tablolardan elde edilen verilere ait en yüksek basınç gerinimleri ile ilgili grafikler Şekil 3.21 ve Şekil 3.22’de verilmiştir;

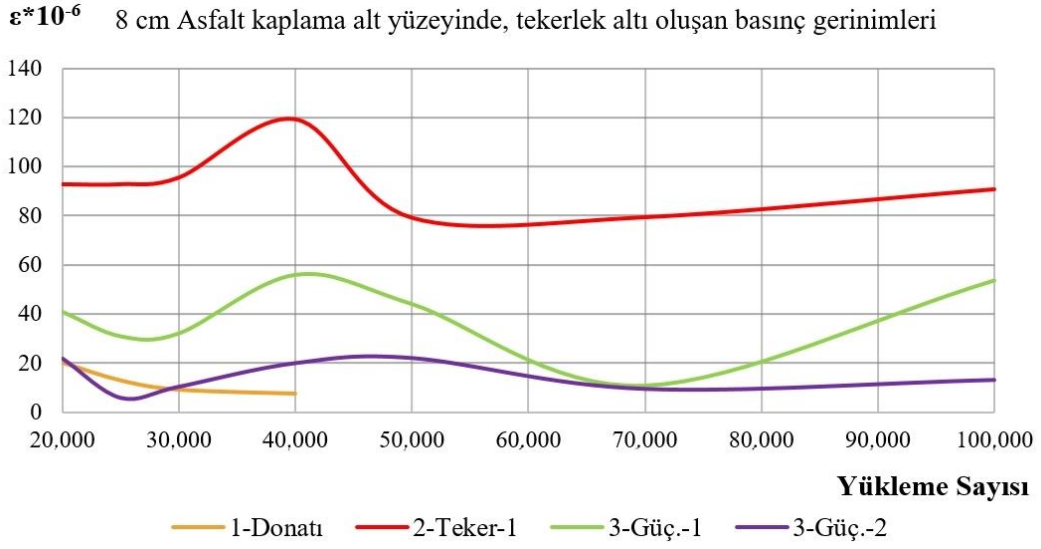


Şekil 3.21. 8 cm asfalt kap. bulunan bütün gerinim ölçerlerin basınç gerinim değerleri

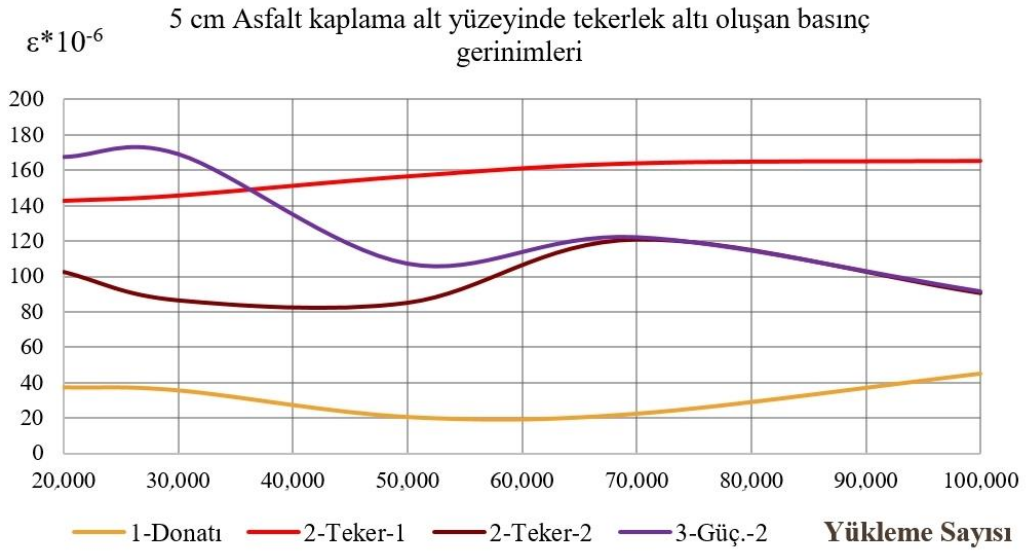


Şekil 3.22. 5 cm asfalt kap. bulunan bütün gerinim ölçerlerin basınç gerinim değerleri

Grafikler incelendiğinde, ilk 20,000 yüklemde her iki asfalt kalınlığında da değerlerde oynamaların fazla olduğu görülmektedir. Özellikle 8 cm asfalt kaplamada bu durum daha net şekilde hissedilmektedir. Bunun nedeninin tasarımlar sırasında bırakılan boşluklar ile alakalı olduğu düşünülmektedir. Karayolları Teknik Şartnamesine göre asfalt kaplamaların tasarımlarında %3-6 arasında hava boşluğu bırakılması gerekmektedir [184]. Bu boşluk tekerlek izi oluşumlarını en fazla geciktiren oran olarak bilinmektedir [185]. Bu oran granülometre ve silindirle sıkıştırma sırasında gereken prosedüre uyularak sağlanmaktadır. HYT tesis içerisine TRBB tarafından, mahalle/köy yollarına yapılan asfalt kaplamanın aynısı inşa edilmiş ve tesis içerisinde imkânlar dâhilinde sıkıştırma yapılmıştır. İlk 20,000 yüklemde bu boşluğun sıkışması esnasında beklenmedik gerinim değerleri oluşmaktadır. Daha sonraki yüklemelerde asfaltın sıkışması kısmen tamamlandığından oluşan değerler daha düzgün ilerlemektedir. Nitekim 5 cm asfalt kaplamada, kalınlığın azlığı nedeniyle sıkışma daha fazla sağlandığından basınç gerinim değerlerinin birbiri ile korelasyonunun kurulması daha kolay yapılmıştır. Değerlere bakıldığında 5 cm asfalt kaplamada güçlendirilmiş derzde bulunan gerinim ölçerden alınmış olan $300 \cdot 10^{-6}$ değeri en yüksek değerdir. Bu değere en yakın değer ise aynı gerinim ölçerde okunmuş olan $217 \cdot 10^{-6}$ değeridir. Bu iki değerde 20,000 yüklemmeden önce oluşmuştur. Bu nedenle farklı özelliklere sahip plaklar arasında değerlendirme yapılması sırasında ilk 20,000 basınç gerinim değerinin göz ardı edilmesinin daha doğru sonuçlara ulaştıracağı kanaatine varılmıştır. Aşağıdaki Şekil 3.23 ve Şekil 3.24'te görülen grafikler sadece derzlerde tekerlek altında bulunan gerinim ölçerlerin değerlerinden elde edilmiştir. Bu grafiklerde kenara yerleştirilmiş gerinim ölçerinin verisi eklenmemiştir. Ayrıca karşılaştırmayı kolaylaştırması açısından, derzlerde tekerlek altında kalan gerinim ölçerlerin ortalama değerleri Tablo 3.17'de verilmiştir. Bu tabloda aynı derzde iki tekerlek altında da gerinim ölçer bulunuyorsa bu iki gerinim ölçerinin ortalaması alınmıştır.



Şekil 3.23. 8 cm asfaltta tekerlek altında kalan gerinim ölçerlerden alınan değerler



Şekil 3.24. 5 cm asfaltta tekerlek altında kalan gerinim ölçerlerden alınan değerler

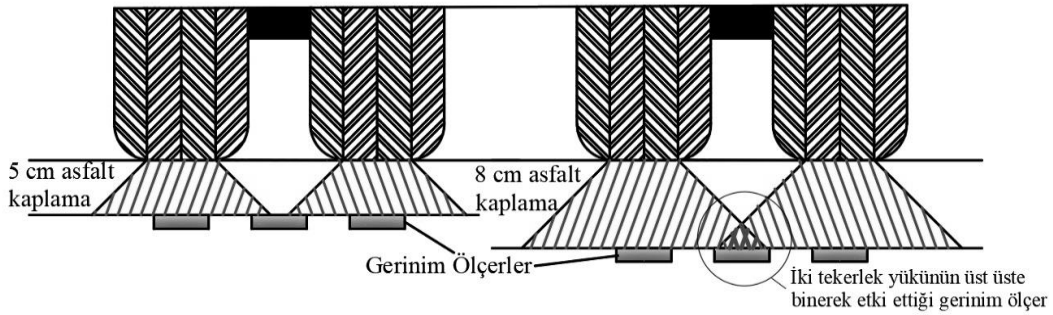
Tablo 3.17. Gerinim ölçerlerde oluşan ortalama basınç gerinimleri

| | 1. Derz Donatılı $\epsilon \cdot 10^{-6}$ | 2. Derz Donatısız $\epsilon \cdot 10^{-6}$ | 3. Derz Güçlendirme $\epsilon \cdot 10^{-6}$ |
|-------------|--|---|---|
| 8 cm asfalt | 12.59 | 92.73 | 26.64 |
| 5 Cm Asfalt | 32.14 | 126.15 | 108.6 |
| % Fark | % 155.2 | % 36 | % 300.5 |
| Ortalama | 22.36 | 109.44 | 67.62 |

- Grafikler ve tablo incelendiğinde donatısız ve ara yüzey güçlendirmesi bulunmayan 2. derzde ortalama basınç gerinim değeri diğer iki plağa göre, 5 cm asfalt kaplamada da 8 cm asfalt kaplamada da daha fazla olmaktadır. En düşük değer ise 1.derzin bulunduğu donatılı plakta oluşmaktadır. 5 ve 8 cm'de oluşan gerinim değerlerinin ortalaması alındığında donatılı plakta tekerlek altında oluşan gerinimler ile boş plakta oluşan gerinimler arasındaki fark $87.08 \cdot 10^{-6}$ (%389.44) değerindedir. Güçlendirmeli plak tekerlek altı gerinim ile boş plakta tekerlek altında gerinim arasındaki fark ise $45.26 \cdot 10^{-6}$ %202.41 değerindedir. Özetle donatılı plakta 3.8 kat, güçlendirilmiş plakta ise yaklaşık 2 kat daha az basınç gerinimi oluşmaktadır.
- Asfalt kalınlığının 8 cm'den 5 cm'e düşmesi gerinim değerlerini donatılı derzde %155.2 artırmıştır. Ancak bu hali ile bile oluşan gerinim $32.14 \cdot 10^{-6}$ değeri ile tabloda gösterilen gerinimlere oranla oldukça düşük seviyelerdedir. Diğer plaklara bakıldığında da benzer sonuçlar elde edilebilir. Asfalt kalınlığının azalması oluşan basınç gerinmelerinin ortalama değerini donatısız plakta $126.15 \cdot 10^{-6}$, güçlendirilmiş plakta ise $108.6 \cdot 10^{-6}$ seviyelerinde tutmaktadır.
- Ara yüzey güçlendirme bulunan derzde 8 cm kalınlıklı asfalta kaplama, 5 cm asfalt kalınlıklı kaplamaya göre gerinim değerlerini yaklaşık 3 kat artırmıştır. Bu durum güçlendirme malzemesinin yüksek mukavemet değerli (yaklaşık 120 MPa elastisite modülüne sahip) rijit bir malzeme olmasından kaynaklandığı sonucunu doğurmuştur. Zira rijit malzeme etkiye tepkiyi neredeyse kayıpsız göstermiş bu durum da tekerlek yükü nedeniyle bitüm içinde çakıllar yer değiştirmek istemiş ve plak alt kısmında bu yer değiştirme isteği gerinimlere neden olmuştur. 8 cm kalınlıkta ise bu durum kalınlık nedeniyle daha fazla tolere edilmiştir. (yaklaşık 3 kat)
- HYT sisteminde çift tekerlek kullanılarak yükleme yapıldığından, tekerleklerin altında oluşacak gerinimler birbirleriyle karşılaştırılmıştır. 5 cm kalınlığa sahip asfalt plakta 2. Derzde, 8 cm asfalt kalınlığa sahip plakta ise 3.derzde her iki tekerleğin altındaki gerinim ölçerlerden sonuç alınmıştır. Ancak 2. derzde iki tekerlek arasında $57.5 \cdot 10^{-6}$ (%60) basınç gerinim farkı olduğu, 3. derzde ise tekerlek altındaki gerinim ölçerlerde bu farkın $40.5 \cdot 10^{-6}$ (%300) kadar olduğu görülmüştür. Bu farkın oluşma nedeni asfalt kalınlıkları ile alakalıdır. Sisteme asfalt kaplama yapılacağı zaman kuzey güzergaha 8 cm güney güzergaha 5 cm kaplama kalınlığı oluşturmak için orta güzergah geçiş bölümü olarak bırakılmıştır. Ancak sistemin bir bacağı orta güzergaha bastığı için kuzeye doğru yaklaşık 0.75° açı ile yatık çalışmıştır. Bu farkın

oluşmaması için sistem defalarca dengeye alınmaya çalışılmış, kuzey tarafta kalan kolon altına fazladan destek koyulmuştur. Ancak yüklemeler sırasında oluşan yeni sıkışma değerleri bu farkı tekrar tekrar ortaya çıkarmıştır. Sonuç olarak iki tekerlek arasında farkın $40-60 \cdot 10^{-6}$ gibi ihmal edilebilecek basınç gerinim mertebesinde kalması sağlanabilmiştir.

- İki tekerleğin arasında kalan gerinim ölçerin basınç değerleri incelendiğinde, 8 cm asfalt kaplamada tekerlek altında bulunan gerinim ölçerden ortalama $25.622 \cdot 10^{-6}$ (%31.71) daha fazla basınç gerinimi oluşmaktadır. Ancak 5 cm kaplamada tekerleklerin altında bulunan gerinim ölçerlerin değerleri, iki teker arasında bulunandan $55.26 \cdot 10^{-6}$ (%68.94) daha fazla çıkmıştır. Bu durumun oluşma nedeni Şekil 3.25'te gösterildiği gibi kalınlık farkının azalmasından dolayı esnek kaplama tarafından yayılarak alta iletilen yükte kesişen kısımların daha az olmasıdır. Ayrıca 8 cm asfalt daha kalın olmasına rağmen yukarıdaki nedenden dolayı tekerlekle arasında oluşan basınç gerinimi 5 cm asfalt kaplamaya göre $26,246 \cdot 10^{-6}$ (%32,74) daha fazla çıkmıştır.



Şekil 3.25. Tekerlekler arasında kalan gerinim ölçere gelen yükler

3.3.2.2. Asfalt Kaplamaların Alt Yüzeyinde Oluşan Çekme Gerinimleri

Bu çalışmanın ekler kısmında asfalt kaplamada oluşan gerinimleri veren grafiklerin özetleri tablolar olarak aşağıda verilmiştir. Buna göre grafiklerden okunan en yüksek artı değerlere göre hazırlanmış olan yarım derzlerin üzerinde bulunan gerinim ölçerlerden alınan çekme gerinimlerinin en yüksek değerleri aşağıda Tablo 3.18 ve Tablo 3.19'da verilmiştir. Bu değerlerin grafik hali ise Şekil 3.26 ve 3.27'de verilmiştir. Grafikten eksi

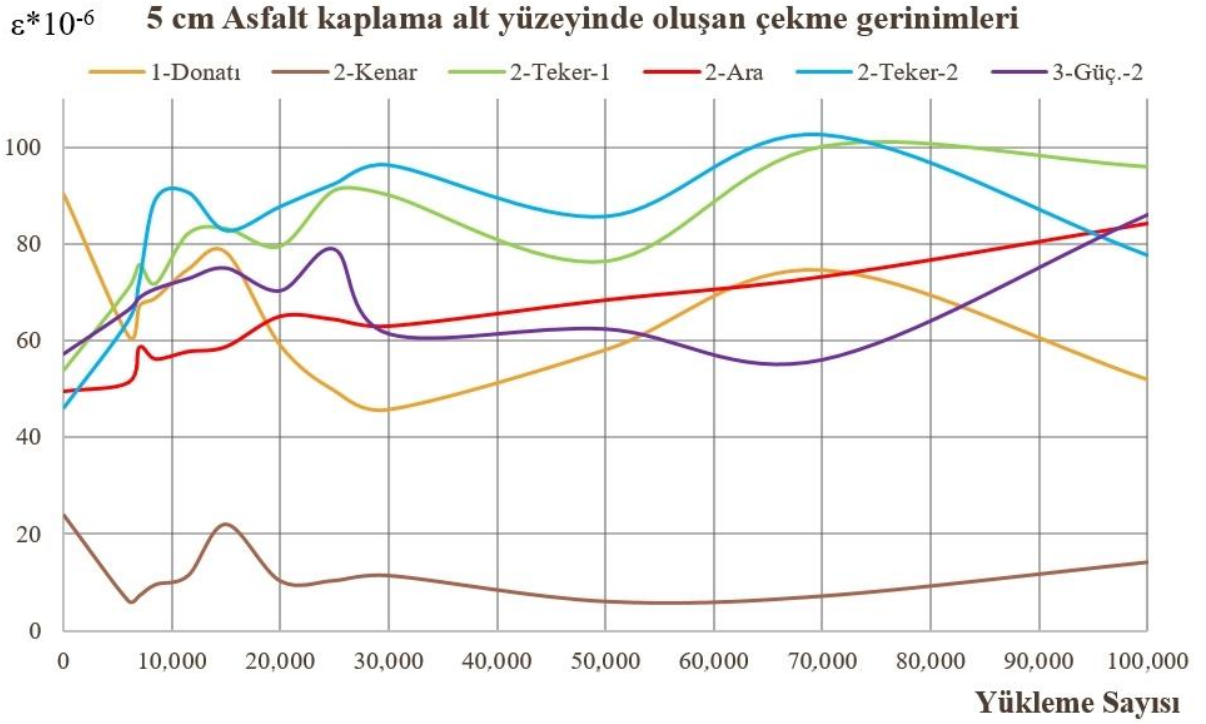
değerlere bakılmıştır ancak değerler mutlak değere alınarak grafikte ve tablolarda yorumlanmıştır.

Tablo 3.18. 5 cm asfalt kap. yüklemeler ve oluşan gerinim en yüksek değerleri ($\epsilon \cdot 10^{-6}$)

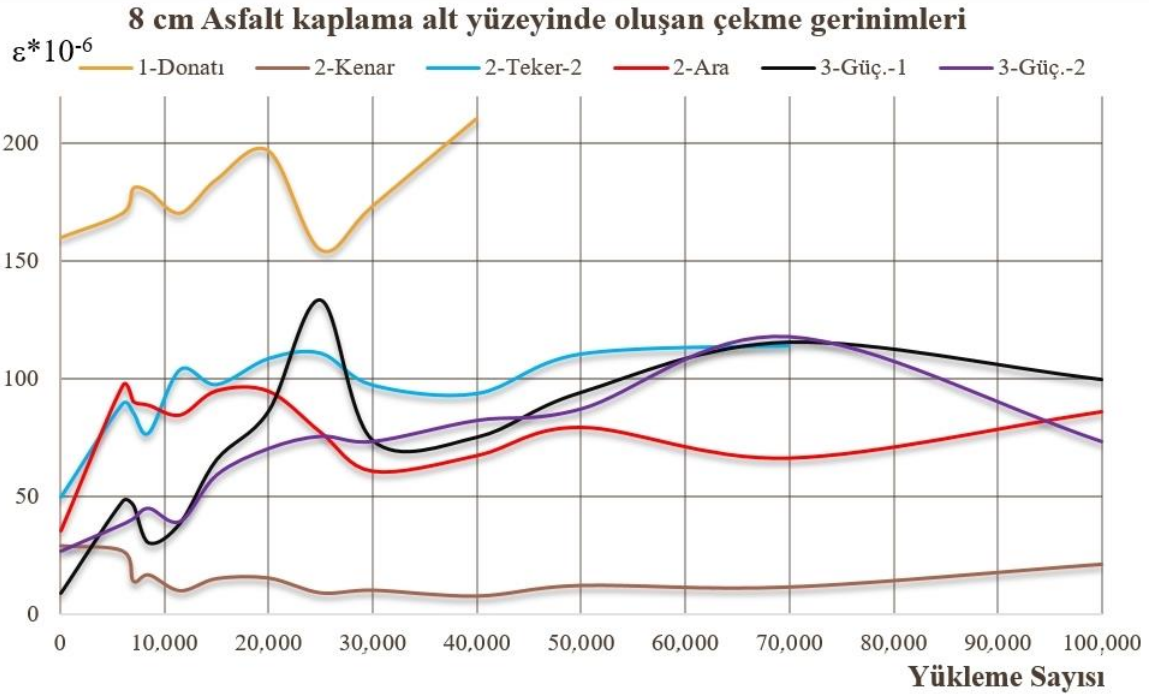
| Güney güzergâh (5 cm asfalt kalınlığı.) oluşan çekme gerinimleri. (Değerler*10^{-6}) | | | | | | | |
|---|---------|----------|---------|-----------|--------|-----------|----------|
| Tarih | Yükleme | 1-Donatı | 2-Kenar | 2-Teker-1 | 2-Ara | 2-Teker-2 | 3-Güç.-2 |
| 24.May.18 | 40 | 90.28 | 23.813 | 54.06 | 49.45 | 46.05 | 57.36 |
| 22.Haz.18 | 6,000 | 60.98 | 6.182 | 70.98 | 51.29 | 64.16 | 66.4 |
| 23.Haz.18 | 7,000 | 67.25 | 7.32 | 75.79 | 58.617 | 72.41 | 68.9 |
| 27.Haz.18 | 8,500 | 68.92 | 9.6 | 71.89 | 56.15 | 89.26 | 70.715 |
| 1.Tem.18 | 11,500 | 74.85 | 11.44 | 82.2 | 57.69 | 90.62 | 72.81 |
| 20.Eyl.18 | 15,000 | 78.3 | 21.98 | 83.23 | 58.71 | 82.71 | 74.98 |
| 5.Eki.18 | 20,000 | 59.06 | 10.304 | 79.59 | 65.02 | 87.71 | 70.32 |
| 12.Eki.18 | 25,000 | 49.68 | 10.41 | 91.12 | 64.34 | 92.41 | 78.85 |
| 16.Eki.18 | 30,000 | 45.79 | 11.44 | 90.1 | 62.96 | 96.28 | 61.44 |
| 16.Kas.18 | 50,000 | 58.16 | 6.11 | 76.47 | 68.37 | 85.63 | 62.44 |
| 8.Ara.18 | 70,000 | 74.66 | 7.23 | 100.12 | 73.2 | 102.58 | 56.12 |
| 28.Ara.18 | 100,000 | 51.977 | 14.19 | 95.94 | 84.257 | 77.58 | 85.98 |

Tablo 3.19. 8 cm asfalt kap. yüklemeler ve oluşan gerinim en yüksek değerleri ($\epsilon \cdot 10^{-6}$)

| Kuzey güzergâh (8 cm asfalt kalınlığı.) oluşan çekme gerinimleri (Değerler*10^{-6}) | | | | | | | |
|---|---------|----------|---------|-----------|-------|----------|----------|
| Tarih | Yükleme | 1-Donatı | 2-Kenar | 2-Teker-1 | 2-Ara | 3-Güç.-1 | 3-Güç.-2 |
| 5.Oca.19 | 40 | 159.82 | 29.3 | 50.01 | 35.49 | 9.15 | 27.01 |
| 7.Oca.19 | 6,000 | 170.23 | 27.01 | 89.59 | 97.08 | 48.3 | 38.46 |
| 8.Oca.19 | 7,000 | 180.75 | 13.96 | 85.64 | 90.21 | 46.47 | 40.78 |
| 9.Oca.19 | 8,500 | 179.36 | 16.71 | 77.18 | 88.61 | 30.45 | 45.18 |
| 12.Oca.19 | 11,500 | 170.21 | 9.84 | 103.89 | 84.49 | 38.91 | 39.61 |
| 13.Oca.19 | 15,000 | 184.53 | 15.11 | 97.53 | 94.79 | 65.8 | 59.3 |
| 16.Oca.19 | 20,000 | 196.68 | 15.34 | 108.56 | 94.56 | 86.45 | 70.52 |
| 18.Oca.19 | 25,000 | 154.55 | 8.93 | 110.79 | 77.16 | 133.49 | 75.71 |
| 20.Oca.19 | 30,000 | 173.24 | 10.07 | 97.28 | 60.67 | 73.95 | 73.5 |
| 23.Oca.19 | 40,000 | 210.42 | 7.55 | 93.74 | 67.29 | 75.33 | 82.43 |
| 30.Oca.19 | 50,000 | | 12.13 | 110.46 | 79.29 | 94.33 | 87.29 |
| 10.Şub.19 | 70,000 | | 11.44 | 113.97 | 66.26 | 115.63 | 117.92 |
| 22.Şub.19 | 100,000 | | 21.29 | | 85.89 | 99.82 | 73.5 |



Şekil 3.26. 5 cm asfalt kap bulunan bütün gerinim ölçerlerin çekme gerinim değerleri



Şekil 3.27. 8 cm asfalt kap. bulunan bütün gerinim ölçerlerin çekme gerinim değerleri

Grafikler incelendiğinde 5 cm asfalt kaplamada derzlerde bulunan gerinim ölçerlerde değerlerin birbirine genellikle yakın olduğu görülmektedir. Plak kenarında bulunan gerinim ölçerinin ise en düşük birim şekil değiştirme değerini verdiği anlaşılmaktadır. 8 cm asfaltta da benzer şekilde derzlerin genelde belirli bir aralıkta hareket ettiği, plak kenarında bulunan gerinim ölçerinin oluşturduğu değerlerin ise ayrı bir şekilde düşük bir bantta hareket ettiği anlaşılmaktadır. Ancak 8 cm asfaltta donatılı derzde bulunan gerinim ölçerinin ürettiği değerler, diğer gerinim ölçerlerde beklenenden yüksek çıkmıştır. Ancak 5 cm'de donatılı derzde bulunan gerinim ölçer en düşük sonuçları veren gerinim ölçerlerden biri olmuştur. Genel olarak plak kenarında bulunan gerinim ölçerinin değeri hariç diğer gerinim ölçerlerinde gerinim değerleri $9.15-210.42 \cdot 10^{-6}$ mertebesinde çıkmıştır. Literatürde benzer çalışmalarda alınan değer aralığı ise $10 \cdot 10^{-6}$ ile $300 \cdot 10^{-6}$ arasında değiştiği görülmektedir [34,72,100,101,105,139]. Bu durumda gerinim ölçerlerden alınan değerlerin literatüre uygun olduğu anlaşılmaktadır. Aşağıda gerinim ölçerler hakkında daha detaylı yorum yapılabilmesi için Tablo 3.20 hazırlanmıştır. Ayrıca tekerlek altında kalan gerinim ölçerlerin karşılaştırmasının yapılabilmesi için ortalama değerleri Tablo 3.21'de verilmiştir. Bu tabloda aynı derzde iki tekerlek altında da gerinim ölçer bulunuyorsa bu iki gerinim ölçerinin ortalaması alınmıştır. Tabloların altında elde edilen veriler hakkında irdelemeler ve tartışmalar madde madde verilmiştir.

Tablo 3.20. Gerinim ölçerlerin ürettiği değerlerin ilk son ve ortalama değerleri

| Kuzey güzergâh 8 cm asfalt kalınlığı Çekme Gerinimleri $\cdot 10^{-6}$ | | | | | | |
|--|-----------------|----------------|------------------|--------------|------------------|-----------------|
| Değerler | 1-Donatı | 2-Kenar | 2-Teker-2 | 2-Ara | 3-Güç.-1 | 3-Güç.-2 |
| İlk Yükleme Değeri | 159.82 | 29.3 | 50.01 | 35.49 | 9.15 | 27.01 |
| Son Yükleme Değeri | 210.42 | 21.29 | 113.97 | 85.89 | 99.82 | 73.5 |
| Ort. Gerinim Değ. | 177.97 | 15.28 | 94.88 | 78.59 | 70.62 | 63.93 |
| Güney güzergâh 5 cm asfalt kalınlığı Çekme Gerinimleri $\cdot 10^{-6}$ | | | | | | |
| Değerler | 1-Donatı | 2-Kenar | 2-Teker-1 | 2-Ara | 2-Teker-2 | 3-Güç.-2 |
| İlk Yükleme Değeri | 90.28 | 23.81 | 54.06 | 49.45 | 46.05 | 57.36 |
| Son Yükleme Değeri | 51.97 | 14.19 | 95.94 | 84.257 | 77.58 | 85.98 |
| Ort. Gerinim Değ. | 64.992 | 11.66 | 80.95 | 62.5 | 82.28 | 68.85 |

Tablo 3.21. Tekerlek altında kalan farklı derz tiplerinde oluşan çekme gerinimleri

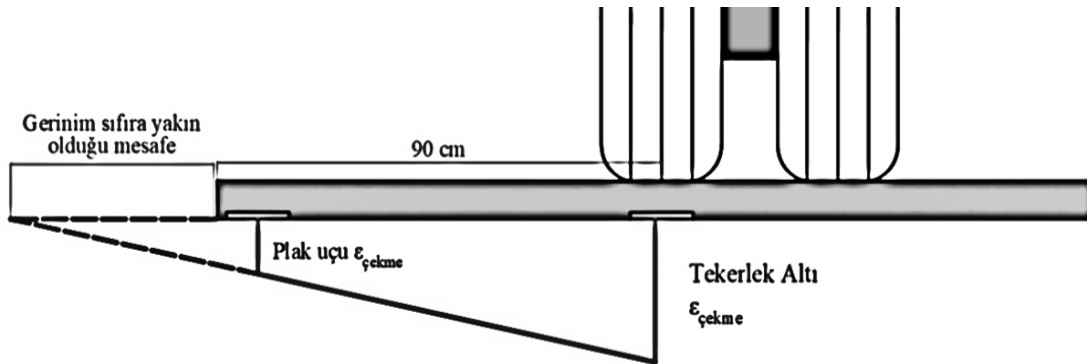
| | 1. Derz Donatılı $\epsilon \cdot 10^{-6}$ | 2. Derz Donatısız $\epsilon \cdot 10^{-6}$ | 3. Derz Güçlendirme $\epsilon \cdot 10^{-6}$ |
|-------------|--|---|---|
| 8 cm asfalt | 177.97 | 94.88 | 67.275 |
| 5 cm asfalt | 64.922 | 81.615 | 68.85 |
| % Fark | 174.13% | 16.25% | -2.29% |
| Ortalama | 121.446 | 88.2475 | 68.0625 |

- Şekil 3.27 ve 3.28’de görülen her iki grafikte de ilk 30,000 yükleme sırasında grafikte değerler daha karmaşık oluşmakta daha sonra nispeten daha düzenli hale gelmektedir. Bu durum her iki kalınlıkta da asfalt kaplamaların imalattan sonra sıkışmaya devam ettiğini ve bu süreç içerisinde oluşan gerinim değerlerinin belirli bir bağlantı içerisinde oluşmadığını göstermektedir. İlk 30,000 yüklemede asfalt betonu içerisinde bulunan agregalar hareket ederek yer değiştirmekte ve yükten dolayı asfalt kaplamada sıkışmalar oluşmaktadır. 30,000 yüklemeden sonra bu sıkışmalar artık tamamlanmış olduğundan daha stabil olarak asfalt kaplamaya gelen yükü karşılamaktadır.
- Bütün gerinim ölçerlerde ortalama çekme gerinimi $70.84 \cdot 10^{-6}$ çıkmıştır. Kenarlarda oluşan değerler düşük olduğundan ortalamaya katılmadığında hesaplanan yeni ortalama değeri ise $82.68 \cdot 10^{-6}$ çıkmaktadır. Bu değer 5 cm kalınlığında asfalt kaplamalar için ortalama $70.16 \cdot 10^{-6}$, 8 cm asfalt kaplamalar için ortalama $90.07 \cdot 10^{-6}$ olarak hesaplanmıştır. Değerler irdelendiğinde literatür verilerine göre düşük sayılabilecek değerler olduğu görülmektedir.
- Derzlerde oluşan çekme gerinimleri birbiri ile karşılaştırıldığında en düşük çekme geriniminin ortalama $68.06 \cdot 10^{-6}$ değer ile ara yüzey güçlendirmesi bulunan derz olduğu görülmektedir. Bu derz donatısız ve güçlendirmesi bulunmayan 2 nolu derze göre $20.18 \cdot 10^{-6}$ (%22.8) daha az çekme gerinimi değerine sahiptir. Ancak fark, güçlendirme için ekstra maliyet oluşturmayı gerektirecek boyutta değildir.
- Donatılı derzde 8 cm asfalt kaplamaya sahip olan kısımda değerler beklenenden çok yüksek çıkmıştır. Bu nedenle sadece 5 cm asfalt kaplamada bulunan derzler karşılaştırıldığında, donatılı derz, iki nolu derzden 16.69 (%20.4) $\cdot 10^{-6}$ daha az çekme gerinimi değerine sahiptir.

- 8 cm asfalt kalınlığına sahip donatılı derzde oluşan gerinim değerleri diğer derzlerden ortalama 100.97 (%131) oranında daha fazla çıkmaktadır. Yaklaşık 50,000 yüklemde donatılı derzde bulunan gerinim ölçer değer üretmemiştir. Bu durumdan, donatılı derzde bulunan gerinim ölçerin bozuk veya imalat sırasında bir aksaklığa maruz kaldığını ve bu nedenle sonuçların hatalı verdiği sonucuna varılmıştır.
- 5 cm asfalt kaplama altında bulunan gerinim ölçerlerin değerlerinin -donatılı plakta bulunan gerinim ölçer hariç- ilk yükleme ile son yükleme arasında artış gösterdiği görülmektedir. 8 cm asfalt plakta da aynı şekilde ilk yükleme ile son yükleme arasında gerinim değerlerinde artış görülmektedir. Bu artışın en temel nedeni zamanla asfaltın sıkışması ve bu sıkışma nedeniyle gerinim ölçerin daha fazla yüke maruz kalıyor olmasıdır. Bu nedenle kalın asfalt kaplama olan 8 cm kaplamalı derzlerde, daha fazla sıkışma yaşanacağından gerinim değerleri son yüklemelerde daha çok artmıştır.
- 5 cm asfalt kaplamalarda oluşan çekme gerinim değerleri 8 cm asfalt kaplamada oluşan çekme gerinim değerlerinden bir miktar fazla çıkmıştır. Buna karşılık donatılı derzlerde 8 cm asfalt kaplamanın alt yüzeyinde oluşan çekme gerinimleri, 5 cm'dekine göre oldukça yüksek görülmektedir. Bu derzde bir anormallik olabileceği düşünülmüştür. Donatılı derz dışında kalan 2 ve 3 nolu yarım derzlerde bulunan gerinim ölçer değerlerine bakılarak, 5 cm asfalt kaplama ile 8 cm asfalt kaplama alt yüzeyinde oluşan çekme gerilmesi farkı ortalama $1.75 \cdot 10^{-6}$ (%2.5) daha fazla çıkmaktadır.
- Oluşan çekme gerinim değerlerine bakıldığında 5 cm kalınlığında asfalt yapılmasının çekme gerinimleri açısından yeterli olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca deneyler sırasında gözlemsel olarak takip edilen yorulma çatlaklarına gerek 5 cm asfalt kaplamalarda gerekse 8 cm asfalt kaplamalarda rastlanılmamış olması bu sonucu desteklemektedir. Zira Makowski vd., beton üstü ince asfalt kaplamalarda Wisconsin Eyaleti iklim şartlarına göre yorulma çatlaklarının 1-2 yılda oluştuğunu ve ara yüzey güçlendirme malzemesinin çatlak oluşumunu % 42 geciktirdiğini belirtmişlerdir [75]. Oysa bu çalışmada hiçbir derzde yorulma çatlağına rastlanmamıştır. Her güzergâh 100,000 defa 64kN yük ile yüklenmiştir. Toplamda arazi şartlarında bu yükleme 1,186,000 ESAL'e tekabül etmektedir. Doğu Karadeniz Bölgesi mahalle/köy yolları 20 yıllık ömründe 3 Milyon ESAL altında yüke göre tasarlandığından bu yükleme

yaklaşık 8 yıllık yüke tekabül etmektedir. Dolayısıyla deneylerde 8 yıllık yüklemeye maruz tutulmuş hiçbir yarım derzli plakta çatlak rastlanmaması, 5 cm kaplamanın da yeterli olduğunu göstermektedir.

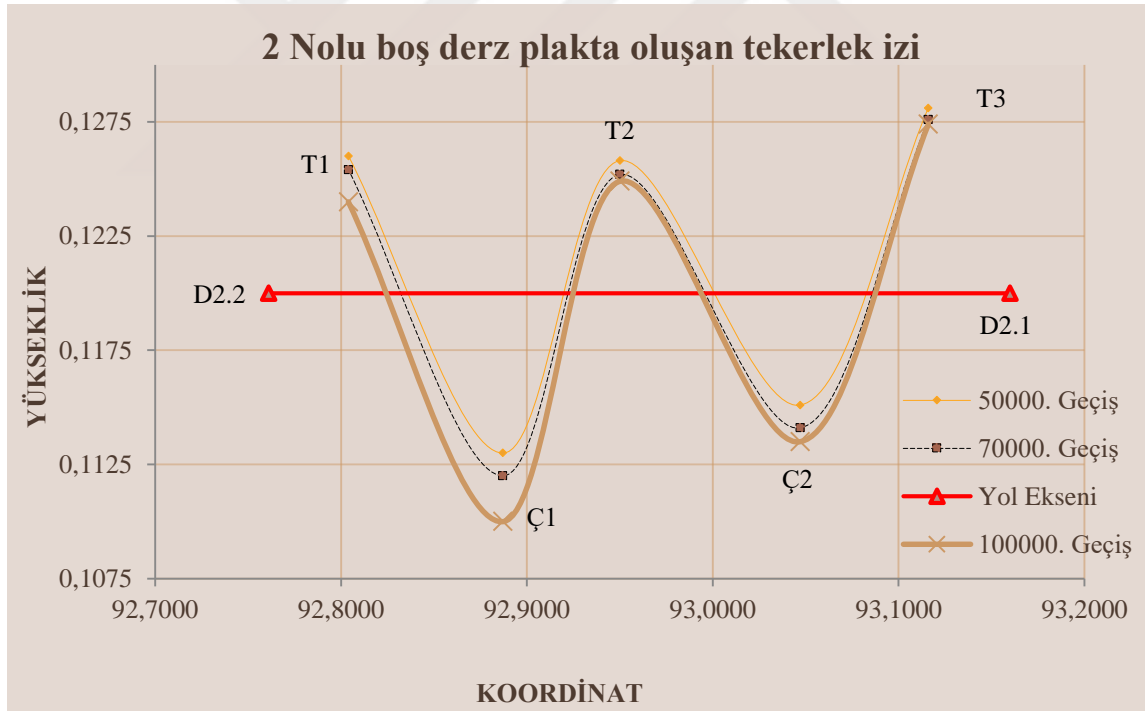
- Grafiklere bakıldığında her iki kaplama kalınlığında da plak kenarında bulunan gerinim ölçerlerin çekme gerinimlerinin yükleme sayısı ile çok ilişkili olmadığı anlaşılmaktadır. Oluşan değerler $6-27 \cdot 10^{-6}$ aralığında çıkmakta ve genel bir artış veya azalış eğimi göstermemektedir.
- 2. Derzde plak dış kenarında da gerinim ölçer yerleştirilmiş ve bu sayede yüklemeler sırasında asfaltın süreksizlik sınırı olan kısmında oluşan gerinimler ölçülmüştür. Bu ölçümlerde 5 cm asfalt kaplama için en yüksek çekme gerinimi değeri $23.81 \cdot 10^{-6}$, 8 cm asfalt için ise $29.3 \cdot 10^{-6}$ çıkmıştır. Ortalama değerler ise 5 cm asfalt kaplama için $11.66 \cdot 10^{-6}$, 8 cm asfalt kaplama için ise $15.28 \cdot 10^{-6}$ bulunmuştur. Plak kenarında bulunan gerinim ölçere bu değerleri yüklemeler vermektedir. Bu nedenle en yakın tekerlek altında bulunan (yaklaşık 90 cm) gerinim ölçer ile plak ucunda bulunan gerinim ölçer arasında Şekil 3.28’de görüldüğü gibi bir bağlantı kurularak ortalama gerinim yaklaşık olarak sıfır değerine yakınsayacağı mesafe bulunmuştur. Buna göre asfalt kaplamanın süreksizlik sınırının tekerleklerin geçeceği yerden en az 5 cm için 103 cm, 8 cm için 105 cm uzaklıkta olmasının yeterli olacağı hesaplanmıştır. Aynı şekilde basınç gerinimleri için de benzer sonuçlar çıkmıştır.



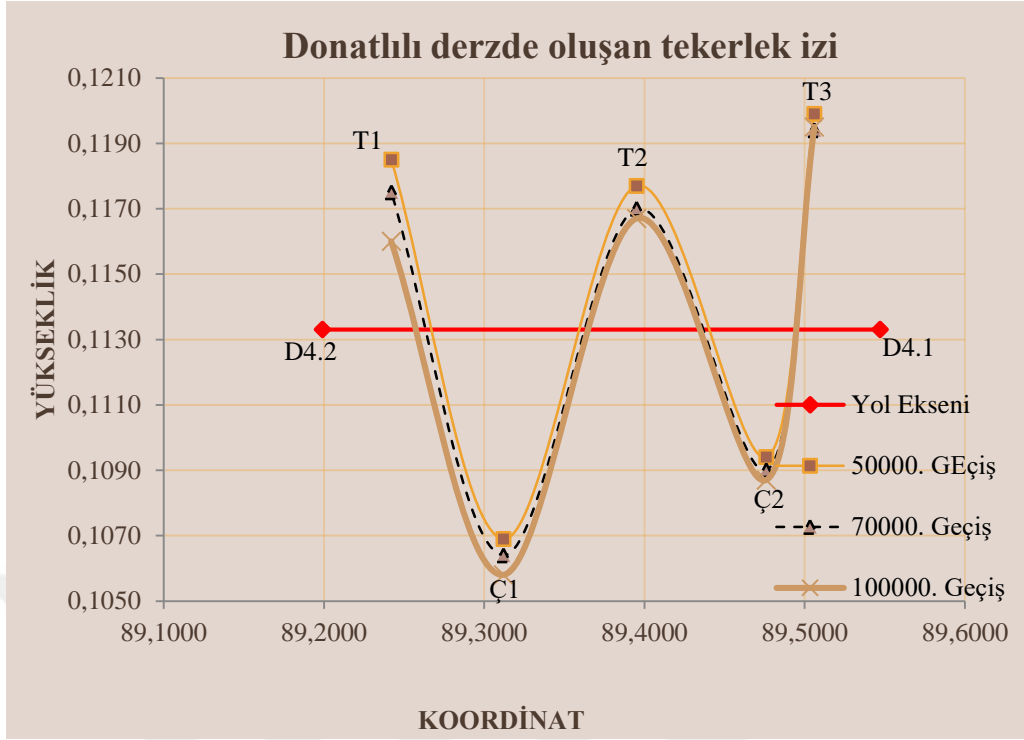
Şekil 3.28. Tekerlek altından plak ucuna doğru azalan gerilmeler

3.3.3. Asfalt Kaplamalarda Tekerlek İzi Oluşumu

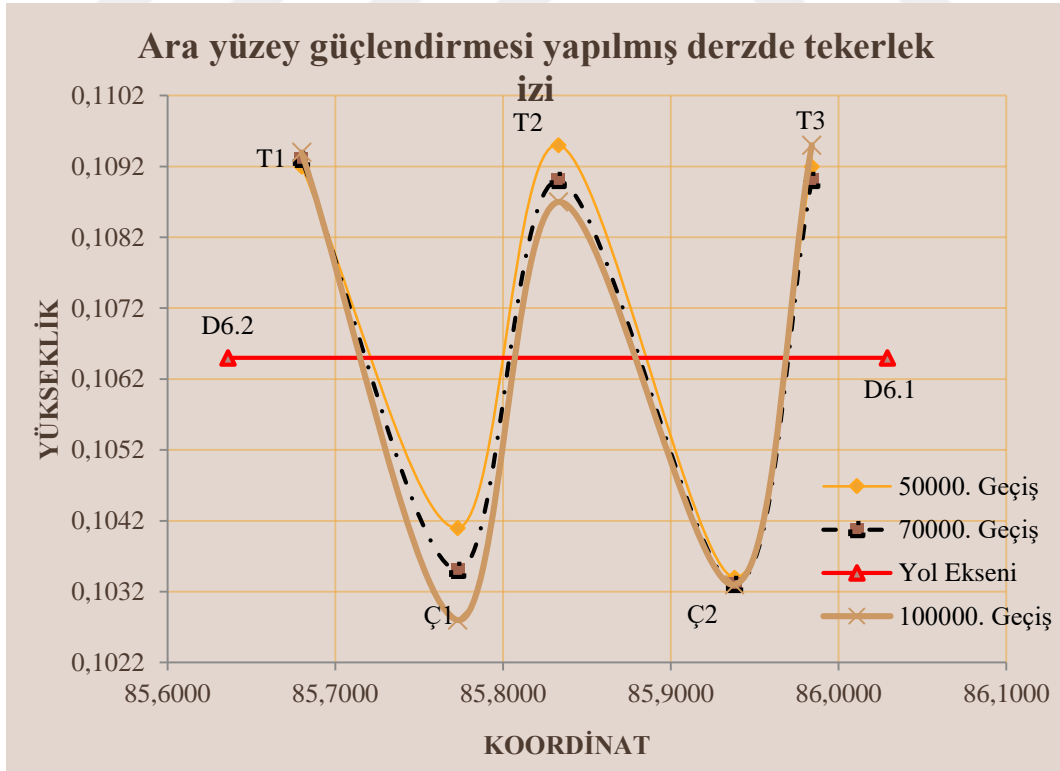
HYT tesisinde yapılan yüklemeler sırasında kuzey ve güney güzergâhlarda tekerlek izi oluşum süreci takip edilmiştir. Farklı derz koşullarında meydana gelen tekerlek izi oluşum miktarları ile geçiş sayıları arasındaki ilişki kurulmaya çalışılmıştır. HYT sisteminin tekerleklerinin asfalt kaplama üzerinde oluşturduğu çökme ve kabarmaların takibi için her bir derz bölgesinde dijital nivo aleti ile 5 farklı noktadan ölçüm alınmıştır. Bu noktalardan T1, T2, ve T3 numaralı olanlar kabarma ölçümlerini, Ç1 ve Ç2 numaralı olanlar ise çökme miktarını temsil etmektedir. Tekerlek izi değişiminin belirlenebilmesi için önce derz boyunca kaplama yüzeyinin kotlaması yapılmıştır. Daha sonra 50,000, 75,000 ve 100,000 yükleme sonrasında aynı noktalardan ölçüm alınarak toplamda 4 farklı tarihte veri elde edilmiş ve aşağıdaki Şekil 3.29, 3.30 ve 3.31’de görülen grafikler oluşturulmuştur.



Şekil 3.29. Donatısız ve ara yüzey güçlendirmesi bulunmayan plakta oluşan tekerlek izi



Şekil 3.30. Donatılı plakta oluşan tekerlek izi



Şekil 3.31. Asfalt ve beton plak arasında güçlendirme yapılan derzde oluşan tekerlek izi

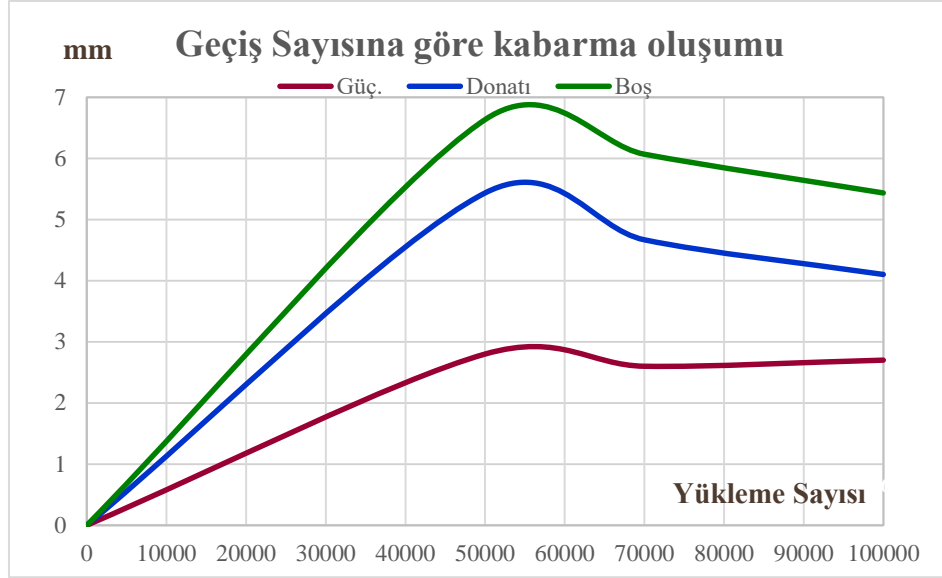
Grafiklerde bulunan T1, T2, T3, Ç1 ve Ç2 noktaların değerleri geçiş sayısına göre Tablo 3.22’de ayıca özet olarak verilmiştir. Tablo 3.22’de noktaların değerleri, yüklemeler başlamadan önce alınan platform kot ölçüleri olan Şekil 3.30-3.32’de görülen kırmızı çizgi üzerinden dik mesafeler olarak ölçülmüştür. Ayrıca yarım derz tiplerini birbiri ile daha detaylı karşılaştırılabilmesi için derz tiplerinin kabarma ve çökme noktalarının değerlerinin ortalamaları alınarak Tablo 3.23 oluşturulmuştur. Tablo 3.23’deki veriler Şekil 3.32 ve Şekil 3.33’te grafik olarak ayrıca verilmiştir. Grafik ve tablolara göre elde edilen bulgular, bulguların irdelenmeleri ve tartışmaları ise şöyledir;

Tablo 3.22. Geçiş sayılarına göre tekerlek izi takip noktaları

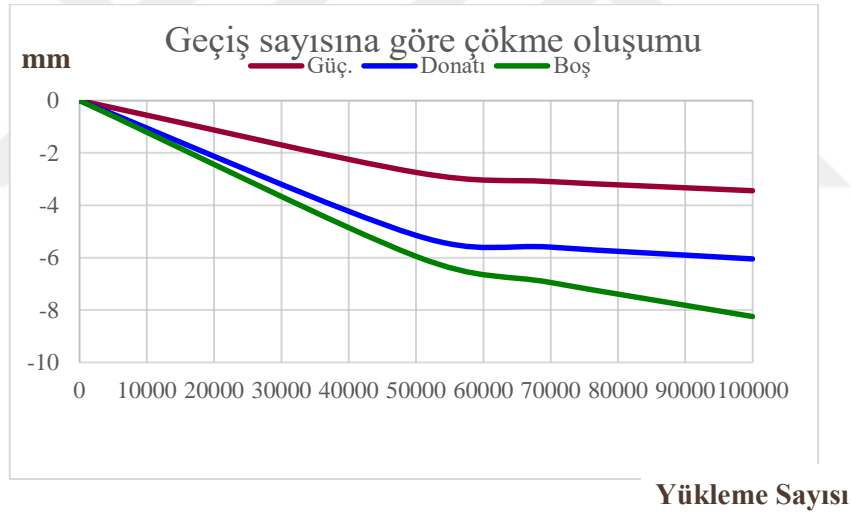
| | Kırmızı kot fark (mm) | T1 | Ç1 | T2 | Ç2 | T3 |
|-------------------|-----------------------|------|--------|------|-------|------|
| Ara yüzey Güç. | 50,000 Geçiş | 2.70 | -2.40 | 3.00 | -3.10 | 2.70 |
| | 70,000 Geçiş | 2.80 | -3.00 | 2.50 | -3.20 | 2.50 |
| | 100,000 Geçiş | 2.90 | -3.70 | 2.20 | -3.20 | 3.00 |
| Donatılı | 50,000 Geçiş | 5.30 | -6.40 | 4.40 | -3.90 | 6.60 |
| | 70,000 Geçiş | 4.20 | -6.90 | 3.70 | -4.30 | 6.10 |
| | 100,000 Geçiş | 2.70 | -7.50 | 3.40 | -4.60 | 6.20 |
| Boş Plak | 50,000 Geçiş | 6.00 | -7.00 | 5.80 | -4.90 | 8.10 |
| | 70,000 Geçiş | 5.40 | -8.00 | 5.20 | -5.90 | 7.60 |
| | 100,000 Geçiş | 4.00 | -10.00 | 4.90 | -6.50 | 7.40 |

Tablo 3.23. Farklı derz tiplerinde oluşan ortalama kabarma ve çökme değerleri

| Kabarma Oluşumları (mm) | | | | Çökme Oluşumları (mm) | | | |
|-------------------------|------------|----------------|----------------|-----------------------|-------------|-------------|--------------|
| Geçiş | Güç. | Donatı | Boş | Geçiş | Güç. | Donatı | Boş |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 50,000 | 2.80 | 5.43 | 6.63 | 50,000 | -2.75 | -5.15 | -5.95 |
| 70,000 | 2.60 | 4.67 | 6.07 | 70,000 | -3.1 | -5.6 | -6.95 |
| 100,000 | 2.70 | 4.10 | 5.43 | 100,000 | -3.45 | -6.05 | -8.25 |
| Ort. | 2.7 | 4.73333 | 6.04444 | Ort. | -3.1 | -5.6 | -7.05 |



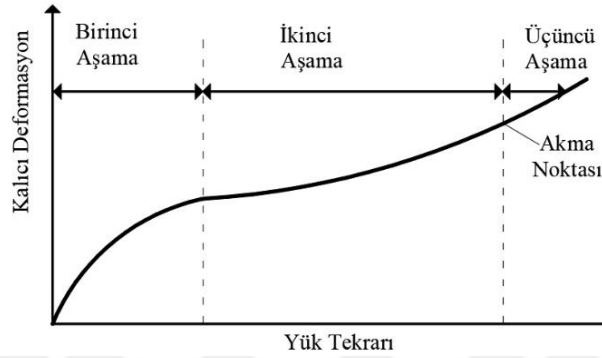
Şekil 3.32. Geçiş sayısına göre oluşan kabarma miktarları



Şekil 3.33. Geçiş sayısına göre oluşan çökme miktarları

- Geçiş sayıları arttıkça çökme oluşumları arttığı halde, kabarmalarda bazen artış bazen ise azalmalar olduğu tespit edilmiştir. Kabarmaların tekerleğin bastığı alanın dışında olması, asfaltın yük nedeniyle ötelenmesi ile alakalı yer değiştirmesi ile ilgili olduğunu göstermektedir. Bunun yanı sıra oluşan kabarma ve çökmeler 50,000-60,000 geçiş aralığında hızlı bir şekilde artmakta, daha sonra ise eğimi düşmekte ve x eksenine paralel hale gelmektedir. (Kabarmalarda geri dönüşler de görülmektedir)

- Tekerlek izi oluşumlarını inceleyen araştırmacılar yük sayısı ile kalıcı deformasyon arasında aşağıda Şekil 3.34'te görülen bağıntıyı kurmuşlardır. Şekil 3.32'de görülen ve bu çalışma sırasında elde edilen tekerlek izi ölçümlerinin sonuçları ile karşılaştırıldığında, bu çalışmada tekerlek izi oluşumlarının ikinci aşamanın başında olduğu görülmektedir. Bu aşamada hacimsel değişiklikten kaynaklanan sabit bir artış görülmektedir [186].



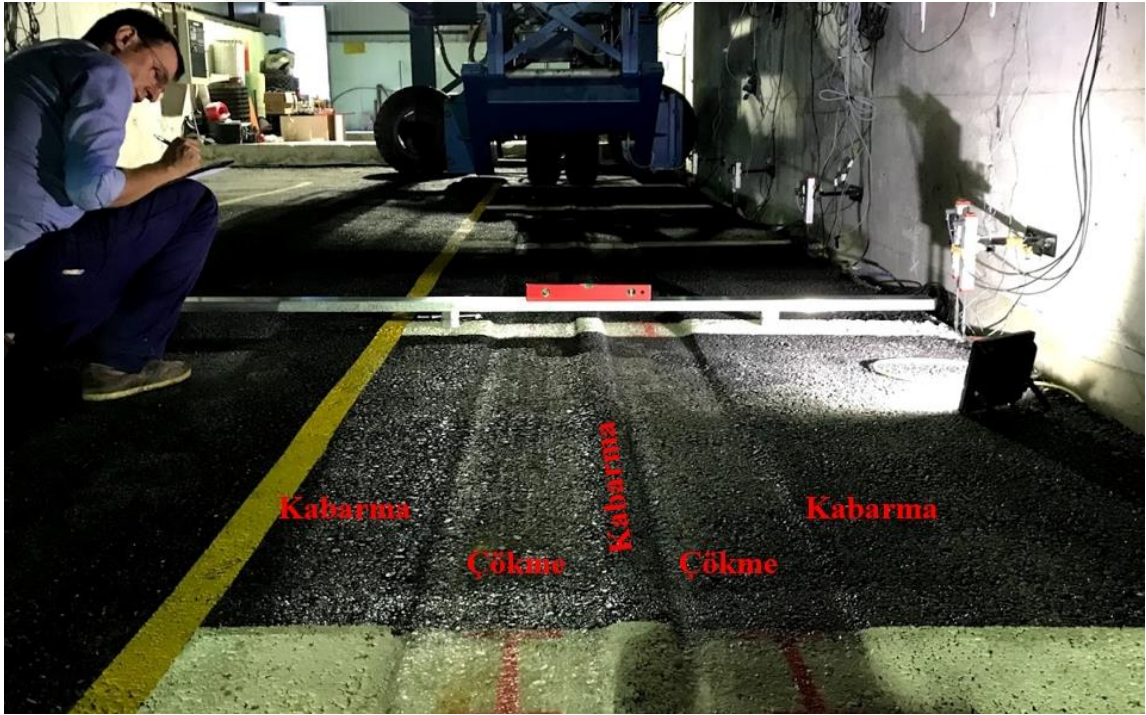
Şekil 3.34. Tekerlek izi oluşumlarının aşamaları [186]

- Gerek kabarmalarda gerekse çökmelerde oluşan değerler irdelendiğinde boş derzin en yüksek değerlere sahip olduğu görülmektedir. Boş derzi donatılı derz takip etmekte, en küçük değerlere ise ara yüzey güçlendirmesi yapılmış derzde rastlanılmıştır.
- Boş derz, ara yüzey güçlendirmesi bulunan derzden ortalama 2.23 kat yani 3.34 mm daha fazla kabarmıştır. Aynı şekilde boş derz donatılı derzden 1.27 kat (1.31 mm) daha fazla kabarmıştır.
- Çökme oluşumlarına bakıldığında ise boş derz, ara yüzey güçlendirmesi olan derzden 2.27 kat (3.95 mm) , donatılı derzden 1.25 kat (1.45 mm) daha fazla çökmüştür.
- Birbirine komşu çökme ve kabarma noktaları arasında oluşan mesafenin en yüksek değerleri, en derin çökme ve en yüksek kabarma değerleri Tablo 3.23'te verilmiştir. Tablo incelendiğinde hiçbir derzde 15 mm ve üzeri tekerlek izi oluşumuna rastlanılmamıştır. Ayrıca kabarma ve çökmelerin beraber hesaba katılmasında bile 15 mm'ye ulaşan değer bulunmamaktadır. Karayolları Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberine göre tekerlek izi oluşumlarının 15-30 mm arası oluşması durumunda, freze ile kesilip kaplamada bakım onarım yapılması gerektiği belirtilmektedir [112].

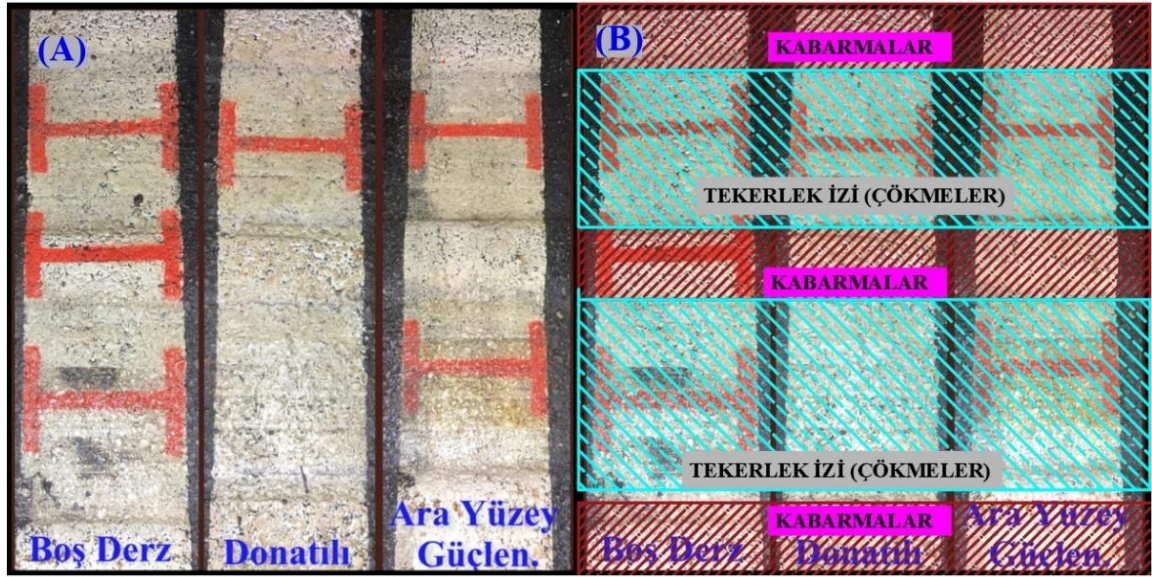
Tablo 3.24. Tekerlek izi ölçümlerinde alınan en yüksek değerler

| | Boş Derz | Donatılı Derz | Ara yüzey Güçlendirme |
|--|---------------------|--------------------------|----------------------------------|
| Komşu noktalar arasında en yük. fark (mm): | 14.9 | 11.7 | 6.6 |
| En derin çökme oluşumu (mm): | 10 | 7.5 | 3.7 |
| En yüksek kabarma oluşumu (mm): | 8.1 | 6.6 | 3 |

- Şekil 3.35 ve 3.36’da görüleceği gibi oluşan tekerlek izi şekilleri irdelendiğinde çökme ve kabarma davranışı beraber görülmektedir. Bölüm 1.8.3’te detaylı anlatıldığı gibi bu tekerlek izi oluşumuna B tipi tekerlek izi oluşumu denmektedir [109]. Bu tip tekerlek izi oluşumları zayıf asfalt kaplama tiplerinde daha sık görülmektedir. Özellikle bitüm karışımı bileşenlerinin doğru oranla yapılmaması veya iyi sıkıştırma yapılmaması zayıf asfalt kaplama nedenlerindedir [187].



Şekil 3.35. Asfalt kaplama üzerinden 100,000 geçiş sonrası oluşan deformasyon



Şekil 3.36. Asfalt kaplama üzerinden 100,000 geçiş (1,186,000 ESAL) sonra tekerlek izi

8 cm asfalt kaplamada oluşan tekerlek izi ölçümlerinin grafikte değerleri hazırlanmıştır. Ancak ölçülen değerler 100,000 geçişe rağmen Şekil 3.37’de görüldüğü gibi hissedilir tekerlek izi oluşturmamıştır. Yapılan ölçümlerde de 1 mm ve altı değerler çıktığından bulgular kısmına alınıp irdelenme gereği duyulmamıştır.



Şekil 3.38. 8 cm asfalt kaplamada 100,000 yüklemde oluşan tekerlek izi

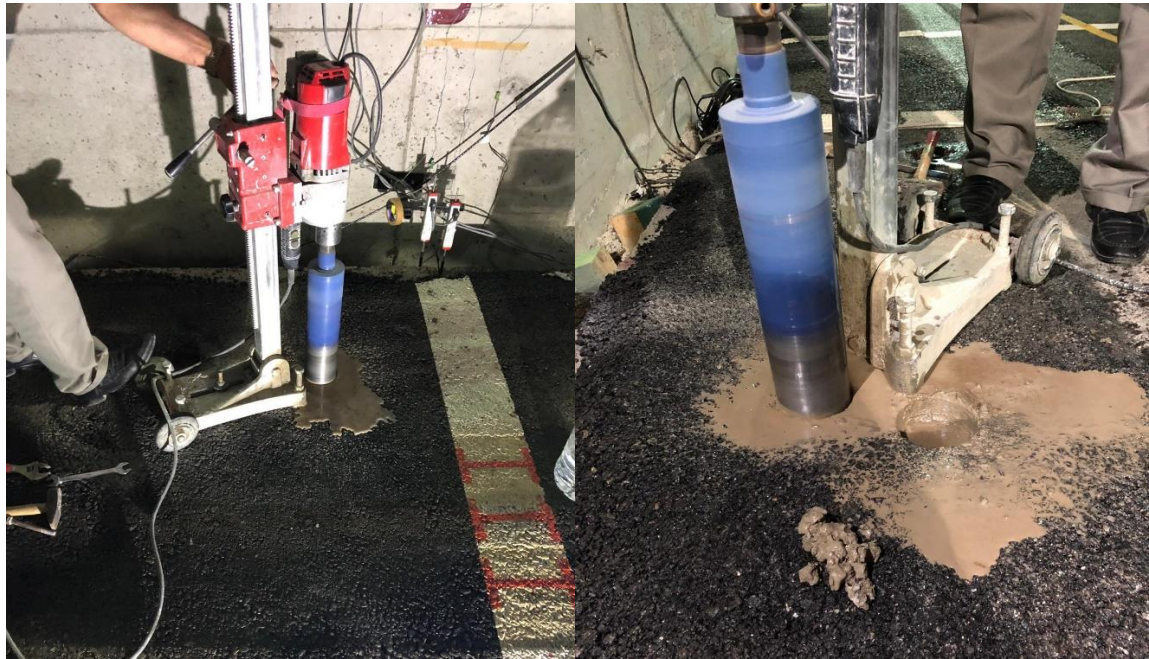
8 cm asfalt kaplamada 5 cm asfalt kaplamaya oranla daha fazla tekerlek izi oluşumu beklenildiği (kalınlık arttıkça tekerlek izi oluşum ihtimali de artar) halde daha az çıkmasının nedeni sıcaklık farklarıdır [66,154,155,186]. 5 cm asfalt kaplamanın ilk 20,000 yüklemesi 24 Mayıs ile 5 Ekim arasında yapılmıştır. Ortalama sıcaklık 29 ° C ortamda yapılan yüklemelerde 5 cm asfaltta tekerlek izi oluşmuştur. 8 cm asfalt kaplamada ise yüklemeler ortalama sıcaklık 8 ° C olduğu dönemde, 5 Ocak- 22 Şubat tarihleri arasında yapılmıştır. Asfalt Enstitüsünün verdiği formüle göre asfaltın elastisite modülü sıcaklık arttıkça azalmaktadır [148,149]. Bu nedenle yukarıda verilen sıcaklıklara göre asfaltın elastisite modülü şu şekilde hesaplanabilir;

$$E_1=15000-7900\log(T)$$

E_1 =Sıcaklığa Göre düzenlenen elastisite modülü

T = Asfaltın sıcaklığı

Formüle göre 29 ° C için $E_1=3445$ N/mm² 8 ° C için ise $E_1=7865$ N/mm² olduğu görülmüştür. Elastisite modüllerinde yaklaşık 2 kat fark olması tekerlek izi oluşumları için bir nedendir. Ayrıca farklı güzergahlarda, farklı kalınlıktaki asfalt kaplamalardan Şekil 3.38’de görüldüğü gibi numuneler alınarak boşluk oranı farkına bakılmıştır.



Şekil 3.38 Asfalt kaplamadan alınan numuneler

Yapılan deneylerde asfalt kaplamaların iki kalınlık tipinden de alınan numunelerde birim hacim ağırlığı yaklaşık 2.32 gr/cm^3 çıkmıştır. Ancak boşluk oranları irdelendiğinde 5 cm kalınlığındaki asfalt ortalama 1.62 boşluk oranına sahipken, 8 cm asfalt kalınlığına sahip plak ortalama 1,40 boşluk oranına sahiptir. Aradaki fark tekerlek izi oluşumuna az da olsa katkı sağladığı düşünülmektedir.

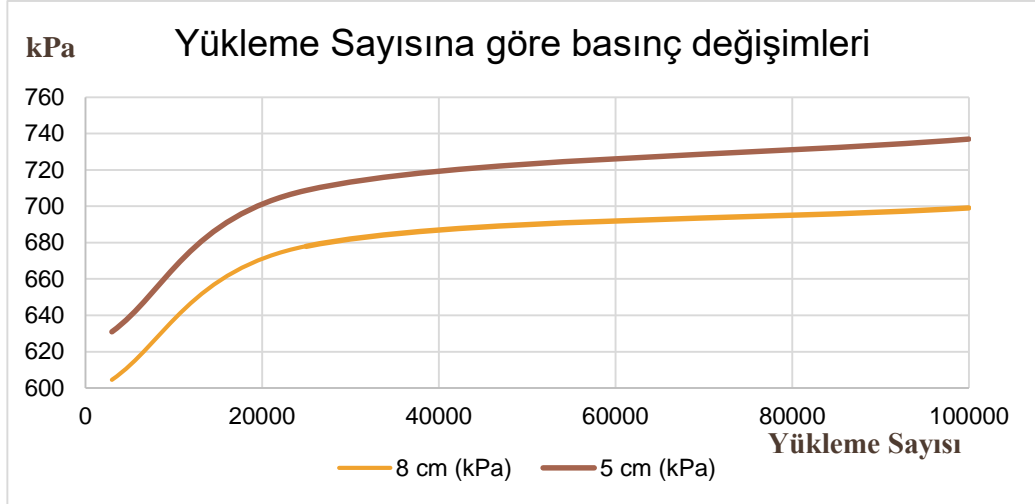
3.3.4. Asfalt Kaplamalarda Kalınlığa Göre Basınç Hücresi Verileri

Asfalt kaplama yapılması sırasında 1. ve 2. güzergâhlara ikişer tane basınç hücresi yerleştirilmiştir. Bunun yanı sıra 2 adet basınç hücresi de mobil olarak asfalt kaplamanın yüzeyinden ölçümler almıştır. Böylelikle yüzeyde alınan basınç değeri ile asfalt kaplamanın alt yüzeyinde alınan basınç değerlerinin karşılaştırması yapılmıştır. Ayrıca yüzeyde bulunan basınç hücreleri yük değerinin yaklaşık 780 kPa civarında kalması sağlanmıştır. Böylelikle deneyin başından sonuna kadar aynı değerlerde yük ile yükleme yapılmıştır.

Tablo 3.25.'de yapılan yükleme neticesinde donatısız ve ara yüzey güçlendirme yapılmamış beton üstü 5 cm ve 8 cm kalınlıkta iki asfalt plağın alt yüzeyine yerleştirilmiş olan basınç hücrelerinde yükleme sayısına göre okunan değerler görülmektedir. Şekil 3.39 bu tablonun grafik halidir.

Tablo 3.25. Asfalt kaplama alt yüzeyinde oluşan basınç değerleri

| 5 cm Asfalt kaplama alt yüzey | | 8 cm Asfalt kaplama alt yüzey | |
|-------------------------------|-------|-------------------------------|-------|
| Yükleme Sayısı | kPa | Yükleme Sayısı | kPa |
| 3,000 | 631 | 3,000 | 604.5 |
| 25,000 | 708.8 | 25,000 | 678 |
| 100,000 | 737 | 100,000 | 699 |

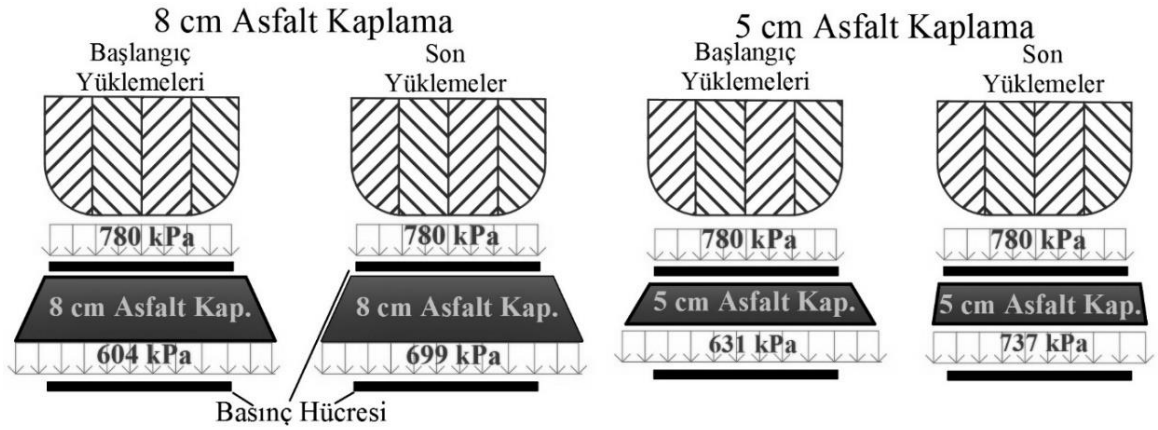


Şekil 3.39 5 ve 8 cm asfalt kaplamaların alt yüzeyinde oluşan basınç değerleri

- Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, 8 cm asfalt kaplamada ilk yüklemelerde asfalt alt yüzeyinde basınç değerinin beklenildiği gibi 5 cm asfalt kaplamaya oranla 26.5 kPa (%4.2) daha az oluştuğu görülmüştür.
- 100,000 yüklemeden sonra 8 cm asfalt kaplama alt yüzeyinde okunan basınç değeri 699 kPa olurken, 5 cm asfalt kaplamada 737 kPa olduğu görülmektedir. Deneyler bittiğinde 8 cm asfalt kaplama alt yüzeyinde 5 cm asfalt kaplamaya oranla 38 kPa (%5.15) oranında daha düşük basınç oluştuğu görülmektedir. Başlangıç yüklemelerinde bu oran daha düşük olduğu halde son yüklemelerde artmasının nedeni asfalt kaplamalarda oluşan tekerlek izi etkisidir. 5 cm asfalt kaplamada yukarıda bölüm 3.2.3'te 10 mm'e kadar tekerlek izlerinin oluştuğu halde 8 cm asfalt kaplamada dikkate alınacak oranda tekerlek izi oluşmamıştır. Kaplamanın kalınlığının azalması oluşan basıncın daha fazla alt yüzeye ulaşmasına neden olmuştur.
- Şekil 3.37'deki grafik incelendiğinde ilk 40,000 yüklemeden sonra eğri git gide doğrusal hal almaktadır. Bunun nedeni tasarımsal olarak kaplamalarda bırakılan boşluk oranı ve tekerlek izi oluşumlarıdır. Bu iki etken asfaltın git gide sıkışmasına, dolayısıyla kalınlığın da bir miktar azalmasına neden olmaktadır.
- Şekil 3.38'de görüldüğü gibi 8 cm asfalt kaplama alt yüzeyinde yükleme başlangıç ve sonu arasında oluşan basınç farkı 95 kPa (%15.89 artış) çıkmıştır. 5 cm asfalt kaplamanın alt yüzeyindeki basınç farkı ise 106 kPa (%16.8 artış)

olmuştur. 8 cm asfalt daha fazla sıkışabilecek kalınlığa sahip olmasına rağmen 5 cm asfalt kaplamada daha yüksek değer artışı yaşanmasının nedeni daha fazla tekerlek izi oluşumunun tespiti ile alakalıdır.

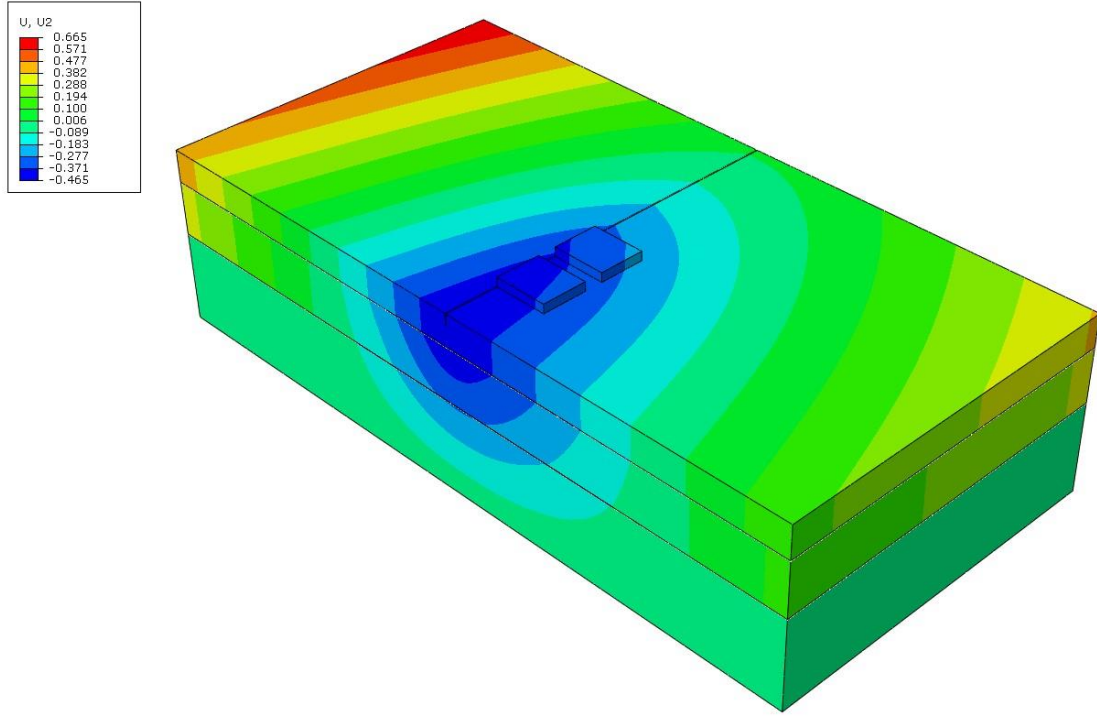
- Şekil 3.40'de gösterildiği üzere 100,000 yüklemeden sonra beton üstü asfalt kaplamanın altında oluşan basınç değerleri, uygulanan 780 kPa tekerlek basıncının %10 (8 cm) ve %5.5'i (5 cm) kadar düşüğü olduğu tespit edilmiştir



Şekil 3.40. Asfalt kap. başlangıç ve son yüklemelere göre oluşan basınç gerilmeleri

3.4. Sonlu Eleman Yöntemiyle Modelleme ve Analiz

Sonlu eleman metodu ile hazırlanan modellerde ilk önce beton kaplamalarda oluşan düşey deplasmanlar ile ilgili değerler alınmıştır, deneysel çalışmanın verileri SE sonuçlarını doğruladıktan sonra gerilmeler ve çatlak ilerlemeleri incelenmiştir. Sonlu elemanda beton kaplamada oluşan deplasman ölçümü dört farklı model için hazırlanmıştır. Bu modeller donatılı ve donatısız plaklar ile bu plakların derz ilerleme çatlağı oluştuktan sonraki hali olarak belirlenmiştir. Böylelikle ilk yüklemeler ve 25,000 yükleme sonrası temsil edilmiştir. Elde edilen deplasman değerleri renk dağılımına göre plak üzerinde işaretlenmiştir. Örnek olarak Şekil 3.41'de derz ilerleme çatlağı olmayan donatısız plak verilmiştir. Diğer plaklarda yaklaşık aynı şekle sahip olduklarından tez içerisinde ayrı ayrı verilmemiş, tablo halinde özet olarak verilmiştir. Tablo 3.26'te ise SE analizleri ile elde edilmiş düşey deplasman değerleri verilmiştir. Bu değerlere göre LTE ve δ_{ave} değerleri hesaplanmıştır.



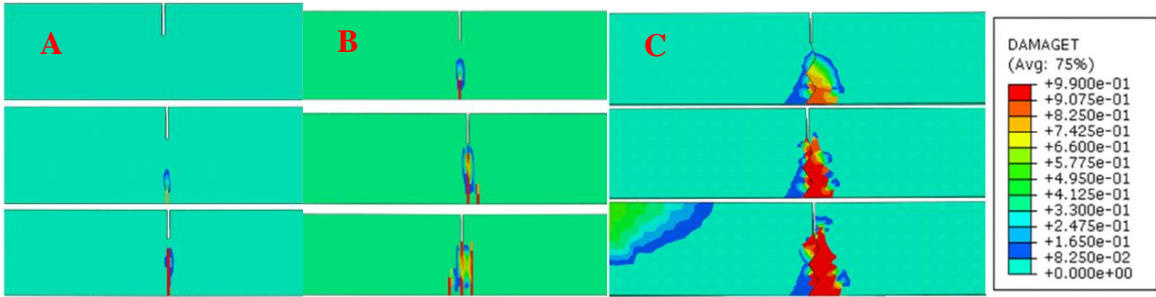
Şekil 3.41. Donatısız ve derz ilerleme çatlaklı oluşmamış plakta deplasman dağılımları

Tablo 3.26. SE analizleri ile elde edilen düşey deplasmanlar

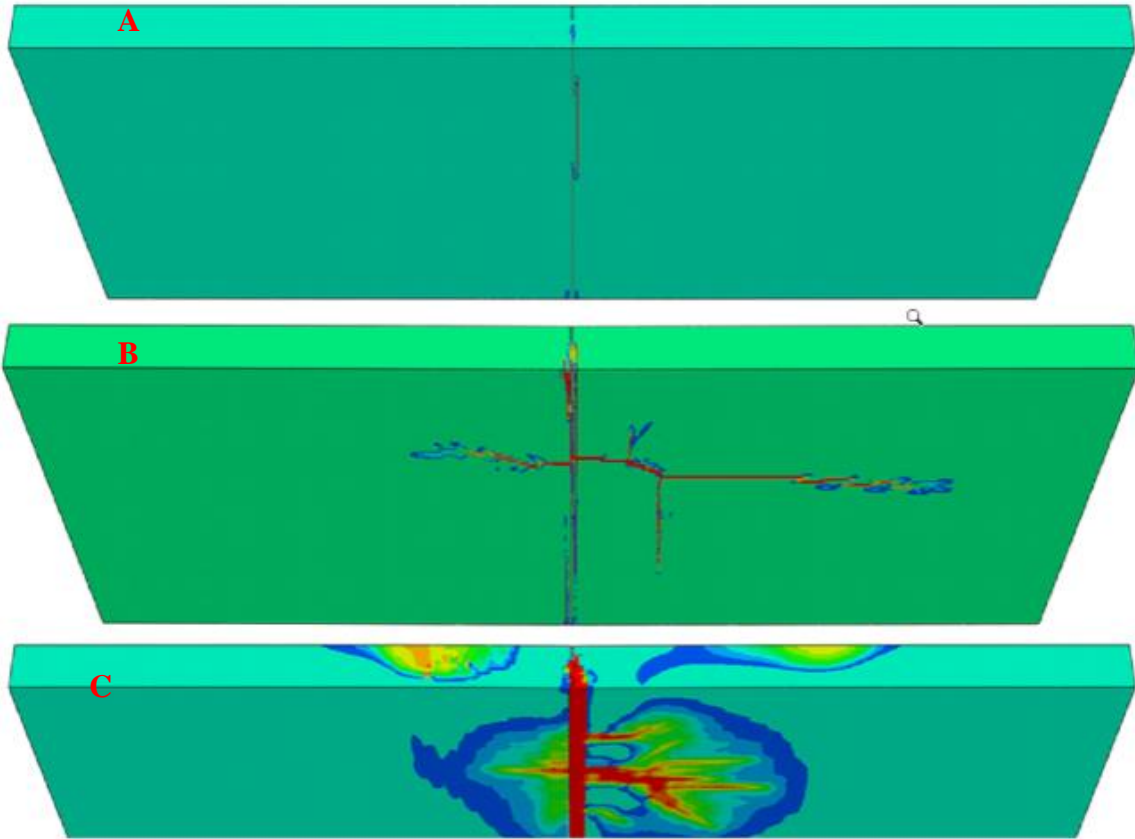
| Plaklar | Düşey deplasmanlar (mm) | | LTE (%) (δ_U/δ_L*100) | δ_{ave} (mm) ($(\delta_L+\delta_U)/2$) |
|---------------------|-------------------------|--------------------------|--|--|
| | Yüklü taraf, δ_L | Yüksüz taraf, δ_U | | |
| Donatılı Çatlaksız | 0.063 | 0.055 | 87.30 | 0.59 |
| Donatılı Çatlaklı | 0.222 | 0,187 | 84.20 | 0.204 |
| Donatısız Çatlaksız | 0.596 | 0.432 | 72.48 | 0.514 |
| Donatısız Çatlaklı | 0.753 | 0.481 | 63.87 | 0.617 |

Elde edilen veriler, deneylerde elde edilen veriler ile karşılaştırıldığında; SE analizleri ile elde edilen LTE değerleri, deneysel çalışmalarda elde edilen LTE değerleri aralığında çıktığı görülmüştür. Ancak donatısız çatlaklı derz bu aralığın dışında ve deneysel çalışmanın sonucundan daha az olduğu tespit edilmiştir. Genel olarak düşey deplasmanların SE modelleri verileri deneysel çalışmalara göre 0.2-0.6 mm aralığında fazla çıktığı görülmüştür. Bu farklar zeminin deneysel çalışmalarda tam olarak ideal davranış sergilememesi, deneysel çalışmalarda LVDT'lerin plağın duvar tarafında ölçüm aldığı halde SE modelleri direk tekerlek altından ölçüm alması ve SE modellerinde tekerlek yükünün sabit bir alana uygulanmasından kaynaklandığı kanaatine varılmıştır.

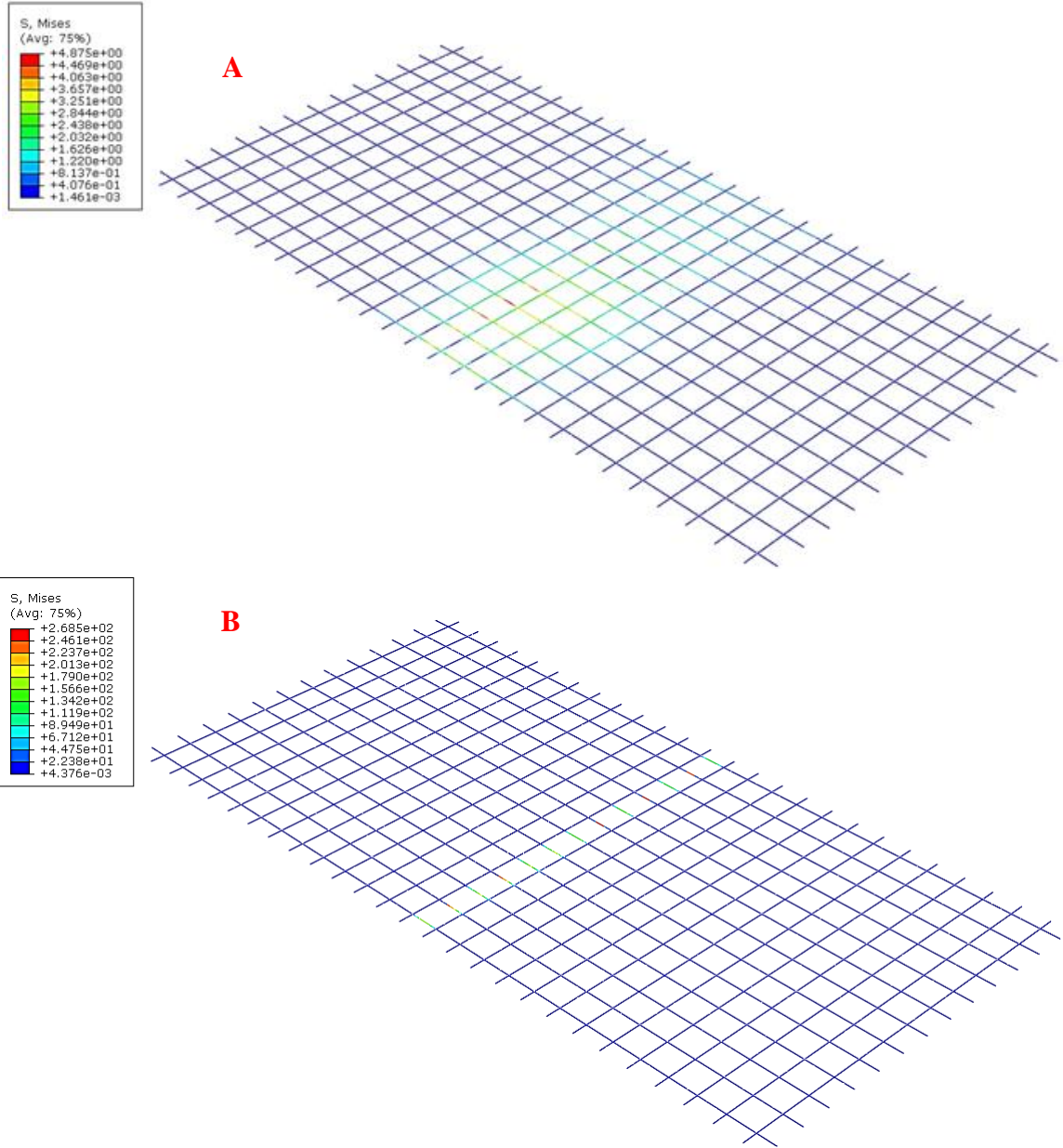
Buna rağmen SE sonuçları ile deneysel çalışma sonuçları arasında bir çelişki bulunmamaktadır. Bu nedenle SE analizlerinden çeşitli veriler alınmasında bir beis görülmemiştir. SE modellerinde donatılı plaklarda donatısız plaklara göre ortalama 4,7 kat daha az düşey deplasman oluşmaktadır. Bu bağlamda, Şekil 3.42’de yarım derz ilerleme çatlakları oluşumları Şekil 3.43’te de plak altında oluşan çatlaklar görülmektedir. Son olarak Şekil 3.44’de donatılı plakta derz ilerleme çatlaklarının oluşmasından önce ve sonra donatıda oluşan gerilmeler görülmektedir.



Şekil 3.42. Çatlak ilerlemeleri a. Hasır donatılı b. Çatlaksız c. Çatlaklı



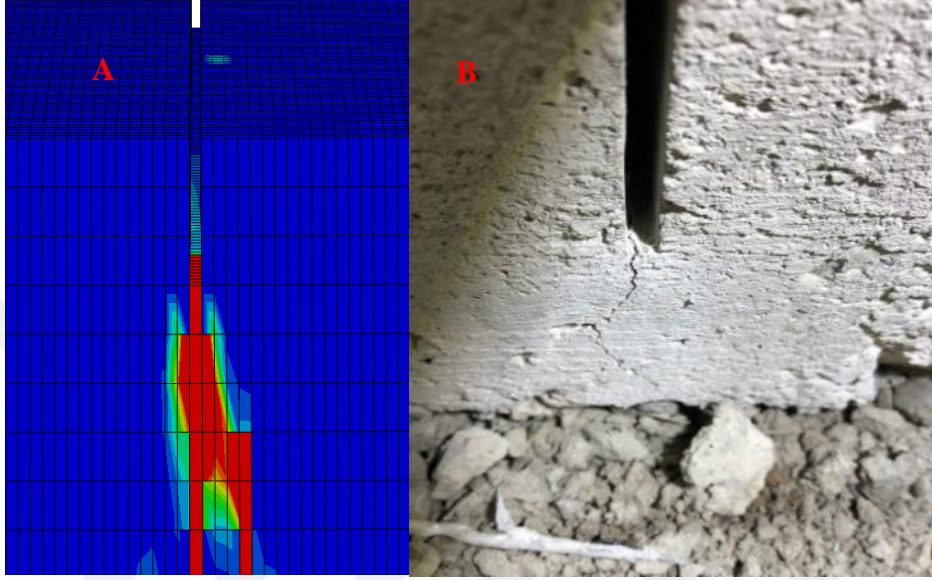
Şekil 3.43. Plak altında oluşan çatlak ilerlemeleri. a. Hasır donatılı b. Çatlaksız c. Çatlaklı



Şekil 3.44. Donatılı plakta donatıda derz ilerleme çatlak oluşmadan (A) önce ve (B)sonra oluşan gerilmeler

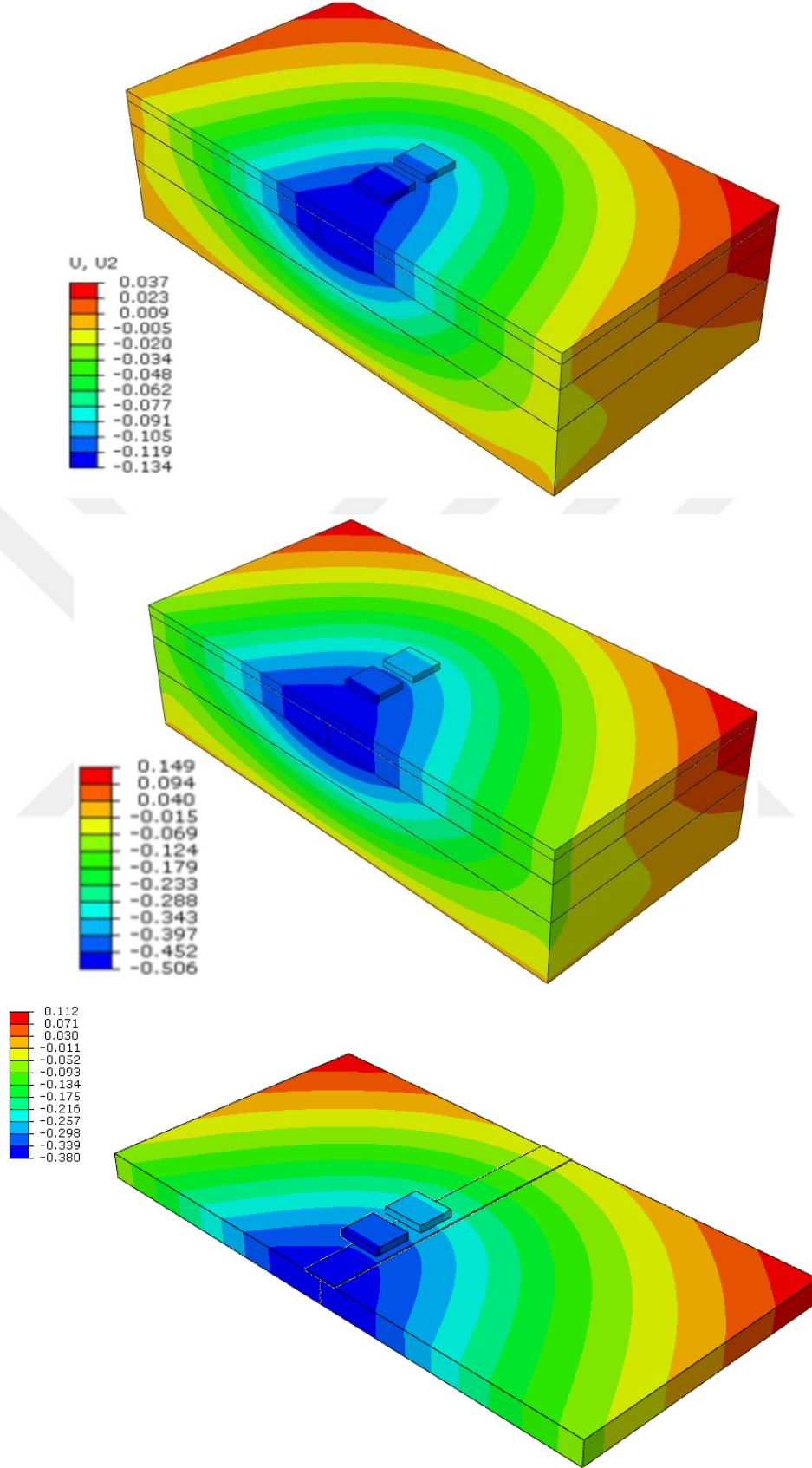
SE analizleri incelendiğinde deneyler sırasında tespit edilen durumların analizlerde de birebir örtüştüğü görülmektedir. Örneğin yük derzin üzerindeyken plağın doğu ve batı kenarlarının artı düşey deplasman değeri üretmesi deneyler sırasında da ölçülmüştür. Yarım derzlerde gerilmelerin toplandığı, bu nedenle çatlak gelişiminin burada başladığı gibi hususlar deneyler sırasında da tespit edilmiştir. Şekil 3.45'te yarım derzlerde çatlak gelişimi detayı görülmektedir. Hasır donatıda derz ilerleme çatlakı öncesinde 4.87 MPa

gerilme oluşurken, derz ilerleme çatlakları sonrasında bu değer 268 MPa'ya kadar çıkmıştır. Gerilmeler bu kadar yüksek olduğunda hasır donatının tam derz içinde kalan kısmı diğer kısımlarına göre gerilmelerin neredeyse tamamını almıştır. Bu durum donatının sadece derze yakın yerde olmasının yeterli olacağının bir ispatıdır.

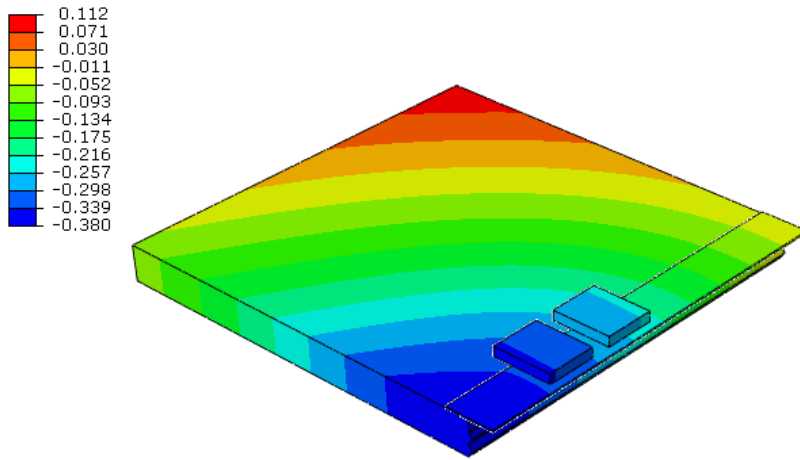
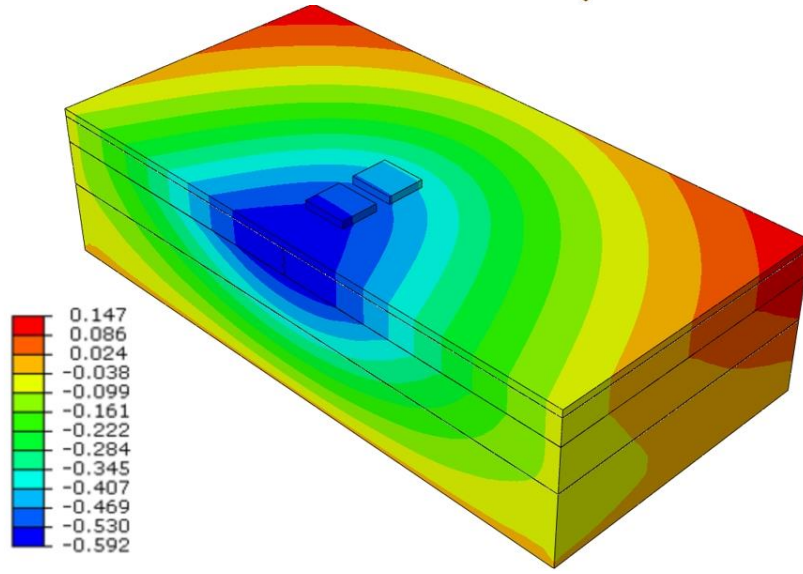
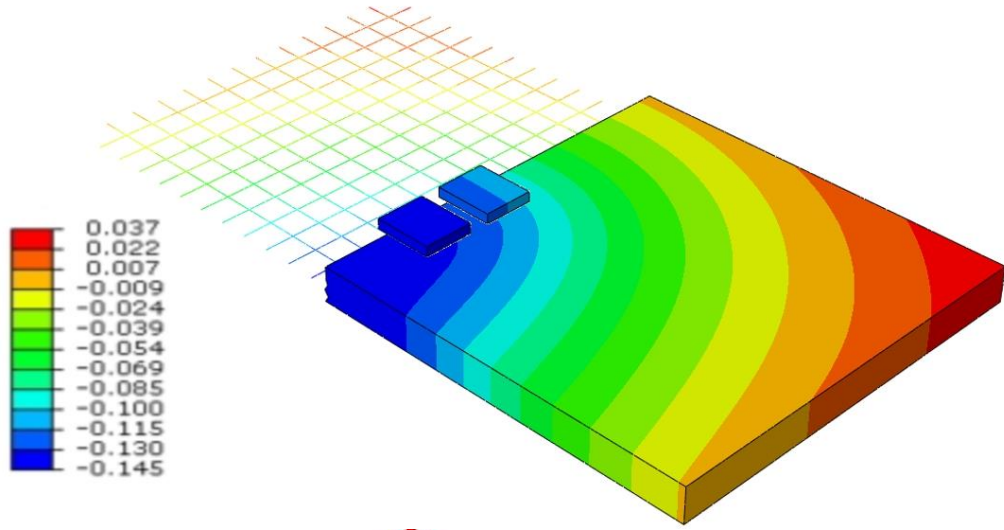


Şekil 3.45. Çatlak gelişimi (A) beklenen (B) gerçekleşen

Asfalt kaplamada oluşan düşey yönde eksi deplasman değerleri ve gerinim değerleri de SE yöntemleri ile incelenmiştir. Farklı iki asfalt kaplama kalınlığına göre, donatılı, donatısız ve ara yüzey güçlendirmeli olmak üzere toplam 6 model oluşturulmuştur. Modellerin hepsinde derz ilerleme çatlakları bulunmaktadır. Modellerden elde edilen sonuçlar deneysel veriler tarafından doğrulandıktan sonra gerilim değerlerinin görüldüğü şekiller de verilmiştir. Gerilme değerleri Von-Mises gerilme değerleridir. Şekil 3.46 ve Şekil 3.47'de asfalt kaplama yapıldıktan sonra oluşan düşey deplasmanların renk dağılımları ve değerlerinin alındığı modeller görülmektedir.



Şekil 3.46. 8 cm asfalt kaplamada oluşan düşey yönde deplasmanlar



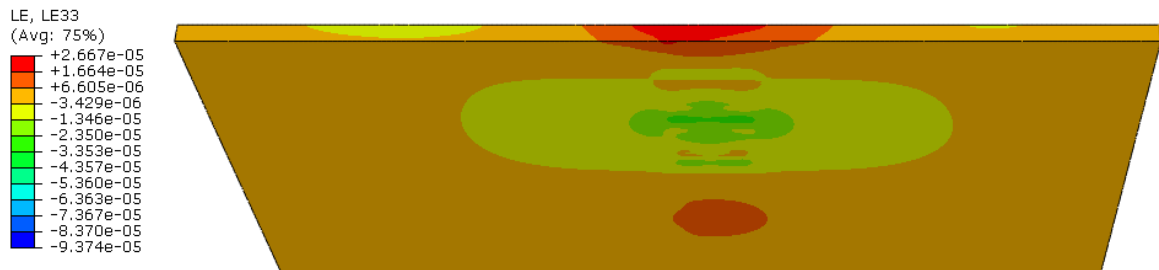
Şekil 3.47. 5 cm asfalt kaplamada oluşan düşey deplasmanlar

Beton plak üzerine asfalt kaplama yapıldıktan sonra trafik yükünden dolayı yarım derzlerde oluşan düşey deplasmanların değerleri, Tablo 3.26’da verilmiştir. Değerler incelendiğinde birbiri içinde tutarlı olduğu ve deneysel çalışmalarda oluşan değerlerden yukarıda detaylı yazılan nedenlerden dolayı bir miktar fazla çıktığı ancak bu fazlalığın 0.1 mm civarında olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle SE modellerinin başarılı sonuçlar verdiği kabul edilmiştir. SE sonuçları irdelendiğinde, deneysel çalışma sonuçları gibi en düşük düşey deplasman değerlerinin donatılı plaklarda olduğu, daha sonra ara yüzey güçlendirmelerinin geldiği, en yüksek düşey deplasman değerlerinin ise donatısız plaklarda olduğu tespit edilmiştir. Asfalt kaplama kalınlıklarının birbiri ile karşılaştırılmasında 8 cm ile 5 cm arasında belirgin bir düşey deplasman farkı oluşmadığı, ortalama 0,09 mm civarında bir fark olduğu görülmüştür.

Tablo.3.27. Asfalt kaplama yapıldıktan sonra derz kısımlarında oluşan düşey deplasman

| Plak tipi | 8 cm asfalt kaplama (mm) | 5 cm asfalt kaplama (mm) |
|-------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Donatılı | -0.134 | -0.145 |
| Donatısız | -0.506 | -0.592 |
| Ara yüzey Güçlendirmeli | -0.380 | -0.380 |

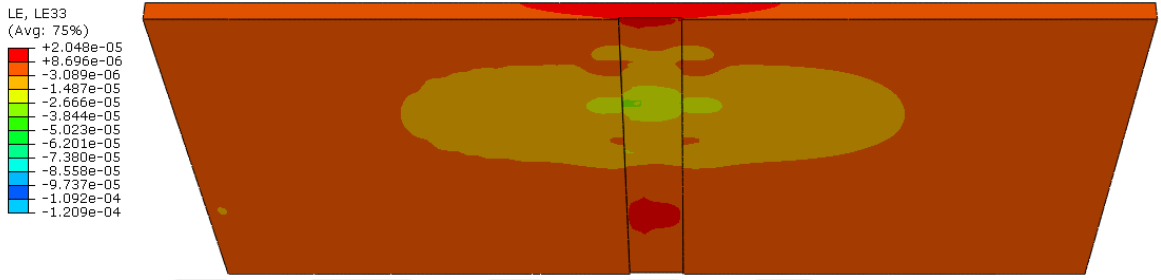
Asfalt kaplamaların alt yüzeylerinde oluşan çekme gerinme değerleri aşağıda Şekil 3.47-3.52 arasında verilmiştir. Şekillerde oluşan eksi değerler çekme gerinimleridir. Gerinimlerin toplu halde değerleri Tablo 3.28’de verilmiştir.



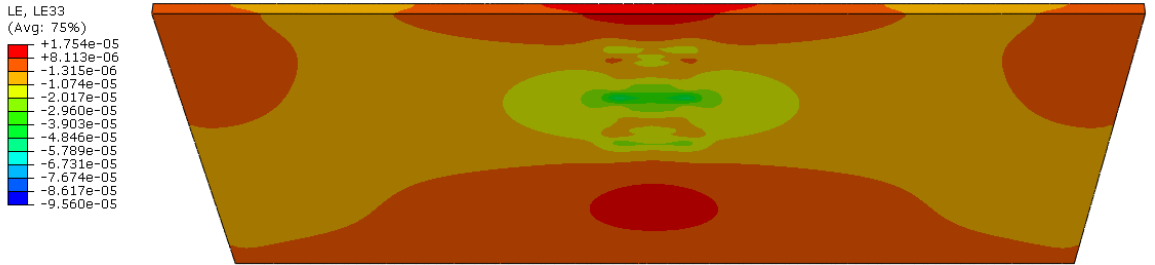
Şekil 3.48. Donatılı plakta 8 cm asfalt kaplama alt bölgesinde oluşan çekme gerinimleri



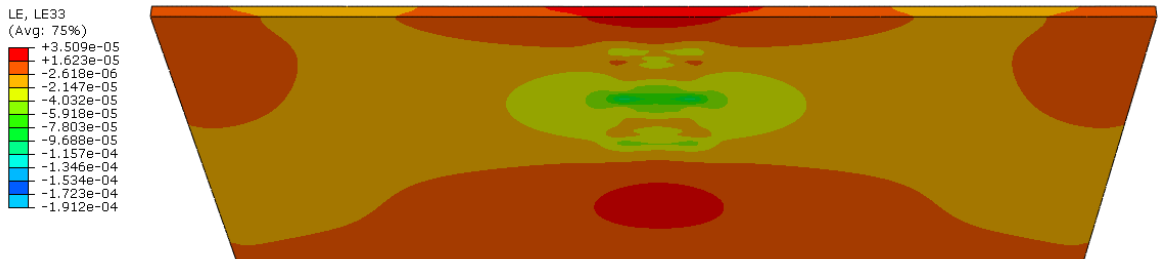
Şekil 3.49. Donatısız plakta 8 cm asfalt kaplama alt bölgesinde oluşan çekme gerinimleri



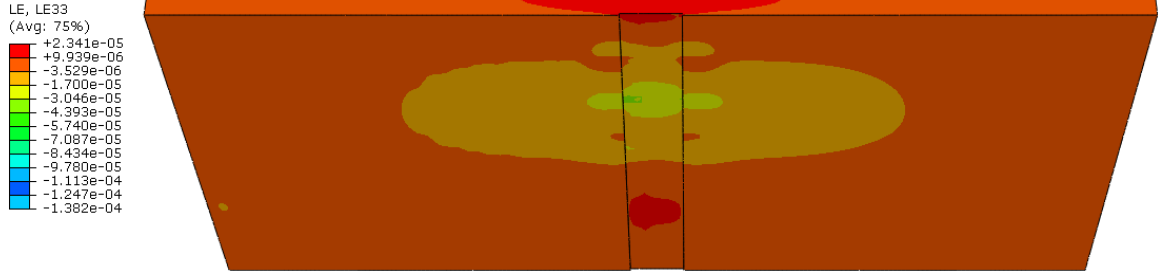
Şekil 3.50. Ara yüzey Güçlendirmeli plakta 8 cm asfalt kaplama alt bölgesinde oluşan çekme gerinimleri



Şekil 3.51. Donatılı plakta 5 cm asfalt kaplama alt bölgesinde oluşan çekme gerinimleri



Şekil 3.52. Donatısız plakta 5 cm asfalt kaplama alt bölgesinde oluşan çekme gerinimleri

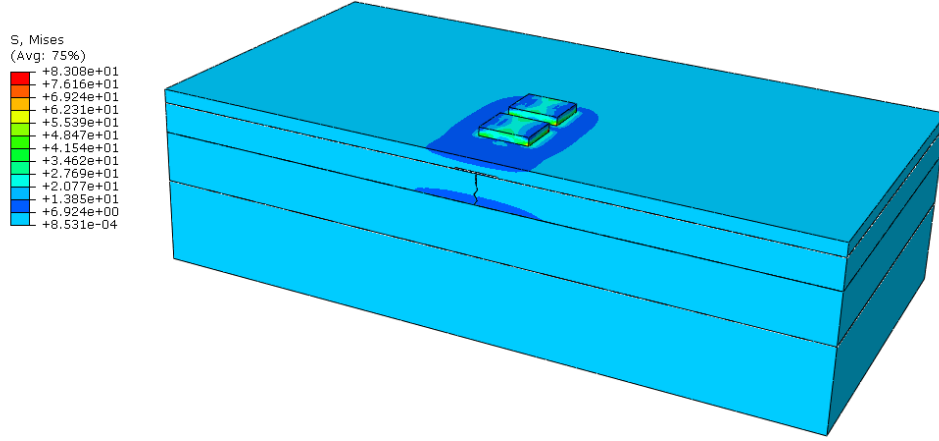


Şekil 3.53. Ara yüzey güçlendirmeli plakta 5 cm asfalt kaplama alt bölgesinde oluşan çekme gerinimleri

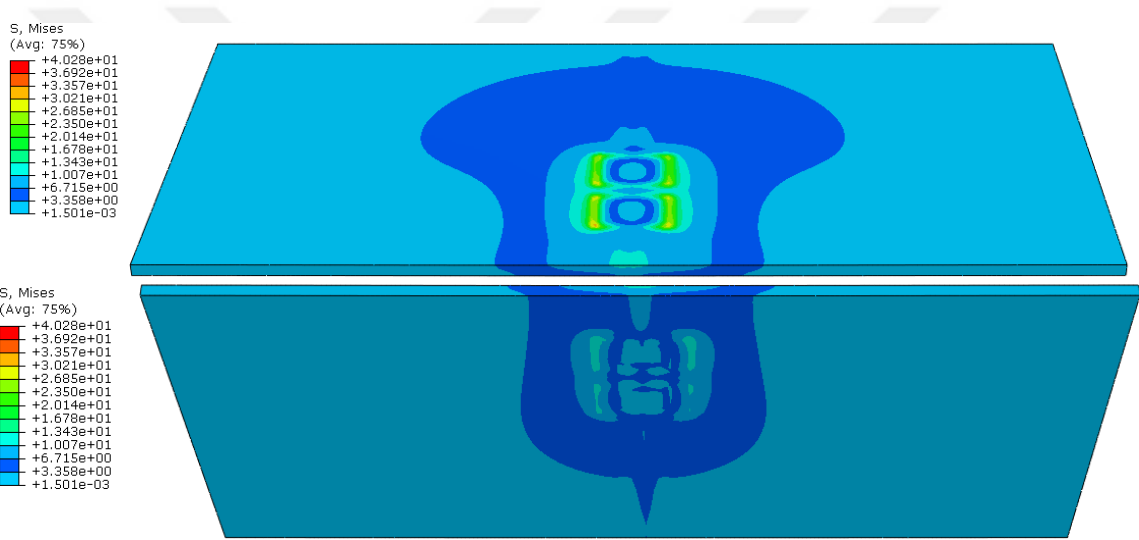
Tablo 3.28 SE analizlerinde elde edilen çekme gerinim değerleri

| Plak tipi | 8 cm asfalt kaplama (*10 ⁻⁶) | 5 cm asfalt kaplama (*10 ⁻⁶) |
|-------------------------|--|--|
| Donatılı | 93.7 | 95.60 |
| Donatısız | 170.1 | 191.20 |
| Ara yüzey Güçlendirmeli | 120.9 | 138.20 |

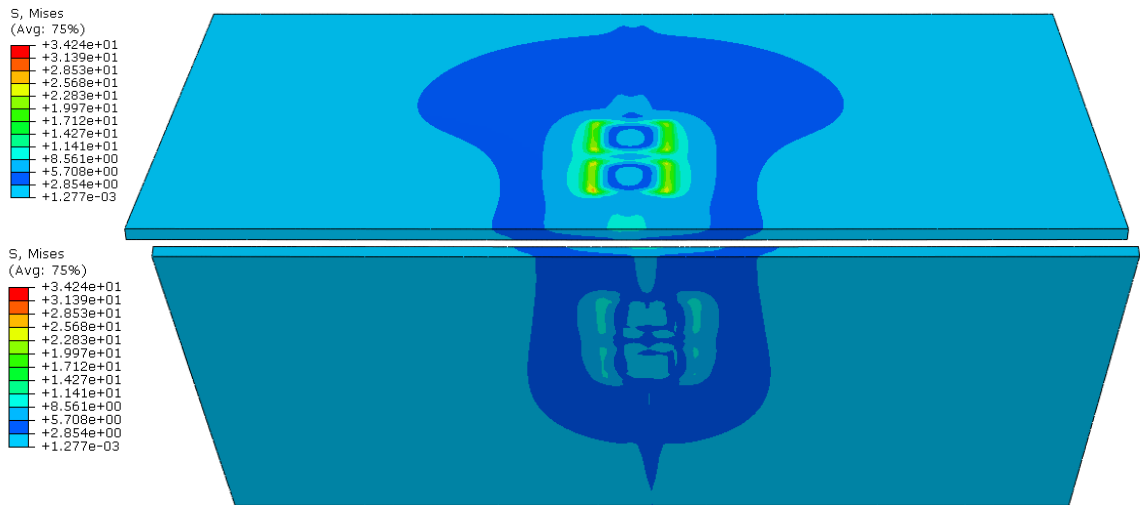
Tablo 3.27 incelendiğinde deneysel çalışmalardan elde edilen çekme gerinim değerlerinin $64.92-94.88 \cdot 10^{-6}$ aralığında, SE modellerinde ise bu değerlerin $93,7-191.20 \cdot 10^{-6}$ aralığında olduğu görülmüştür. Buna rağmen SE modelleri kendi içerisinde tutarlı olduğu ve sonuçlarının literatürde diğer çalışmalardan elde edilen çekme gerinim değerlerine benzediği görülmüştür. SE sonuçları da deneysel çalışmaların sonuçlarında olduğu gibi en düşük gerinim değerleri donatılı plaklarda, daha sonra ara yüzey güçlendirmesi bulunan plaklarda, en yüksek değer ise donatısız plaklarda çıkmıştır. Asfalt kaplama kalınlıkları arasındaki farkın $2-21 \cdot 10^{-6}$ aralığında değiştiği görülmüştür bu değer çekme gerinimleri için oldukça düşük bir değer olduğundan asfalt kaplama kalınlığının artmasının gerinim değerlerini çok fazla azaltmadığı sonucuna ulaşılmıştır. Genel olarak çekme gerinim için SE modellerinin başarılı sonuçlar verdiği kabul edilmiştir. SE’de elde edilen çekme gerinim değerleri ve düşey deplasman değerleri deneysel çalışmada elde edilen sonuçlara uyumlu olması belirlendikten sonra aşağıda kaplamada oluşan çeşitli gerilme şekilleri verilmiştir. Şekil 3.53 örnek olarak bütün kaplamaların bulunduğu model verilmiştir. Burada kritik gerilmeler asfalt kaplamada olduğu görüldüğünden daha sonra Şekil 3.54-3.59 arasında asfalt kaplamalarda oluşan gerilmeler verilmiştir. Son olarak Şekil 3.60’da ara yüzey güçlendirme elemanında oluşan gerilmeler verilmiştir.



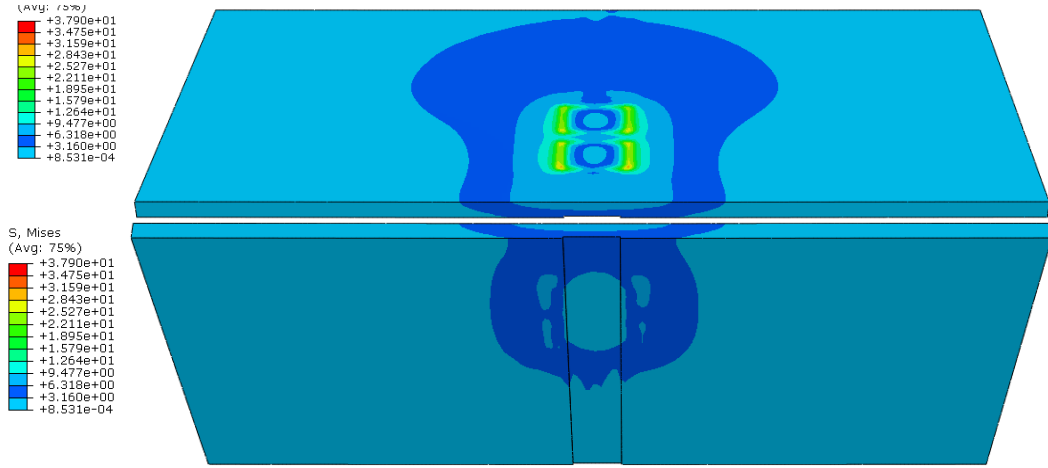
Şekil 3.54. BÜİAK ve Temel tabakalarda oluşan gerilmeler



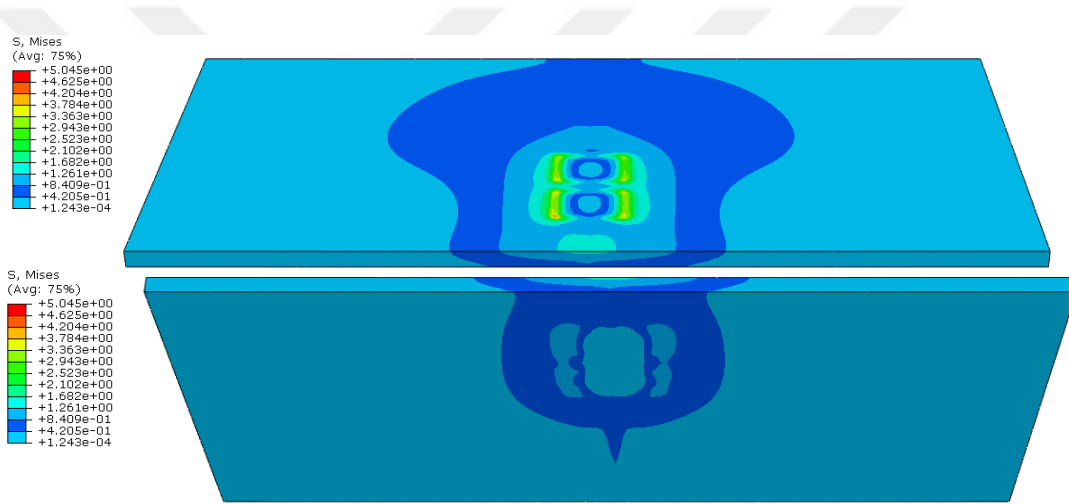
Şekil 3.55. Donatısız plakta 5 cm asfalt kaplama alt ve üst yüzeyinde oluşan gerilmeler



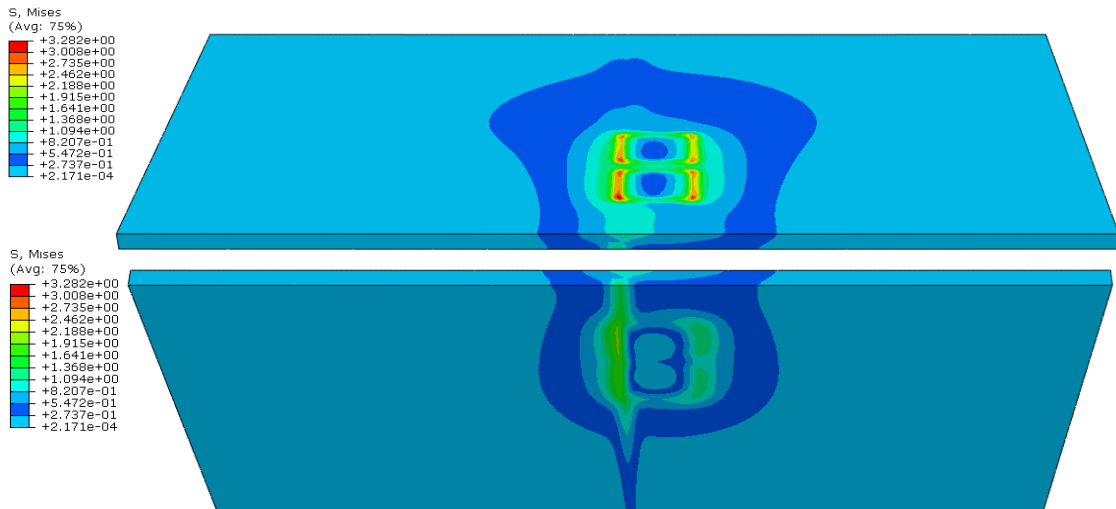
Şekil 3.56. Donatılı plakta 5 cm asfalt kaplama alt ve üst yüzeyinde oluşan gerilmeler



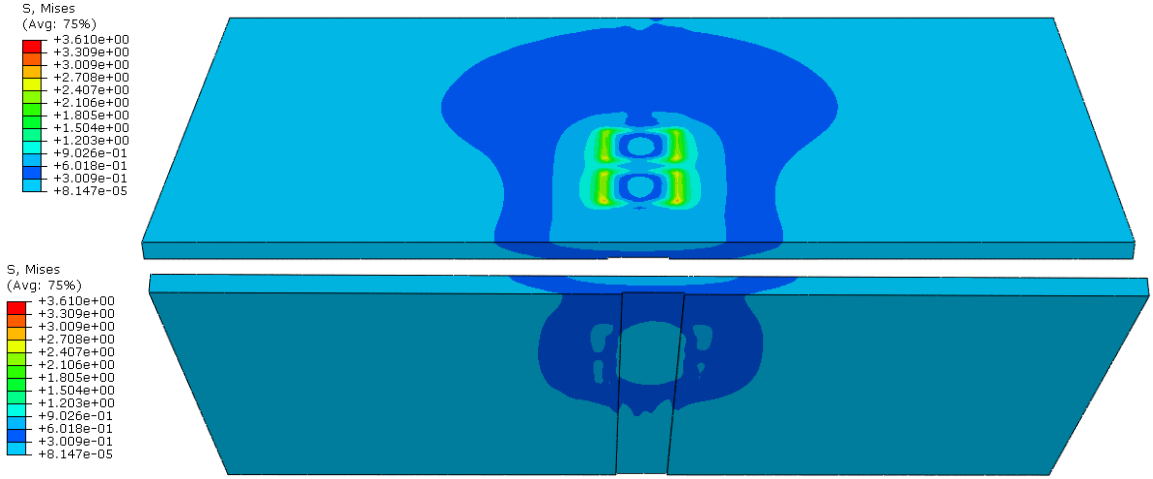
Şekil 3.57. Güçlendirmeli plakta 5 cm asfalt kap. alt ve üst yüzeyinde oluşan gerilmeler



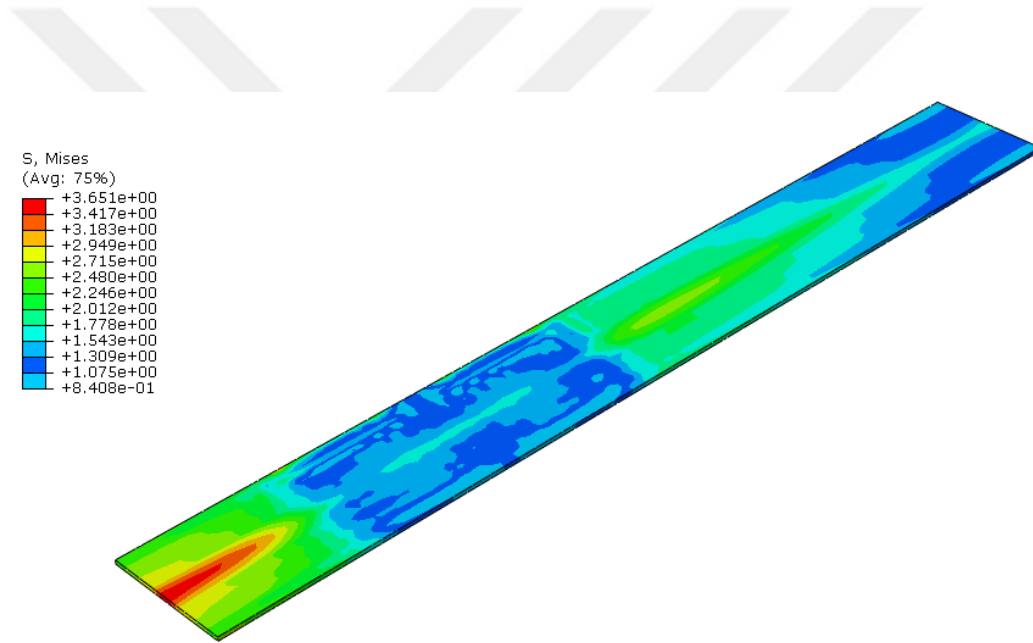
Şekil 3.58. Donatısız plakta 8 cm asfalt kaplama alt ve üst yüzeyinde oluşan gerilmeler



Şekil 3.59. Donatılı plakta 8 cm asfalt kaplama alt ve üst yüzeyinde oluşan gerilmeler.



Şekil 3.60. Güçlendirmeli plakta 8 cm asfalt kap. alt ve üst yüzeyinde oluşan gerilmeler



Şekil 3.61. Ara yüzey güçlendirme plağı üzerinde oluşan gerilme değerleri

Gerilme değerleri incelendiğinde 3-5 MPa gibi küçük değerlerde Von-Mises gerilmeleri olduğu görülmektedir. Bu değerle oldukça düşük değerlerdir. Asfaltın altında bulunan ve asfaltın eğilmesini engelleyen beton plaklar gerilmelerin bu kadar düşük çıkmasının nedenidir. Gerilmelerin dağılımları incelendiğinde tahmin edildiği gibi tekerlek altında kalan kısımlarda daha fazla olduğu görülmektedir. Plakların doğu ve batı ucunda gerilme değerleri neredeyse sıfır olmaktadır.

3.5. Maliyet Hesapları ve Karşılaştırmalar

Yöntem bölümünde 2.7 başlığında detaylı olarak verilen üstyapı tiplerine göre yapılan maliyet hesapları aşağıda Tablo 3.29-3.36’larda verilmiştir. Tablolarda, HYT tesisinde araştırılan kaplamalar, AASHTO’ya göre 3 milyon ESAL yükleme için kalınlıkları verilmiş yol kaplaması ve TRBB’nin bazı mahalle (özellikle eski köy yollarında) kullandığı ve genel bir şartnameye uymayan hizmet ömrü en fazla 10 yıl olan yol kaplamasının maliyeti verilmiştir [145]. Tablolarda beton üstü ince asfalt kaplamaların ayrı ayrı yaklaşık maliyetleri ve yarım derzler için ara yüzey güçlendirmenin 1 km yol masrafları da verilmiştir. Yaklaşık maliyetlerin tamamı 1 km yol için yapılmıştır. Fiyatlara KDV dahil değildir.

Tablo 3.29. 1 km donatısız beton yol 2018 birim fiyatlarına göre yaklaşık maliyeti

| Kurum | Poz No. | Poz Açıklaması | Birim | B.Fiyat | Miktarı | Tutarı |
|---|----------|--|----------------|---------|---------------------|--------------|
| MSB | MSB 322 | Saha , Tretuvar , Yol , Otopark , Hangar ve Atölye İçerisi Beton Kaplama Yapılması (Hazır Beton Kull.) | m ³ | 218.31 | 1260 | 275,070.60 ₺ |
| KGM | KGM/6000 | Ocak Taşından Konkasörle Kırılmış Malzeme ile Alttemel Yapılması | m ³ | 33.6 | 1400 | 47,040.00 ₺ |
| ÇŞB | NYF/03 | Konkasörden Yola Alttemel Nakli (15 km) | m ³ | 2.98 | 1540 | 4,589.20 ₺ |
| AASHTO'ya göre 3 milyon ESAL yük tekrarına sahip Beton Yol (KDV hariç) | | | TOPLAM: | | 326,699.80 ₺ | |

Tablo 3.30. 1 km hasır donatılı beton yol 2018 birim fiyatlarına göre yaklaşık maliyeti

| Kurum | Poz No. | Poz Açıklaması | Birim | B.Fiyat | Miktarı | Tutarı |
|--|----------|---|----------------|----------|---------------------|--------------|
| MSB | MSB 322 | Saha , Tretuvar , Yol , Otopark , Hangar ve Atölye İçerisi Beton Kaplama Yapılması (Hazır Beton Kul.) | m ³ | 218.31 | 1260 | 275,070.60 ₺ |
| KGM | KGM/6000 | Ocak Taşından Konkasörle Kırılmış Malzeme ile Alttemel Yapılması | m ³ | 33.6 | 1400 | 47,040.00 ₺ |
| ÇŞB | Y.23.010 | Nervürlü çelik hasırın yerine konulması (Ø6 150 mm açıklıkta) bindirme ve zaiyat dahil edilmiştir. | Ton | 3,616.56 | 10.36 | 37,467.56 ₺ |
| ÇŞB | NYF/03 | Konkasörden Yola Alttemel Nakli (15 km) | m ³ | 2.98 | 1540 | 4,589.20 ₺ |
| ÇŞB | NYF/07 | Demir Nakliyesi | Ton | 51.66 | 10.36 | 535.20 ₺ |
| AASHTO'ya göre 3 milyon ESAL yük tekrarına sahip Doğu Karadeniz Tipi Donatılı Beton Yol (KDV hariç) | | | TOPLAM: | | 364,702.56 ₺ | |

Tablo 3.31. 1 km esnek kaplama yol 2018 birim fiyatlarına göre yaklaşık maliyeti

| Kurum | Poz No. | Poz Açıklaması | Birim | B.Fiyat | Miktarı | Tutarı |
|--|------------|--|----------------|---------|---------------------|--------------|
| KGM | KGM/6308 | 8 Cm Sıkışmış Kalınlıkta 1 m ² Asfalt Betonunu Binber Tabakası Yapılması (Kır. Ve Elenmiş Ocak Taşı İle) | m ² | 13.11 | 8500 | 111,435.00 ₺ |
| KGM | KGM/6405 | 5 cm Sıkışmış Kalınlıkta 1 m ² Asfalt Betonunu Aşınma Tabakası Yapılması (Kır. ve Elen. Ocak Taşı) (Tip-1) | m ² | 8.46 | 7000 | 59,220.00 ₺ |
| KGM | KGM/6100/3 | Plent-Miks temel yapılması (Kırılmış ve Elenmiş Ocak Taşı | Ton | 37.63 | 3740 | 140,736.20 ₺ |
| KGM | KGM/4358 | Katı Bitümlü Malzemenin Sarnıç Veya Tanklarda Emiş Derecesine Kadar Isıtılması | Ton | 42.54 | 299.38 | 12,735.63 ₺ |
| ÇŞB | 04.610/1B | Bitüm Bedeli | Kg | 1.44 | 299380 | 431,107.20 ₺ |
| KGM | KGM/6000 | Ocak Taşından Konkasörle Kırılmış Malzeme ile Alttemel Yapılması | m ³ | 33.60 | 2337.5 | 78,540.00 ₺ |
| ÇŞB | NYF/Bitüm | Bitüm Kırıkkale Rafineden Plent Nakli (660 km) | m ³ | 102.66 | 127.18 | 13,056.30 ₺ |
| ÇŞB | NYF/03 | BSK Plentten Yola Nakli (15 km) | m ³ | 2.98 | 6552 | 19,524.96 ₺ |
| ÇŞB | NYF/03 | Agrega Konkasörden Plente Nakli (15 km) | m ³ | 2.98 | 3890.25 | 11,592.95 ₺ |
| ÇŞB | NYF/03 | Konkasörden Yola Alttemel Nakli (15 km) | m ³ | 2.98 | 2337.50 | 6,965.75 ₺ |
| AASHTO'ya göre 3 milyon ESAL yük tekrarına sahip asfalt kaplama (KDV hariç) | | | TOPLAM: | | 884,913.98 ₺ | |

Tablo 3.32 5 cm asfalt kaplama yapılması 2018 fiyatlarına göre yaklaşık maliyeti

| Kurum | Poz No. | Poz Açıklaması | Birim | B.Fiyat | Miktarı | Tutarı |
|---|-----------|--|----------------|---------|---------------------|-------------|
| KGM | KGM/4358 | Katı Bitümlü Malzemenin Sarnıç Veya Tanklarda Emiş Derecesine Kadar Isıtılması | Ton | 42.54 | 42 | 1,786.68 ₺ |
| KGM | KGM/6305 | 5 Cm Sıkışmış Kalınlıkta 1 m ² Asfalt Betonunu Binder Tab. Yapılması (Kır.Ve Elen. Ocak Taşı) | m ² | 8.34 | 7000 | 58,380.00 ₺ |
| ÇŞB | 04.610/1B | Bitüm Bedeli | Kg | 1.44 | 42000 | 60,480.00 ₺ |
| ÇŞB | NYF.Bitüm | Bitüm Kırıkkale Rafineden Plent Nakli (660 km) | Ton | 102.66 | 42 | 4,311.72 ₺ |
| ÇŞB | NYF.03 | BSK Plentten Yola Nakli (15 km) | Ton | 2.91 | 840 | 2,444.40 ₺ |
| ÇŞB | NYF.03 | Agrega Konkasörden Plente Nakli (15 km) | Ton | 2.91 | 798 | 2,322.18 ₺ |
| Hazır temel veya beton üzerine 5 cm asfalt kaplama yapımı fiyatı (KDV Hariç) | | | TOPLAM: | | 129,724.98 ₺ | |

Tablo 3.33. 8 cm asfalt kaplama yapılması 2018 fiyatlarına göre yaklaşık maliyeti

| Kurum | Poz No. | Poz Açıklaması | Birim | B.Fiyat | Miktarı | Tutarı |
|---|-----------|--|----------------|---------|---------------------|-------------|
| KGM | KGM/4358 | Katı Bitümlü Malzemenin Sarnıç Veya Tanklarda Emiş Derecesine Kadar Isıtılması | Ton | 42.54 | 67.2 | 2,858.69 ₺ |
| KGM | KGM/6305 | 8 Cm Sıkışmış Kalınlıkta 1 m ² Asfalt Betonunu Binder Tab. Yapılması (Kır.Ve Elen. Ocak Taşı) | m ² | 8.34 | 7000 | 91,770.00 ₺ |
| ÇŞB | 04.610/1B | Bitüm Bedeli | Kg | 1.44 | 67200 | 96,768.00 ₺ |
| ÇŞB | NYF.Bitüm | Bitüm Kırıkkale Rafineden Plent Nakli (660 km) | Ton | 102.66 | 67.20 | 6,898.75 ₺ |
| ÇŞB | NYF.03 | BSK Plentten Yola Nakli (15 km) | Ton | 2.91 | 1344 | 3,911.04 ₺ |
| ÇŞB | NYF.03 | Agrega Konkasörden Plente Nakli (15 km) | Ton | 2.91 | 1276.80 | 3,715.49 ₺ |
| Hazır temel veya beton üzerine 8 cm asfalt kaplama yapımı fiyatı (KDV Hariç) | | | TOPLAM: | | 205,921.97 ₺ | |

Tablo 3.34. 1 km beton yol için derz güçlendirme malzemesi yaklaşık maliyeti

| Kurum | Poz No. | Poz Açıklaması | Birim | B.Fiyat | Miktarı | Tutarı |
|--|-------------|---|----------------|---------|--------------------|-------------|
| Özel | HPM 120 | Çimento esaslı silis dumanı içeren polimer modifiyeli tek bileşenli yüksek mukavemetli harç | kg | 1.98 | 6720 | 13,305.60 ₺ |
| Özel | TEX AR720 | ticm TEX ArR Cam File 40*400 mm açıklıklara | m ² | 9.87 | 350 | 3,454.50 ₺ |
| ÇŞB | Y.21.001/02 | Ahşaptan düz yüzeyli beton ve betonarme kalıbı yapılması | m ² | 45.48 | 28.00 | 1,273.44 ₺ |
| Derz Bölgelerinde 25 cm genişliğinde 8 mm kalınlığında Güçlendirme Yapılması Fiyatı (KDV HARİÇ) | | | TOPLAM: | | 18,033.54 ₺ | |

Tablo 3.35 TRBB'nin mahalle yollarında uyguladığı 1 km asfalt kaplama yaklaşık maliyeti

| Kurum | Poz No. | Poz Açıklaması | Birim | B.Fiyat | Miktarı | Tutarı |
|--|------------|--|----------------|---------|---------------------|--------------|
| KGM | KGM/6320/E | Asfalt Betonu Binder Tabakası Yapılması (Kırılmış Ve Elenmiş Malzeme İle) | Ton | 69.64 | 2448 | 170,478.72 ₺ |
| KGM | KGM/4358 | Katı Bitümlü Malzemenin Sarniç Veya Tanklarda Emiş Derecesine Kadar Isıtılması | Ton | 42.54 | 122.4 | 5,206.90 ₺ |
| ÇŞB | 04.610/1B | Bitüm Bedeli | Kg | 1.44 | 122400 | 176,256.00 ₺ |
| KGM | KGM/6000 | Ocak Taşından Konkasörle Kırılmış Malzeme ile Alttemel Yapılması | m ³ | 33.60 | 2125 | 71,400.00 ₺ |
| ÇŞB | NYF/Bitüm | Bitüm Kırıkkale Rafine- Plent Nak.(660km) | m ³ | 102.66 | 72.3 | 7,422.32 ₺ |
| ÇŞB | NYF/03 | BSK Plentten Yola Nakli (15 km) | m ³ | 2.98 | 1020 | 3,039.60 ₺ |
| ÇŞB | NYF/03 | Agrega Konkasörden Plente Nakli (15 km) | m ³ | 2.98 | 1453.50 | 4,331.43 ₺ |
| ÇŞB | NYF/03 | Konkasörden Yola Alttemel Nakli (15 km) | m ³ | 2.98 | 2125.00 | 6,332.50 ₺ |
| TRBB mah. yollarında uyguladığı 25 cm temel 12 cm binder tabakadan oluşan esnek kaplama yaklaşık maliyeti (KDV hariç) | | | TOPLAM: | | 444,467.46 ₺ | |

Tablolarda verilen yaklaşık maliyetlere göre deneylerin yapıldığı plakların yaklaşık maliyetleri 1 km olacak şekilde hesaplanmış ve Tablo sed. verilmiştir;

Tablo 3.36. HYT tesisinde bulunan plakların 1 km'sinin yaklaşık maliyetleri

| HYT Tesisi | Yaklaşık Maliyeti Hesaplanan Plak tipi | 1 km Mal. |
|-----------------------|---|-------------|
| 2 ve 3.Derzler | 18 cm kalınlığa sahip donatısız derzli beton yol yaklaşık maliyeti | ₺326,699.80 |
| 1. Derzler | 18 cm kalınlığa sahip donatılı derzli beton yol yaklaşık maliyeti | ₺364,702.56 |
| Güney 2. Derz | 18 cm Donatısız Beton kaplama + Sıkıştırılmış 5 cm asfalt kaplama | ₺456,421.78 |
| Güney 1. Derz | 18 cm Donatılı Beton kaplama + Sıkıştırılmış 5 cm asfalt kaplama | ₺494,424.54 |
| Kuzey 2. Derz | 18 cm Donatısız Beton kaplama + Sıkıştırılmış 8 cm asfalt kaplama | ₺532,632.77 |
| Kuzey 1. Derz | 18 cm Donatılı Beton kaplama + Sıkıştırılmış 8 cm asfalt kaplama | ₺570,635.53 |
| Güney 3. Derz | 18 cm Donatısız Beton kaplama+ Güçlendirme +Sıkıştırılmış 5 cm asfalt kap. | ₺474,455.32 |
| Kuzey 3. Derz | 18 cm Donatısız Beton kaplama+ Güçlendirme +Sıkıştırılmış 8 cm asfalt kap. | ₺550,666.31 |
| BSK | 5 cm Aşınma+ 8 cm Binder+ 20 cm Plentmiks Temel+ 25 cm Alttemel | ₺884,913.98 |
| 5 Cm BÜİAK | Sadece 5 cm Asfalt yapımı | ₺129,721.98 |
| 8 Cm BÜİAK | Sadece 8 cm Asfalt yapımı | ₺205,932.97 |
| Güçlendirme | Sadece Arayüzey Güçlendirme Maliyeti | ₺18,033.54 |
| TRBB Esnek | TRBB uyguladığı 25 cm kırmataş temel 12 cm Binderden oluşan Esnek Kap. | ₺444,467.46 |

- Maliyetler incelendiğinde AASHTO'ya göre aynı ESAL sayısı için beton ve asfalt kaplamalar karşılaştırıldığında asfalt kaplama beton kaplamadan 558,214.18 TL (2.7 kat) daha yüksek maliyetlidir. Beton kaplama hasır donatılı olduğunda asfalt kaplamadan 520,211.42 TL (2.42 kat) daha az maliyetli olmaktadır.
- 5 cm kalınlıkta ince asfalt kaplama, 8 cm ince asfalt kaplamadan 76.210,99 TL (1,58 kat) daha ucuza imal edilmektedir.
- Hasır donatısının bulunması, beton kaplama maliyetine km'de sadece 38,002.76 TL (%11.6) fiyat farkı oluşturmaktadır.
- BÜİAK'da ara yüzey güçlendirmesi kullanılması ise maliyeti 18,033.54 TL artırmaktadır. Buna göre 5 cm BÜİAK için maliyet %3.9, 8 cm asfalt için maliyet %3.3 kadar artmaktadır.
- Maliyet tablolarına bakıldığında BSK yerine kompozit kaplamayı tercih etmenin daha az maliyetli olduğu görülmektedir. Buna göre 5 cm ince asfalt kaplamalı kompozit kaplama BSK'dan 428,492.20 TL, 8 cm ince asfalt kaplamalı ise 352,281.21 TL daha ucuza imal edilmektedir. BSK yerine hasır donatılı ve/veya ara yüzey güçlendirmesi bulunan kompozit kaplama yapılması bile 300,000.00-400,00.00 TL arasında daha az maliyetli olmaktadır.
- Bölgede birçok belediye tarafından temel ve bitüm tabakaları olan asfalt kaplamalar yapılmıştır. Bu kaplamaların örnek maliyeti Tablo 3.34'de görüldüğü gibi 444,467.46 ₺'dir. Ancak arazi araştırmalarında bu yolların çok uzun süre hizmet

veremediği genellikle ilk senelerinden itibaren bakım onarım ihtiyacı duyduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle maliyet karşılaştırmasına sokulmamıştır.

3.6. Genel Değerlendirme ve İzin Verilen Yük Tekrar Sayısı

Bu çalışma dâhilinde araştırılan beton üstü ince asfalt kaplamalarda, alt tabakayı oluşturan beton asfalta göre yüksek mukavemet değerleri ve arazi performanslarına sahip bir kaplama türüdür. Bu nedenle kritik gerinim değerleri olan asfaltta oluşan gerinim değerleri takip edilmiştir. BÜİAK kaplamalarında ömür hesabı asfalt kaplamanın yorulma ve tekerlek izi oluşumu hasarlarına göre belirlenmektedir.

BÜİAK'ı oluşturan tabakalardan, asfalt kaplamalarda yorulma çatlakları oluşmasının bir nedeni de altında bulunan beton plağın trafik yükleri nedeniyle düşey doğrultuda tekrar eden deplasmanlar yapmasıdır. Bu çalışmada bu husus takip edilmiş, asfalt kaplama imalatı öncesinde beton yolda düşey deplasmanlar ölçülmüş ancak asfalt kaplama yapıldıktan sonra oluşan deplasman farklarının azaldığı hatta eksi yönde (Zemine doğru) düşey deplasman oluşumunun oldukça az olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca asfalt kaplamanın yük aktarımı değerine oldukça fazla katkısı olduğu görülmüştür. Kalınlık farklarının ve donatılı veya ara yüzey güçlendirme malzemelerinin düşey deplasman oluşumuna katkısı irdelenmiş, donatılı plaklarda daha az düşey deplasman olduğu ancak kalınlığın önemli bir katkı sağlamadığı tespit edilmiştir. Oluşan düşey deplasman değerleri 0.2-0.6 mm arasında değişmektedir. Bu değerleri oluşturan yükün asfalt alt yüzeyinde oluşturduğu gerinimler ile ampirik formüller kullanılarak yaklaşık ömür (izin verilen yük tekrar sayısı) bilgisine ulaşılmaktadır. Bu nedenle asfalt kaplamanın alt yüzeyinde oluşan gerinim değerleri ölçülmüştür ve irdelenmiştir. Asfalt kaplamanın alt yüzeyinde oluşan çekme gerinim değerleri bölüm 1.12'de verilmiş olan izin verilen yük tekrar sayısı (N_f) formüllerine göre değerlendirildiğinde yük tekrar sayısı hesabı şu şekilde çıkmaktadır;

Tablo 3.17 ve 3.18'de verilmiş olan oluşmuş en yüksek çekme gerinmesi:değeri $135 \cdot 10^{-6}$ olduğu görülmektedir, ayrıca SE analizlerinde de çekme gerinmelerinin en yüksek değeri $191.20 \cdot 10^{-6}$ çıkmıştır. Formüllerde çekme gerinimi kadar asfalt kaplamanın elastisite modülü de önemlidir. Elastisite modülü sıcaklıkla değişebilen bir değer olduğu bilinmektedir. Buna göre elastisite modülünün 7,000 MPa (en yüksek çekme gerinim değeri ocak ayında elde edildiğinden biraz yüksek elastisite modülü kullanılmıştır.) olduğu kabul edilmiştir. Formüllere göre elastisite modülü düştükçe izin verilen tekrar sayısı daha

da artmaktadır. Bu nedenle elastisite modülünü yüksek almanın daha kritik olduğu da hesaba katılmıştır. Ampirik formüllerde bilinmeyenler yerine koyulduğunda Asfalt Enstitüsünün geliştirdiği formüle göre N_f değeri 225,000,000 civarında çıkmakta, IRC'nin geliştirdiği formülde ise N_f değeri 129,000,000 civarında çıkmaktadır. Bu yükleme sayıları gerçek arazi koşullarına göre oldukça fazladır. Bu sonuçlar ampirik formüllerin tam manası ile doğru sonuçları vermediği sadece yol gösterici olduğu doğrulanmaktadır. Ayrıca IRC sonuçlarının Asfalt Enstitüsü sonuçlarına nazaran arazi sonuçlarına daha yakın olduğu görülmektedir.

N_f ile ilgili formüllere aynı özelliklere sahip asfalt için 3,000,000 ESAL yüklemeye izin veren gerekli gerinim değerlerine de bakılmıştır. Asfalt Enstitüsüne göre izin verilen tekrar sayısının 3,000,000 ESAL olması için yaklaşık $500 \cdot 10^{-6}$, IRC Enstitüsüne göre izin verilen tekrar sayısının 3,000,000 ESAL olması için yaklaşık $325 \cdot 10^{-6}$ değerinde çekme gerinimleri oluşması gerekmektedir. Bu rakamlar literatür verileri ile uyuşmaktadır.

Bu çalışmada HYT tesisinde 100,000 yüklemenin arazi koşulunda karşılığı 1,186,000 ESAL'dir. Bu değeri N_f formüllerinde yerine koyup olması gereken gerinim değerlerini bulduğumuzda; Asfalt Enstitüsüne göre izin verilen tekrar sayısının 1,186,000 ESAL olması için yaklaşık $664 \cdot 10^{-6}$, IRC'ye göre izin verilen tekrar sayısının 3,000,000 olması için yaklaşık $541 \cdot 10^{-6}$ değerinde çekme gerinimleri asfalt alt yüzeyinde oluşması gerekmektedir. Bu rakamlar asfalt alt yüzeyinde oluşan en yüksek çekme gerinimleri değerlerinden 4-5 kat daha fazladır. Bu sonuçlar değerlendirildiğinde 5 cm asfalt kaplama yapılmasının bile yorulma çatlakları açısından yeterli olacağı görülmektedir. Nitekim HYT tesisinde 100,000 yüklemeye rağmen her iki asfalt kaplama kalınlığında da yorulma çatlakları tespit edilememiştir.

4. SONUÇLAR ÖNERİLER

Bu çalışmanın temel amacı Dünya’da ve Türkiye’de uzun yıllar boyunca kullanılan veya mukavemet değerleri çeşitli nedenlerle düşük olan beton yolların iyileştirilmesi için, yapılacak ince asfalt kaplama kalınlığının HYT tesisi kullanılarak optimize edilmesidir. Bu amaca ulaşabilmek için iki farklı asfalt kalınlığı seçilmiş, enine 1. yarım derzi oluşturan plak, hasır donatılı olarak tercih edilmiş, 2. yarım derzi oluşturan plak donatısız ve ara yüzey güçlendirmesi olmadan asfalt kaplanmış (boş plak) ve 3. yarım derzi oluşturan plakta ise asfalt ile beton arasında ara yüzey güçlendirme malzemesi denenmiştir. Deneyler boyunca tekerlek izi ve yorulma çatlakları oluşumları takip edilmiş, plaklarda oluşan düşey deplasmanlar ve asfalt kaplamanın alt yüzeyinde oluşan basınç ve çekme gerinimleri ölçülmüştür. Ölçülen değerler hazırlanan sonlu elemanlar modellerinin sonuçları ile karşılaştırılmış ve SE sonuçları doğrulandıktan sonra, deneyler sırasında tespit edilemeyen gerilme değerleri de irdelenmiştir. En son olarak maliyet analizleri yapılmış ve bütün çalışmadan elde edilen sonuçlar ayrıca maliyet analizleri ile beraber yorumlanmıştır. Çalışmanın bütününden çıkartılmış başlıca sonuç ve öneriler aşağıda verilmiştir.

- ✓ Beton yollarda tek sıra hasır donatı kullanılması, rötre ve genişleme çatlaklarını 6 kat azalttığı tespit edilmiştir.
- ✓ Yarım derzlerde plak kalınlığı boyunca oluşan derz ilerleme çatlakları, donatısız plaklarda 4,000-5,000 yüklemde (arazi koşullarında yaklaşık 50,000 ESAL) oluşmuş, hasır donatılı plaklarda ise yaklaşık 10,000-12,000 geçiş sonrası (arazi koşullarında yaklaşık 125,000 ESAL) oluşmuştur. Başka bir ifadeyle hasır donatılı beton plaklarda derz ilerleme çatlakları donatısız beton plaklara göre ortalama 2.5 kat geç oluşmaktadır.
- ✓ Beton plaklarda ilk yüklemeler ile 25,000 yüklem sonrası oluşan toplam düşey deplasmanların ortalaması karşılaştırılmış, 25,000 yüklem sonrası toplam deplasmanların ortalamasının, ilk yüklemelerde oluşan düşey deplasmanların ortalamasından %53 oranında fazla olduğu tespit edilmiştir.
- ✓ Beton plaklarda 25,000 yüklem sonrası artı yönde yapılan deplasmanlarda derz ilerleme çatlaklarının oluşması nedeniyle %25-200 arasında artış olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle derz ilerleme çatlaklarının oluşumunu engellemek,

plakların artı yönde düşey deplasman değerinin artma oranını azaltacağı sonucuna ulaşılmıştır.

- ✓ Beton plaklar arası yük transfer verimliliği (LTE) değerleri incelenmiş, yüklemeler başladığında LTE değerleri donatısız plakalarda ortalama %83 civarındayken donatılı plaklarda bu oranın ortalama %89 civarında olduğu, yüklemeler bittiğinde ise donatısız plaklarda ortalama %73.89'a düşerken donatılı plaklarda oran %83.77 gibi yüksek değerlerde kalmaktadır. Bu sonuçlar neticesinde derz ilerleme çatlakları oluşsa bile hasır donatının LTE değerlerine ortalama %10 katkısı olduğu görülmüştür.
- ✓ Beton üstü asfalt kaplama yapıldıktan sonra düşey deplasman değerleri incelenmiş, 100,000 yükleme sonrasında artı deplasmanların bir miktar arttığı ancak eksi yönde oluşan deplasmanların dikkate alınmayacak kadar az değiştiği sonucuna ulaşılmıştır. Elde edilen bu sonuç beton plakların, ince asfalt kaplama ile kaplanmadan önce en az 1 sene beton yol olarak kullanılmasının ve zeminin beton plak üzerinden geçen trafik yükleri tarafından sıkışmasının faydalı olacağı sonucunu ortaya çıkarmıştır.
- ✓ Asfalt kaplama sonrası LVDT'lerin okuduğu değerler arasında farklar incelendiğinde, en yüksek düşey deplasmanın boş yarım derzde (0.62-0.615 mm) daha sonra ara yüzey güçlendirmesi bulunan derzde olduğu (0.53-0.42 mm), en düşük düşey deplasmanın ise donatılı plakta (0.23-0.144 mm) olduğu görülmüştür. Yorulma çatlaklarının bir nedeni beton plakların trafik yükleri nedeniyle yaptıkları düşeydeki deplasmanlar olduğu bilinmektedir. Bu sonuçlar neticesinde plaklarda donatı olması, diğer plak tiplerine göre yorulma çatlakları oluşumunu erteleyeceği anlaşılmıştır.
- ✓ Asfalt kaplama sonrası LVDT'ler vasıtasıyla ölçülen deplasman değerlerinin asfalt kalınlığı ile ilişkisi incelendiğinde; 8 cm asfalt kaplamada 5 cm asfalt kaplamadan kuzey ve güney güzergahlarda 0.01-0.08 mm aralığında daha az deplasman oluştuğu görülmüştür. Ancak 2018 fiyatları ile maliyetler incelendiğinde, 5 cm asfalt kaplama yapılması, 8 cm asfalt kaplama yapılmasından 76,210.99 TL (1.58 kat) daha az maliyetlidir. Oluşan deplasman farkının çok küçük değerlerde olması, 5 cm asfalt kaplamanın 8 cm kaplamaya göre maliyet açısından tercih edilmesinin daha doğru olacağı sonucunu çıkartmıştır.

- ✓ Deneyleer için imal edilmiş gerinim (birim Şekil değiştirme) ölçerlerin %85.70'i deneyleere başlamış ve deneyleerde ölçüm alınması beklenen verilerin %80.35'i başarılı bir Şekilde alınmıştır. Elde edilen gerinim değerleri de benzer çalışmalarda elde edilen gerinim değerleri aralığında olduğu görölmüŐtür.
- ✓ Basınç gerinimleri incelendiğinde; donatısız plakta bulunan gerinim ölçerlerde, donatılı plaktakilerden 3.8 kat, güçlendirilmiş plaktakilerden ise yaklaşık 2 kat daha fazla basınç gerinimi oluştuğu görölmüŐtür.
- ✓ Kalınlık farkına göre basınç gerinimleri incelendiğinde, 8 cm kalınlıktaki asfalt kaplamasının altında 5 cm kalınlıktaki asfalt kaplamasının altında oluşan gerinim değerlerine göre, $22.36 \cdot 10^{-6}$ ile $109.44 \cdot 10^{-6}$ arasında daha az gerinim oluştuğu görölmüŐtür. Ancak asfalt altında iki tekerlek arasına denk gelen yerde kalan gerinim ölçerin değerleri incelendiğinde 8 cm asfalt kaplamada 5 cm asfalt kaplamadan $26.24 \cdot 10^{-6}$ miktarında fazla çıkmaktadır. Bu durum, asfalt kalınlığı arttıka tekerlek altında gerinim değerlerinin azaldığı ancak tekerlek arasında kalanın ise artabileceği sonucunu doğurmuştur.
- ✓ Basınç gerinimleri yükleme sayısı ile belirli bir oran ile artmamaktadır. İlk 20,000 yüklemede basınç gerinimleri, birbirinden değer farkı yüksek sonuçlar vermekte, 20,000 yüklemeden sonra sonuçların birbiri arasında farkı azalmaktadır. Bunun nedeni, asfalt kaplamalara tasarımda bırakılan boşluk oranı ve asfaltın sıkışmaya devam etmesidir. İlk 20,000 yükleme sırasında bu boşluklar sıkışarak dolmakta bu sırada agregalar yer deęiŐtirirken farklı değerler üretmektedir.
- ✓ Asfalt alt yüzeyinde oluşan çekme gerinimleri incelendiğinde, 8 cm asfalt kaplamada donatılı plakta oluşan gerinim değerlerinin (tek gerinim ölçer var) çok yüksek değerler ürettiği ve 50,000 yüklemeye ulaŐmadan değere üretmez hale geldiği görölmüŐtür. Bu gerinim ölçerin deneyleer sırasında bozulduğu anlaşılmaktadır. Bu gerinim ölçerin değerleri dikkate alınmadığında, çekme gerinimlerinin yükleme nedeniyle genellikle arttığı görölmüŐtür.
- ✓ Asfalt kalınlığı ile çekme gerinimleri arasındaki ilişki irdelendiğinde, asfalt kalınlığının artmasının gerinim değerlerini çok fazla azaltmadığı hatta birkaç gerinim ölçerde 5 cm asfalt kaplamada 8 cm asfalt kaplamaya göre daha az gerinim değerlerinin okunduğu görölmüŐtür. Ayrıca çekme gerinimlerinin neden olduğu yorulma çatlakları yüklemeler boyunca takip edilmiş fakat gerek 5 cm asfalt kaplamada gerekse 8 cm asfalt kaplamada oluşmadığı tespit edilmiştir. Her

güzergâh 100,000 yüklemeye maruz bırakılmıştır. 100,000 yükleme sonrası oluşan çekme gerinimleri değerleri iki kaplama kalınlığında da yaklaşık $60-100 \cdot 10^{-6}$ arasında değiştiği görülmüştür. Bu gerinim değerleri literatürde yorulma çatlağı oluşturan değerlere göre düşük bir değerdir.

- ✓ Arazi koşullarında asfalt kaplamalarda yapılan yüklemenin karşılığı 1,186,000 ESAL'dir. Oluşan çekme gerinimlerinin oldukça düşük olması ve yorulma çatlaklarının oluşmaması, çekme gerinimleri dikkate alındığında maliyet açısından 8 cm asfalt kaplama yerine 5 cm asfalt kaplama seçilmesinin daha faydalı olacağı sonucunu göstermiştir.
- ✓ Çekme gerinimleri donatılı ve ara yüzey güçlendirmeli derzlerde yaklaşık aynı değerlerde $65 \cdot 10^{-6}$ çıkmıştır. Buna karşılık boş olan plakta ise ortalama çekme gerinim değeri $88 \cdot 10^{-6}$ civarı olduğu görülmüştür. İzin verilen yük tekrar sayıları (N_f) formüllerine göre, çekme gerinimleri formüllerde hesaplanmış ve yüz milyonun üstünde tekrar sayıları gibi oldukça yüksek ve tutarsız sonuçlara ulaşılmıştır. Bu durum ampirik N_f formüllerin doğru olmadığını, sadece yol gösterici olabileceğini ispat etmektedir. N_f değerleri incelendiğinde, oluşan çekme gerinimlerinin ne kadar küçük olduğu tekrar ispat edilmiş olmaktadır. Ayrıca asfalt kalınlığı seçiminde aradaki çekme gerinimi farkının önemli olmadığını göstermiştir.
- ✓ Ampirik N_f formülleri kullanılarak izin verilen yük tekrar sayısı 3 milyon ESAL olduğunda gerekli çekme gerinim değerleri hesaplandığında Asfalt Enstitüsüne göre $500 \cdot 10^{-6}$, IRC'ye göre $325 \cdot 10^{-6}$ değerine ulaşılmıştır. Bu değerler deneylerde elde edilen çekme gerinim değerlerinin 3-5 katı fazladır. Asfalt kaplamanın altında bulunan beton kaplama, asfaltın üzerindeki yük nedeniyle uzama yapmasına dolayısıyla çekme gerinimi oluşmasını engellemektedir. Bu nedenle beton üstü asfalt kaplamalarda oluşan çekme gerinimleri düşük çıkmaktadır.
- ✓ Çekme ve basınç gerinimlerinin, plağın süreksiz olduğu kenarına doğru nasıl değiştiğini takip etmek için plak kenarında derz üstüne denk gelecek yere (LVDT'lerin önüne) gerinim ölçer yerleştirilmiştir. Bu gerinim ölçerlerin yüklemeler sırasında ölçtüğü değerlerin ortalaması çekmede $13.46 \cdot 10^{-6}$ basınçta $14.70 \cdot 10^{-6}$ olduğu görülmüştür. Bu değerler ile en yakın tekerleklerin altında (90 cm) oluşan gerinimler ile kurulan bağıntılar vasıtasıyla plakların süreksiz

kenarlarında sifıra yakın gerinim olması için gerekli mesafeler hesaplanmış, 103-105 cm civarında olduğu tespit edilmiştir.

- ✓ Tekerlek izi oluşumları incelendiğinde 5 cm asfalt kaplamanın ilk 20,000 yüklemesinin yapıldığı havanın sıcak olduğu aylarda tekerlek izi oluştuğu görülmüştür. Aynı gün imal edilmiş aynı özelliklere sahip 8 cm kalınlığındaki asfaltta ocak ve şubat aylarında yapılan yüklemeler nedeniyle tekerlek izi oluşumu tespit edilemediğinden, tekerlek izi oluşumunun sıcaklıkla değiştiği bir kez daha görülmüştür. 5 cm asfalt kaplamada oluşan tekerlek izleri incelendiğinde; gerek kabarmalarda gerekse çökmelerde oluşan değerlerde boş derzin en yüksek değerlere sahip olduğu görülmektedir. Boş derzi donatılı derz takip etmekte, en küçük değerler ise ara yüzey güçlendirmesi yapılmış derzde oluşmaktadır. Boş derz, ara yüzey güçlendirmesi bulunan derzden ortalama 2.23 kat yani 3.34 mm daha fazla kabarmıştır. Aynı şekilde boş derz donatılı derzden 1.27 kat (1.31 mm) daha fazla kabarmıştır. Çökme oluşumlarına bakıldığında ise boş derz ortalama olarak ara yüzey güçlendirmesi olan derzden 2.27 kat (3.95 mm), donatılı derzden 1.25 kat (1.45 mm) daha fazla çökmüştür.
- ✓ Asfalt kaplamanın alt ve üst yüzeyinden düzenli olarak basınç hücreleri ile ölçümler alınmıştır. Alınan ölçümlerde alt yüzeyde oluşan basınç değerleri her iki kaplama türünde de yaklaşık 30,000 yüklemeye kadar hızlı bir şekilde artmış daha sonra basınç değişimi oldukça azalmıştır. Bunun nedeninin asfaltın içinde bulunan boşlukların sıkışmasıdır.
- ✓ 8 cm kalınlıktaki asfalt kaplamada, 5 cm kalınlıktaki asfalt kaplamaya göre ilk yüklemelerde 26.5 kPa (%4.2), son yüklemelerde ise 38 kPa (%5.15) oranında daha az basınç oluşmaktadır.
- ✓ 100,000 geçiş sonrasında 8 cm asfalt kaplamada basınç farkı 95 kPa (%15.89 artış) olmuştur. 5 cm asfalt kaplamanın alt yüzeyindeki basınç farkı ise 106 kPa (%16.8 artış) olmuştur
- ✓ Asfalt yüzeyinden sabit olarak 780 kPa basınç uygulanmıştır. Bu değer 100,000 yükleme sonrasında asfalt alt yüzeyine; 8 cm asfalt kaplamada %10 azalarak 604 kPa olarak, 5 cm asfalt kaplamada ise %5.5 azalarak 737 kPa olarak yansımıştır.
- ✓ SE modelleri ile elde edilen verilerde, eksi yönde düşey deplasman değerleri 0.2-0.6 mm fazla çıkmıştır. Deneysel çalışmalarda, LVDT'ler kullanılarak plağın kenarında ölçümler aldığı halde SE modellerinde yükün altına denk gelen yerlerde

düşey deplasman ölçümü bu farkın nedenidir. Diğer nedenler ise SE modellerinde zemin davranışı deneysel çalışmalara göre daha ideal olması ve yükün sabit olarak bulunmasıdır. Bu farka rağmen SE modellerinden elde edilen veriler Deneysel çalışmalar ile uyumaktadır. SE analizlerine göre Donatılı plaklarda donatısız plaklara göre ortalama 4.7 kat daha az düşey deplasman oluşmaktadır.

- ✓ SE modelleri ile hasır donatıda oluşan gerilmeler incelenmiş, özellikle derzlerde yüklemeler nedeniyle görülen derz ilerleme çatlakları oluşuktan sonra hasır donatılara 268 MPa gerilme gelmekte, bu gerilmeler tam derzin bulunduğu bölgede oluşmaktadır. Buna göre plağın tamamına hasır donatı koyulması yerine derz bölgesine daha fazla donatı koyulmasının daha faydalı olacağı sonucuna ulaşılmıştır.
- ✓ SE modellerinde BÜİAK'ta elde edilen düşey deplasman değerleri, deneysel yöntemle elde edilenden yaklaşık 0.1 mm fazla çıkmaktadır. Asfalt kaplamanın 8 cm olması, 5 cm olmasına göre düşey deplasmanı ortalama 0,09 mm azaltmaktadır.
- ✓ SE modellerinde elde edilen çekme gerinim değerleri de deneysel modeller ile tutarlılık göstermektedir. Modellerde asfalt kaplama kalınlığının 5 cm yerine 8 cm olmasının gerinim değerini $2-21 \cdot 10^{-6}$ aralığında düşürdüğü görülmüştür.
- ✓ Maliyet karşılaştırmaları yapıldığında AASHTO'nun 3,000,000 ESAL'e göre düzenlediği kalınlık tasarımlarına göre beton yollar BSK yoları göre 558,214.18 TL (2.7 kat) daha düşük maliyetlidir.
- ✓ 5 cm kalınlıkta ince asfalt kaplama, 8 cm ince asfalt kaplamadan 76,210.99 TL (1.58 kat) daha ucuza imal edilmektedir. Ara yüzey güçlendirmenin 1 km maliyeti 18,033.54 TL hasır donatının ise 38,002.76 TL olduğu görülmüştür.
- ✓ Kompozit kaplama olan BÜİAK da BSK'ya göre daha düşük maliyetlidir. Buna göre 5 cm ince asfalt kaplamalı kompozit kaplama BSK'dan 428,492.20 TL, 8 cm ince asfalt kaplamalı ise BSK'dan 352,281.21 TL daha ucuza imal edilmektedir. BSK yerine hasır donatılı veya ara yüzey güçlendirmesi bulunan kompozit kaplama yapılması bile 300,000.00-400,00.00 TL arasında daha az maliyetli olmaktadır.

Genel olarak değerlendirildiğinde, düşey deplasman oluşumlarının engellenmesi için hasır donatı kullanılmasının faydası görülmüştür. Ara yüzey güçlendirmesi de düşey

deplasmanları engellemektedir. Çekme ve basınç gerinimleri beklenildiği gibi düşük çıkmıştır. Gerinim nedeniyle 8 cm asfalt kaplama yerine 5 cm asfalt kaplamanın tercih edilmesine gerek yoktur. Yarım derzdeki Ara yüzey güçlendirme malzemesinin tekerlek izi oluşumlarını engellediği görülmüştür. Kaplamalarda oluşan basınç değerleri de irdelendiğinde, 8 cm asfalt kaplamanın beton plağa daha az basınç ilettiği ancak beton kaplamanın zaten rijit olduğundan basınç iletilmesinde bir beis olmadığı için bu özelliğin aslında faydalı bir özellik olmadığı anlaşılmaktadır. Bu bağlamda maliyet hesaba katıldığında, beton yolların, belirli hizmet ömrünü tamamladıktan sonra kompozit kaplamaya çevrilmesinin oldukça faydalı bir yöntem olduğu anlaşılmaktadır. Beton yollarda yarım derzler kullanılmışsa, 5 cm asfalt kaplamanın kullanılmasının yeterli olacağı görülmüştür. Donatılı plak yapılmasının düşey deplasmanı azalttığı, güçlendirme malzemesinin de hem tekerlek izi oluşumunu hem de diğer hasara neden olabilecek gerinimleri önemli ölçüde azalttığı görülmüştür. Maliyete ekstra külfeti çok fazla olmayan bu metotların kullanılmasının oldukça faydalı olacağı sonucuna ulaşılmıştır.

Beton yolların yıllarca hizmet verdikten sonra basit iyileştirme metotları ile yerinde sürdürülebilirlik ilkesine uygun olarak kaplamada görev almaya devam edebilen bir kaplama türü olduğu bu tez çalışmasıyla gösterilmiştir..

HYT tesisinde deneylerin toplam süresi (kaplamanın imalatı + yorulma + aksaklıkların giderilmesi vb. nedenler) yaklaşık 6 ay ile 1 yıl arası sürmektedir. Bu nedenle çalışma kapsamında deneye tabi tutulabilecek birçok kaplama türü hakkında deney yapılmamıştır. İleride yapılacak çalışmalarda hasır donatı miktarının derz kısımlarında artırılmasının veya asfalt ile beton arasında adezyon özellikli (zift gibi) malzemelerin denenmesinin sonuca olan etkisi incelenmelidir. Ayrıca yarım derz yerine tam derz kullanılmasının, asfalt kalınlığının biraz daha düşürülmesinin, geogrid/geotekstil malzemelerin arayüzeyde kullanılmasının araştırılmaları yapılmasının da faydalı olacağı düşünülmektedir.

5. KAYNAKLAR

1. Karayolları Genel Müdürlüğü, Strateji Geliştirme Daire Başkanlığı, Faaliyet Raporu (2018), Ankara, 2018.
2. Bakış A., Esnek ve Rijit Üstyapılarda Kaplama Kalınlığı ve Üstyapı Maliyetinin En Küçük Kareler Yöntemiyle Hesaplanması, Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi, 10, 2 (2018).
3. Shahin M., Y., Pavement Management For Airports, Roads And Parking Lots, Kluwer Academic Publishers, London, 2002.
4. Beskou, N., D. ve Theodorakopoulos, D., D., Dynamic Effects of Moving Loads on Road Pavements: a Review, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 31, (2011) 547-567.
5. Selvaraj, S., I., Review On The Use of Instrumented Pavement Test Data in Validating Flexible Pavement Mechanistic Load Response Models, Procedia-Social and Behavioral Sciences, 43, (2012) 819-831.
6. Bayomy, F., Salem, H. ve Vasti, L., Analysis of the Long-Term Pavement Performance Data for the Idaho GPS and SPS Sections, Final Report, National Institute for Advanced Transportation Technology Center for Transportation Infrastructure, Idaho, 2006.
7. Ahmad, R., Menendez, J., R. ve Kargah-Ostadi, N., Long-Term Pavement Performance Bind Online User Guide, Report No: FHWA-HRT-17-010, Federal Highway Administration, Virginia, 2017.
8. Henderson M., Jones D., Sadzik E., Sampson L., ve Yeo R., Innovation and Accelerated Pavement Testing: A Means to Achieve Asset Sustainability, Main Roads Engineering Technology Forum, 14th, Brisbane, Queensland, Australia 2008.
9. McNermey, M., T., Hugo, F., ve McCullough, B., F., The Development of an Accelerated Pavement Test Facility for Florida Department of Transportation, CTR Research Report 997-3F, Center for Transportation Research, University of Texas, 1994.
10. Jordan, R., W., Coley, C., Harding, H., M., Carswell, I. ve Hassan, K., E., Best Practice Guide For Overlaying Concrete, Road Note RN41, Transport Research Laboratory, İngiltere, 2008.
11. Khazanovich, L., Rita, L. ve Tompkins, D., Guidelines for the Rehabilitation of Concrete Pavements Using Asphalt Overlays, Final Report, University of Minnesota, 2009.

12. Du Plessis, L., Coetzee, N., F., Burmas, N., Harvey, J., T. ve Monismith, C., L., The Heavy Vehicle Simulator in Accelerated Pavement Testing-a Historical Overview and New Developments, International Journal of Pavement Research and Technology, (2018).
13. Changshun, H. ve Dongwei, C., Structural Study of Asphalt Concrete Overlays on the Existing Portland Cement Concrete Pavement, Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, 3, 3 (1999).
14. Cho, Y., Liu, C., Dossey, T. ve McCullough, B.,F., Asphalt Overlay Design Methods for Rigid Pavements Considering Rutting, Reflection Cracking, and Fatigue Cracking, Report No.TX-98/987-9, Center For Transportation Research, Texas, 1998.
15. Çelik, M., Karadeniz Bölgesi Köy Yolları İçin Rijit Ve Esnek Kaplamanın Mekanistik ve Maliyet Açısından Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2013.
16. Çelik, M., Seferoğlu, M., T., Seferoğlu, A., G. ve Akpınar, M., V., Karadeniz Bölgesi Köy Yollarındaki Drenaj Yapılarının Yetersizliğinden Kaynaklanan Problemler ve Çözüm Önerileri, 7. Kentsel Altyapı Sempozyumu, Kasım 2015, Trabzon, Bildiriler Kitabı: 587-596.
17. Li, S., Liu, X. ve Liu, Z., Interlaminar Shear Fatigue and Damage Characteristics of Asphalt Layer for Asphalt Overlay on Rigid Pavement, Construction and Building Materials, 68, (2014) 341-347.
18. Zarei, B. ve Shafabakhsh, G., A., Dynamic Analysis of Composite Pavement Using Finite Element Method and Prediction of Fatigue Life, Computational Research Progress in Applied Science & Engineering, 4, 2 (2018) 33-37.
19. Huang, Y., H., Pavement Analysis and Design, Prentice Hall, New Jersey, 1993.
20. Hall, K., T., Correa, C., E., Carpenter, S., H. ve Elliott, R., P., Rehabilitation Strategies for Highway Pavements, NCHRP Project C1-38, Transportation Research Board, Washington, 2001.
21. Bennert, T., A., A Rational Approach to the Prediction of Reflective Cracking in Bituminous Overlays for Concrete Pavements, Doktora Tezi, The State University of New Jersey, New Brunswick, 2009.
22. Zhou, F., ve Scullion, T., Upgraded Overlay Tester and Its Application to Characterize Reflection Cracking Resistance of Asphalt Mixtures, Report 0-4467-1, Texas Transportation Institute, College Station TX, 2003.
23. Tunç, A., Kaplama Mühendisliği ve Uygulamaları, Asil Yayın Dağıtım, Ankara, 2004.

24. Ağar, E., Sütaş, İ. ve ztaş, G., Beton Yollar, İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul, 1998.
25. Kozak, M., Beton Yollar ve Beton Yol Yapımının Araştırılması, Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi, 7, 1 (2011) 89-99.
26. Ecevit, O., Karayollarında Rijit styapı Uygulamaları ve Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2007.
27. Puyan, M., S., Beton Yollarda atlak Denetimi, Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi, Edirne, 2003.
28. Bolat, H., Subaşı, S., Çullu, M. ve Akkaya, U., Beton Yolları Bekleyen Tehlikeler, Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi, 6, 1 (2010) 30-37.
29. Amerika Ulaştırma Bakanlığı Federal Karayolu İdaresi, Beton Yollar İçin Bütünleşik Malzeme ve Yapım Uygulamaları, Washington D.C., 2007.
30. Shrive, N., G. ve El-Rahaman, M., Understanding the Cause of Cracking in Concrete a Diagnostic Aid, Concrete International Magazine, 7, 5 (1985) 39-44.
31. Kostovos, M., D., Effect of Testing Techniques on the Post-Ultimate Behaviour of Concrete in Compression, Materials and Structures, 16, 91 (1983) 3-12.
32. Akman, M., S., Yapı Hasarları ve Onarım İlkeleri, Livane Matbaacılık, TMMOB, İstanbul, 2000.
33. Tun, A., Yol Malzemeleri ve Uygulamaları, Atlas Yayınları, İstanbul, 2001.
34. Bendaña, L., J., Ambrosino, J. ve Sargand, S., Evaluation of Rigid Pavement Rehabilitation Methods on I-86, 9th International Conference on Concrete Pavements, Ağustos 2008, San Francisco, California.
35. Transportation Research Board, 'Use of Accelerated Pavement Testing to Evaulate Maintenance and Pavement Preservation Treatments, 500 Fifth Street, Washington, 2009.
36. Trabzon Büyükşehir Belediyesi, Trabzon Büyükşehir Belediyesi Faaliyet Raporu, Trabzon, 2016.
37. Saeed, A. ve Hall, J., W., Accelerated Pavement Testing: Data Guidelines, NCHRP Report No: 512, Transportation Research Board, 2003.
38. Harrington, D. ve Fick, G., Beton Yol Kaplamaları Rehberi, evirmen:Akpınar M.,V., Amerika Beton Kaplama Birliği, Washington, 2014.
39. Shrive, N., G., Compression Testing and Cracking of Plain Concrete, Magazine of Concrete Research, 35, 122 (1983) 27-38.

40. Okamoto, P., A., Nussbaum, P., J., Smith, K., D., Darter, M., I., Wilson, T., P., Wu, C., L. ve Tayabji, S., D., Guidelines for Timing Contraction Joint Sawing and Earliest Loading for Concrete Pavements, Final Report, FHWA-RD-91-079, Federal Highway Administration, Washington, 1994.
41. Şengöz, B., Tanyel, S., Görkem, Ç. ve Kaçmaz, B., İzmir Şehir İçi Yollarının Kayma Dirençlerinin Trafik Güvenliği Açısından Değerlendirilmesi, DEÜ Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 12, 1 (2010) 75-85.
42. Seferoğlu, A., G., Çelik, M., Seferoğlu, M., T. ve Akpınar, M., V., Doğu Karadeniz Bölgesindeki Kırsal Yollarda Kullanılan Kaplama Tiplerinin Tercih Sebeplerinin Araştırılması: Trabzon-Rize Örneği, 7. Kentsel Altyapı Sempozyumu, Kasım 2015, Trabzon.
43. Bahadır, M. ve Özdemir, M., A., Trabzon ve Rize'de Yağışın Mevsimsel Değişimlerinin Marginal ve Matrix Yöntemleri ile Belirlenmesi ve Trend Analizleri, Uluslararası Sosyal Araştırma Dergisi, 4, 17 (2011).
44. Uzun, B. ve Yomralıoğlu, T., Doğu Karadeniz Bölgesinde Dağınık Yerleşim Sorunlarının Mülkiyet Açısından İrdelenmesi ve Kırsal Arazi Düzenleme Modeli, Doğu Karadeniz Bölgesi Kalkınma Sempozyumu, Ekim 2005, Trabzon.
45. İçişleri Bakanlığı, Özel İdareler, İllerin Köy Yolu Envanteri, <https://www.icisleri.gov.tr/illeridaresi/istatistiki-bilgiler1>, 31 Aralık, 2012.
46. Çelik, M., Seferoğlu, M., T., Seferoğlu, A., G. ve Akpınar, M., V., Sel/Su Baskını Afetlerinden Dolayı Oluşan Doğu Karadeniz Bölgesinde Sürdürülebilir Ulaşım Sağlanabilmesi İçin Problemlerin Araştırılması, Doğal Afet ve Afet Yönetimi Sempozyumu, 2016, Karabük, Türkiye.
47. Beak, J., Al-Qadi, I., L., ve Buttlar, W., G., Reflective Cracking Control, Illinois Bituminous Paving Conference, Ocak 2008, Illinois, USA.
48. ACI 325.13R-06, Concrete Overlays for Pavement Rehabilitation, American Concrete Institute, Farmington Hills, 2006.
49. Temren, Z., Asfalt Üstyapıların Sürdürülebilirliği, 2. Karayolları Ulusal Kongresi, Ekim 2011, Bildiriler Kitabı, 30-40.
50. Galehouse, L., Strategic Planning for Pavement Preventive Maintenance, Pavement Preservation Compendium 2, Federal Highway Administration, Washington, 2006.
51. Huang, Y., Evaluating Pavement Response and Performance with Different Simulative Tests, Virginia Polytechnic Institute and State University, Doktora Tezi, Blacksburg, Virginia, 2017.
52. Smith, K., Hoener, T. ve Peshkin, D., Concrete Pavement Preservation Workshop, Federal Highway Administration, Washington, 2008.

53. Gopal, S., Bituminous Overlay Strategies for Preventive Maintenance on Pennsylvania Interstate Roadways, B.E. Transportation Engineering, B.M.S. College of Engineering, VTU, Belgaum, Karnataka, India, 2006.
54. Darter, M., Barenberg, E. ve Yrjanson, W., Joint Repair Methods for Portland Cement Concrete Pavements, NCHRP Report 28, Transportation Research Board, Washington , 1985.
55. Snyder, M., B., Concrete Pavement Preservation: Tips and Techniques for Specialized Repair and Construction Methods, National Concrete Pavement Technology Center, Iowa State University, 2014.
56. ACPA, Concrete Crack and Partial-Depth Spall Repair Manuel, UFC 3-270-03, American Concrete Pavement Association, 2004.
57. Yu, T., Peshkin, D., Smith, K., Darter, M., Whiting, D., ve Delaney, H., Concrete Rehabilitation Users Manual, SHRP-C-412, Strategic Highway Research Program, Washington, 1994.
58. FHWA, Technical Guide Paper on Subsurface Pavement Drainage, Technical Paper 90-01, Federal Highway Administration, Washington, 1990.
59. Christopher, B., Maintenance of Highway Edge Drains, NCHRP Synthesis of Highway Practice 285, Transportation Research Board, Washington, 2000.
60. Bishoff, D. ve Toepel, A., Dowel Bar Retrofit-STH 13 Construction and One-Year Performance Report, W1-07-02, Wisconsin Department of Transportation, 2002.
61. Wen, H., Titi, H. ve Singh, J., Guidelines for the Surface Preparation/Rehabilitation of Existing Concrete and Asphaltic Pavements Prior to an Asphaltic Concrete Overlay, Report 0092-04-05, Wisconsin Highway Research Program, Madison WI. 2005.
62. Schutzbach, A., M., Crack and Seat Method of Pavement Rehabilitation, Transportation Research Record 1215, 1989.
63. Ceylan, H., Mathews, R., Kota, T., Goplalkrishnan, K. ve Coree B., Rehabilitaion of Concrete Pavements Utilizing Rubblzation and Crack-and-Seat Methods, Iowa Highway Research Board Report, No. TR-473, Center for Transportation Research and Education, Ames, 2005.
64. Bemanian, S. ve Sebaaly, P., Cost-effective Rehabilitation of Portland Cement Concrete Pavement in Nevada, Transportation Research Record, National Research Council, 1999.
65. Sebaaly, P. ve Tabatabaee, N., Effect of Tire Pressure and Type on Response of Flexible Pavement, Transportation Research Record 1227, Denmark, 1989.

66. Wu, R., Harvey, T., ve Signore, M., J., Cracking and Rutting Performance of Composite Pavements Under Testing with Heavy Vehicle Simulator, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Washington, 2001.
67. Travino, M., McCullough, B., F., Yıldırım, Y. ve Dossey, T., Decision True for Thin Asphalt Concrete Overlays on Continuously Reinforced Concrete Pavement, Center of Transportation Research, Texas, 2004.
68. Thogersen, F., Busch, C. ve Henrichsen, A., Mechanistic Design of Semi-rigid Pavements-An Incremental Approach, Report 138, Danish Road Institute, Hedenhusene, 2004.
69. Nokes, W. A., P. J. Stolarksi, C. L. Monismith, J. T. Harvey, C. Coetzee, and Rust F. C., Establishing the California Department of Transportation Accelerated Pavement Testing Program, In Transportation Research Record 1540, 91–96, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 1996.
70. Miller, J. ve Bellinger, W., Distress Identification Manual for the Long-Term Pavement Performance Program, Report No: FHWA-RD-03-031, Federal Highway Administration, 2003.
71. Ozer, H., Al-Qadi, L., I., Wang, H. ve Leng, Z., 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 (2011) 181-196.
72. Perez, S., A., Balay, J., M., Tamagny, P. ve Pelit, Ch., Accelerated Pavement Testing and Modelling of Reflective Cracking in Pavements, Engineering Failure Analysis, 14, 8 (2007) 1526-1537.
73. Zhou, F., Hu, S., ve Scullion, T., Integrated Asphalt (overlay) Mixture Design, Balancing Rutting and Cracking Requirements, Report No: FHWA/TX-06/0-5123-1, Texas Transportation Institut, College Station, Texas, 2006.
74. Blankenship, P., Iker, N. ve Drbohlav, J., Interlayer and Design Considerations to Retard Reflective Cracking, Journal of the Transportation Research Board, (2004) 177-186.
75. Makowski, L., Bischoff, D., Blankenship, P., Sobczak, D., ve Haulter, F., Wisconsin Experiences with Reflective Crack Relief Projects, The 84th Annual Meeting of the Transportation Research Board, January 2005, Proceedings.
76. Greene, J., Kim, S., Chun, S. ve Choubane, B., Effect of Asphalt Rubber Membrane Interlayer (ARMI) on stability Rutting and Reflection Cracking of Asphalt Mixture, FDOT Office, Florida, 2012.

77. Button, J., Overlay Construction and Performance Using Geotextiles, , 24-33, Transportation Research Record No. 1248, National Research Council, Washington D.C, 1989.
78. Maurer, D. ve Malasheskie, G., J., Field Performance of Fabrics and Fibers to Retard Reflective Cracking, Geotextiles and Geomembranes, 8, 3 (1989) 239-267.
79. Shuler, S., ve Harmelink, D., “Reducing Reflection Cracking in Asphalt Pavements”, 5th International RILEM Conference on Cracking in Pavements: Mitigation, Risk Assessment, and Prevention, Mayıs 2004, Colorado, Bildiriler Kitabı: 451-458.
80. Buttlar, W., Dempsey, B., ve Bozkurt D., Evaluation of Reflective Crack Control Policy, Report No. ITRC FR 95/96-4, Final Report, Illinois Department of Transportation, , Illinois, 1999.
81. Khasawneh, M., A., Using DARWin 3.1 in Undergraduate Pavement Design Courses, 120th Annual Conference & Exposition, Haziran 2013, Atlanta, Georgia, United States.
82. Walubita, L., F. ve van de Ven, M., F., C., Stresses and Strains in Asphalt-Surfacing Pavements, South African Transport Conference: Action in Transport for the New Millennium, Temmuz 2000, Güney Afrika, Bildiriler Kitabı: 214-223
83. Özcanan, S. ve Akpınar M.V., Esnek Üstyapılarda Kritik Tekerlek ve Aks Konfigürasyonların Mekanistik Analizlere Göre Tespit Edilmesi, İMO Teknik Dergi, (2014) 6625-6654.
84. Jaritngam, S., Prachasaree, W., Somchainuek, O., Thongchim, P., Yandell, W.O., ve Taneerananon, P., Analysis of Stress, Strain and Deflection of Pavements Using Finite Element Method, Journal of Society for Transportation and Traffic Studies, 4., (2010)
85. Killingsworth, B., Concrete Jointing and Details: Thickness is Only the Start, National Ready Mixed Concrete Association, USA.
86. Taylor, P., C., Kosmatka, S., H., Voigt, G., F., Ayers, M., E., Davis, A., Fick, G., J., Grove, J., Harrington, D., Kerkhoff, B., Ozyildirim, H., C., Shilstone, J., M., Smith, K., Tarr, S., M., Tennis, P., D., Van Dam, T., J. ve Waalkes, S., Integrated Materials and Construction Practices for Concrete Pavements: A State-of-the-Practice Manual, FHWA-HIF07-004, Federal Highway Administration, Washington, 2007.
87. Tunç, A., Kaplama Mühendisliği ve Uygulamaları, Asil Yayın Dağıtım, Ankara, 2004.
88. ACI 325.12R-02, Guide for Design of Jointed Concrete Pavements for Streets and Local Roads, American Concrete Institute, 2001.

89. Springenschmid, R., Reimer, B. ve Fleischer, W., Construction of Concrete Pavements in West Germany, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, (1988).
90. Colley, B., E., ve Humphrey, H., A., Aggregate Interlock at Joints in Concrete Pavements, Highway Research Record No. 189, Highway Research Board, National Research Council, Washington, 1967.
91. Bautista, F., E. ve Basheer, I., Jointed Plain Concrete Pavement (JPCP) Preservation and Rehabilitation Design Guide, California Department of Transportation Division of Design, California, USA, 2008.
92. ACPA, Design of Concrete Pavement for City Streets, American Concrete Pavement Association, Illinois, USA, 1992.
93. Federal Highway Administration, Concrete Pavement Rehabilitation,, Report No: FHWA-SA-97-103, U.S. Department of Transportation, Washington, USA, 1997.
94. Arnold, S., J., Load Transfer across Cracks and Joints in Concrete Slabs on Grade, Doktora Tezi, Loughborough University, England, 2004.
95. Frabizzio, M., A., ve Buch N., J., Performance of Transverse Cracking in Concrete Pavements, Journal of Performance of Constructed Facilities, 13, 4 (1999) 172-180.
96. Prozzi, J., DeBeer, M. ve Balmaceda, P., Non Destructive Tests Procedure for Field Evaluation of Transverse Joints in Concrete Pavements, 5th International Conference on Concrete Pavement Design and Rehabilitation, Nisan 1993, Purdue University, Indiana, Bildiriler Kitabı: 3-12.
97. Park, D., W., Prediction of Pavement Fatigue and Rutting Life Using Different Tire Types, KSCE Journal of Civil Engineering, 12 (2008) 297-303.
98. Gary, B., E. ve Martin, G., E, Resurfacing with Bituminous Types of Surface, Highway Research Board Proceedings, 12 (1933) 177-192.
99. Williams, R., C. ve Li, X., Reflective Cracking Moving HMA from a Maintenance Treatment to a Rehabilitation Alternative, Lecture Notes Presentation, Iowa State University, Iowa, 2007.
100. Wolfe, W., Butalia, S., T. ve Walker, H., Full-Dept Reclamation of Asphalt Pavements Using Lime-Activated Class F Fly Ash:Structural Monitoring Aspects, World of Coal Ash Conference, Mayıs 2009, Lexington, USA.
101. Shippen, N., Measuring the Strain Of The Road, Research Notes Oregon, 2005.
102. Baek, J., Modeling Reflective Cracking Development in Hot-Mix Asphalt Overlays and Quantification of Control Techniques, Doktora Tezi, Illinois Üniversitesi, Urbana, Illinois, 2010.

103. Wei, Y., Gao, X., ve Zhang, Q., Evaluating Performance of Concrete Pavement Joint Repair Using Different Materials to Reduce Reflective Cracking in Asphalt Concrete Overlay, Road Materials and Pavement Design, 15, 4 (2014) 966-976.
104. Al-Qadi, I. ve Baek, J., FE Modelling of Reflective Cracking Initiation and Propagation: Investigation of the Effect of Steel Reinforcement Interlayer on Retarding Reflective Cracking in HMA Overlay, Journal of the Transportation Research Board, Washington DC., (2006) 32-42.
105. Yin, H., Full-Scale Test of Thermally Induced Reflective Cracking in Airport Pavements, Road Materials and Pavement Design, 16, 1 (2015) 119-132.
106. Hu, S., Zhou, F., ve Scullion, T., Reflection Cracking-Based Asphalt Overlay Thickness Design and Analysis Tool, Journal of the Transportation Research Board, 1 (2010) 12-23.
107. Nunn, M., Investigation of Reflection Cracking in Composite Pavements in The United Kingdom, International RILEM Conference on Reflective Cracking in Pavements, Assessment and Control, May 1989, Liege, Belgium.
108. Jayawickrama, P.,W. ve Lytton, R., L., Methodology for Predicting Asphalt Concrete Overlay Life Against Reflection Cracking, International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements, 1 (1987) 912-924.
109. Kutluhan, S., Bitümlü Sıcak Karışımlarda Tekerlek İzi Oluşumunun Modellenmesi, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2008.
110. Hadley, W., O., SHRP-LTTP Data Analysis Studies: Five-Year Report, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, USA. 1994.
111. Kerboua M., Megnounif. A, Benguediab. M, Benrahou. K.,H. ve Kaoulala. F., Bituminous Materials with a High Resistance To Flow Rutting, American Journal of Civil Engineering and Architecture, 1, 2014
112. Sağlık, A. ve Güngör, A., G., Karayolları Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı, Üstyapı Şubesi Müdürlüğü, Ankara, 2008.
113. Steyn, W., J., Significant Findings From Full-Scale Accelerated Pavement Testing, NCHRP Synthesis 433, Transportation Research Board, Washington, 2012.
114. Kırbaş, U. ve Gürsoy, M., Üstyapı Yönetim Sistemlerinde Kullanılan Veri Türlerinin Sınıflandırma Yöntemleri, 7. Ulusal Ulaştırma Kongresi, Eylül 2007, İstanbul, Bildiriler Kitabı, 364-373.
115. Hugo, F. ve Martin, A., E., Synthesis of Highway Practice 325: Significant Findings from Full-Scale Accelerated Pavement Testing, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, 2004.

116. FHWA, Long-Term Pavement Performance Program-Accomplishments and Benefits 1989-2009, Summary Report, FHWA-HRT-10-072, US. Department of Transportation, 2010.
117. Menendez, R., Application of the Long Term Pavement Performance LTPP Data Base, Global Approaches on Sustainable Pavements, Ağustos 2017, Cancún, Meksika.
118. Steyn, W., J. ve Hugo, F., Perspectives on Trends in International APT Research, In The Roles of Accelerated Pavement Testing in Pavement Sustainability, Springer International Publishing, 2016.
119. Metcalf, J., B., The Application of Full Scale Accelerated Pavement Testing, NCHRP Synthesis 235, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, 1996.
120. Jameson, G., W., Sharp, K., G., ve Vertessy, N., J., Full-depth Asphalt Pavement Fatigue Under Accelerated Loading: The Mulgrave (Victoria) ALF Trial, 1989/1991, Australian Road Research Board, Washington, 1992.
121. McCullough, B., F., Dossey, T. ve Cho, Y., H., Case Study of Overlay Performance on Rigid Pavement in Bowie County, Transportation Research Record, National Research Council, Texas, 1996.
122. Wolters, A., Hoerner, T., ve Smith, K., Evaluation of HMA Overlays in Illinois, Report No. 08-021, Illinois Center for Transportation Springfield IL, 2008.
123. Romanoschi, S., A., Metcalf, J., B., Li, Y., ve Rasoulia, M., Assessment of Pavement Life at the First Full-scale Accelerated Pavement Test in Louisiana, Paper presented at the 1998 TRB Annual Meeting, Transportation Research Board, Washington, 1998.
124. Li, Y., Metcalf, J., B., Romanoschi, S., A. ve Rasoulia, M., Soil-Cement Base Pavements under Accelerated Loading, 1999 TRB Annual Meeting, Transportation Research Board, Washington, 1999.
125. King, W., M., Gillespie, K. ve Crosby, G., Construction and Comparison of Louisiana's Conventional and Alternative Base Courses under Accelerated Loading, LTRC Report 93-1ALF, Louisiana Transportation Research Center, Baton Rouge, 1997.
126. Athar, S. ve Hall, J., W., Accelerated Pavement Testing: Data Guidelines, Transportation Research Board, Washington, 2003.
127. <https://sites.google.com/site/afd40web/home> Full Scale/Accelerated Pavement Testing (AFD40). 11 Aralık 2018.

128. Harvey, J., T., Louw, P., Long, F., Deacon, J., A., Guada, I., Hung, D. ve Scheffy, C., CAL/APT Program: Test Results from Accelerated Pavement Test on Pavement Structure Containing Asphalt Treated Permeable Base (Atpb) Section 500rf, California Department of Transportation Report, California, 1997.
129. Kohler, E. ve Roesler, J., Accelerated Pavement Testing of Extended Life Continuously Reinforced Concrete Pavement Sections, Project IHR-R32, Illinois Cooperative Highway Research Program, Illinois, 2006.
130. <http://www.erc.usace.army.mil/Media/Fact-Sheets/Fact-Sheet-Article-View/Article/476780/> Pavement Testing Facility. 11 Aralık 2018.
131. https://www.ltrc.lsu.edu/research_alf.html Louisiana Transportation Research Center. 12 Aralık 2018.
132. <http://www.dot.state.mn.us/mnroad/index.html> Minnesota's Cold Weather Pavement Testing Facility. 30 Aralık 2018.
133. Hadi, M. ve Prekoi, K., Thickness Evaluation of Asphalt and Base Layers of Some Major and Minor Arterial Roads in Kumasi Using Ground Penetrating Radar, International Journal of Scientific & Engineering Research, 4, 3 (2013) 1-9.
134. Johsi, S. ve Harle, S., M., Linear Variable Differential Transducer (LVDT) & Its Applications in Civil Engineering, International Journal of Transportation Engineering and Technology, 3, 4 (2017) 62-66.
135. Sarı, A., Dursun, B. ve Gökozan, H., Strain Gaugeler ve Uygulamaları, Celal Bayar Üniversitesi, Manisa, 2015.
136. Gül, S. ve Başeri, D., Strain Gaugelerin İncelenmesi, Bitirme Tezi, Marmara Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, İstanbul, 2000.
137. Sandalcı, T., Ölçüm Aletleri Ders Notu, Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul, 2018.
138. Timm, D., H, Priest, A. ve McEwen, L., Design and Instrumentation of The Structural Pavement Experiment at The NCAT Test Track, National Center for Asphalt Technology, Auburn University, Alabama, USA, 2004.
139. Baker, H., B., Buth, M., R. ve Van Deusen, D., A., Minnesota Road Research Project: Load Response Instrumentation Installation and Testing Procedures, MN/PR-94/01, Minnesota Road Research Project, Minnesota, 1994.
140. Van Til, C., J., McCullough, B., A. ve Varga, B., A., Evaluation of AASHTO Interim Guide for Design of Pavement Structures, NCHRP Report 128, California, 1972.
141. Evensen, R., Axle loads; Equivale Axles or Load Spectrum?, Joint Nordic/Baltic Symposium on Pavement Design and Performance Indicators, Şubat 2008, Oslo.

142. Bakış, A., Esnek ve Rijit Üstyapılarda Kaplama Kalınlığı ve Üstyapı Maliyetinin En Küçük Kareler Yöntemiyle Hesaplanması, Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi, 10, 2 (2018).
143. Kawa, I., Zhang, Z., ve Hudson, W., R., Evaluation of the Aashto 18-KIP Load Equivalency Concept, Report No: FHWA/TX-05/0-1713-1, Center for Transportation Research, Texas, ABD, 1998.
144. Moreno, A., M., Load Equivalency Factors from The Structural Response of Flexible Pavements, Yüksek Lisans Tezi, Minnessota Üniversitesi, 2000.
145. American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, Washington, 1993.
146. Rys, D., Judycki, J. ve Jaskula, P., Determination of Vehicles Load Equivalency Factors for Polish Catalogue of Typical Flexible and Semi-Rigid Pavement Structures, Transportation Research Procedia, 14, (2016) 2382-2391.
147. Babashamsi, P., Yusoff, N., Ceylan, H., Nor, N. ve Jenatabadid, S., H., Evaluation of Pavement Life Cycle Cost Analysis: Review and Analysis, International Journal of Pavement Research and Technology, 9, (2016).
148. Behiry, A., E., A., E., M., Fatigue and Rutting Lives in Flexible Pavement, Ain Shams Engineering Journal, 3, (2012) 367-374.
149. Asphalt Institute, Research and Development of the Asphalt Institute's Thickness Design Manual, Research Report 82-2, the Asphalt Institute, 1982.
150. Finn, F., Saraf, C., L., Kulkarni, R., Nair, K., Smith, W., ve Abdullah, A., Development of Pavement Structural Subsystems., NCHRP Rep. 291, Transportation Research Board, Washington, 1986.
151. Mathew, T., V. ve Rao, K., V., K., IRC Method of Design of Flexible Pavements, Introduction to Transportation Engineering, NPTEL, 2007.
152. Clarkson, H., Oglesby, R. ve Hicks, G., Highway Engineering, John Wiley & Sons, New York, 1982.
153. Parry, A., R., Phillips, S., Potter, J., F., ve Nunn, M., E. U.K. Design of Flexible Composite Pavements, 8th International Conference on Asphalt Pavements, Ağustos 1997, Seattle, Washington.
154. Merrill, D., Dommelen, A., V. ve Gaspar, L., a Review of Practical Experience Throughout Europe on Deterioration in Fully-Flexible and Semi-Rigid Long-Life Pavements, International Journal of Pavement Engineering, 7, 2 (2006).

155. Xiaoping, J., Zhang, N., Niu, S., Meng, S. ve Xu, Q., Development of a Rutting Prediction Model for Asphalt Pavements with the Use of an Accelerated Loading Facility, Road Materials and Pavement Design, 17, 1 (2016).
156. Finn, F., Saraf, C., Kulkarni, R., Nair, K., Smith, W. ve Abdullah, A. The use of Distress Prediction Subsystems for the Design of Pavement Structures, 4th International Conference on The Structural Design of Asphalt Pavements, 1977, Ann Arbor, MI, USA.
157. Zhang, D., L. ve Li, J., Prediction of Rutting in Asphalt Pavement, China Journal of Highway and Transport, 8, 1 (1995) 23-29.
158. Zheng, N., X., Niu, S., S. ve Xu, X., Q., Temperature, Axle Load and Load Frequency Model of Rutting Prediction of Heavy-duty Asphalt Pavement, China Journal of Highway and Transport, 22, 3 (2009) 7-13.
159. Wijeratne, A. ve Sargious, M., Prediction of Rutting in Virgin and Recycled Asphalt Mixtures for Pavement Using Triaxial Tests, Association of Asphalt Paving Technologists Proceedings, Association of Asphalt Paving Technologists, 56, (1987) 111-129.
160. Bendaña, L., J., Ambrosino, J. ve Sargand, S., Evaluation of Rigid Pavement Rehabilitation Methods on I-86, 9th International Conference on Concrete Pavements, Augustos 2008, San Francisco, California.
161. Chao, W. ve McCullough, B., F., Development of Load Transfer Coefficients for Use with the AASHTO Guide for Design of Rigid Pavements Based on Field Measurements, Research Project 1169-3, Center for Transportation Research, 1992.
162. Bennert, T., Worden, M. ve Turo, M., Field and Laboratory Forensic Analysis of Reflective Cracking on Massachusetts Interstate 495, Transportation Research Record Journal, 2126 (2009) 27-38.
163. Yoder, E. ve Witczak, M., Principles of Pavement Design, John Wiley and Sons, 1975.
164. Zhou, F. ve Sun, L., Reflection Cracking in Asphalt Overlay on Existing PCC, 9th International Conference on Asphalt Pavements, Augustos 2002, Copenhagen.
165. Zhou, F., ve Sun, L., Overlay Tester: a Rapid Performance Related Crack Resistance Test, Texas Transportation Institute, The Texas A&M University System, USA, 2005.
166. Gaarkeuken, G., Scarpas, A., ve Boundt, A., H., Causes and consequences of secondary cracking, Report 7-96-203-23, Road and Railway Research Laboratory, Delft University of Technology, 1996.

167. Ağcakoca, E., I-Kesitli Çelik-Betonarme Kompozit Kirişlerin Hm-Cfrp ile Onarım ve Güçlendirilmesine Yönelik Metot Geliştirilmesi, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2012.
168. Arıkan, M. ve Sahir, A., Sonlu Elemanlar Metodunun Mühendislikte Uygulamaları, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Ders Notları, 2010.
169. Tirupathi, R., C. ve Ashok, D., B., Introduction to Finite Elements in Engineering, Prentice-Hall, Inc., 1991.
170. Reddy, J., N., An Introduction to the Finite Element Method, McGraw-Hill, Inc, 1993.
171. Ergin, A., Bayraktarkatal, E. ve Ünsan, Y., Sonlu Elemanlar Metodu ve Gemi İnşaatı Sektöründeki Uygulamaları, Seminer Kitabı, İTÜ, 2010.
172. Sadeghi, V. ve Hesami, S., Investigation of Load Transfer Efficiency in Jointed Plain Concrete Pavements (JPCP) Using FEM, International Journal of Pavement Research and Technology, (2018) 245-252.
173. Al-Jumaili, M., A., H., Finite Element Modelling of Asphalt Concrete Pavement Reinforced with Geogrid by Using 3-D Plaxis Software, International Journal of Materials Chemistry and Physics, 2, 2 (2016) 62-70.
174. Sousa, J., B. ve Pais, J., C., Mechanistic Empirical Overlay Design Method for Reflective Cracking, Transportation Research Record No. 1809, Design and Rehabilitation of Pavements, Washington, 2002.
175. Shalaby, A., Halim, A., O. ve Easa, S., M., Low-Temperature Stresses and Fracture Analysis of Asphalt Overlays, Transportation Research Record, 1996.
176. Akpınar, M., V., Hızlandırılmış Yol Testi, THBB, 97, (2010) 63-65.
177. Elseifi, M., A., Louay, N., M., William, B., K., Jr. ve Zhang, Z., Assessment of Stress and Strain Instrumentation in Accelerated-Pavement Testing, International Journal of Pavement Research and Technology, 5, 2 (202) 121-127.
178. Gokhale, S., Byron, T., Choubone, B. ve Iyer, S., Evaluation of Pavement Strain Gauge Repeatability Under Accelerated Pavement Testing, Report Number FL/DOT/SMO/08-521, FDOT, State Materials Office, 2008.
179. ABAQUS/CAE v6.12 Programme, Dassault Systemes Simulia Corp. Providence, RI, USA, 2017.
180. Hüsem, M. ve Coşğun, S.,İ., Behavior of Reinforced Concrete Plates Under Impact Loading: Different Support Conditions and Sizes, Computers and Concrete, 18(3), 389-404, 2016

181. Wayessa, G.,S., Quezon E., Kumela T., Analysis of Stress- Strain and Deflection of Flexible Pavements Using Finite Element Method Case Study on Bako-Nekemte Road, Journal of Civil, Construction and Environmental Engineering, 2,4 (2017) 100-101.
182. ABAQUS/Standard User's Manual, Version 6.9. Hibbitt, Karlson & Sorensen, Inc, Pawtucket, RI, 2008.
183. Gevrek, L., Yol Katmanlarında Meydana Gelen Gerilme Dağılımının Ansys Bilgisayar Programı ile Nonlinear Sonlu Eleman Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Kocatepe Üniversitesi, Afyon, 2008
184. T.C. Bayındırlık ve İskân Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü, Karayolu Teknik Şartnamesi 2006, Yayın No: 267, Karayolları Genel Müdürlüğü Matbaası, Ankara, 2006.
185. Brosseaud, Y., Delorme, J.L., and Hiernaux, R., Use of LPC Wheel-Tracking Rutting Tester to Select Asphalt Pavement Resistant to Rutting, Transportation Research Record, 1384, 59-68, 1993.
186. Kutluhan, S., Ağar, E., Bitümlü Sıcak Karışımlarda Tekerlek İzi Oluşumunu Etkileyen Faktörler ve Azaltmaya Yönelik Öneriler, İtü Dergisi, 8, 6, 179-191, 2009.
187. Witczack, M.W. ve El-Basyouny, M.M., Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures, Final Document, Appendix GG-1: Calibration of Permanent Deformation Models for Flexible Pavements, Prepared for NCHRP, Submitted by ARA Inc. ERES Division, Champaign, Illinois, USA, 2004.

6. EKLER

Ek 1. Trabzon Büyükşehir Belediyesinden gelen asfalt karışımın özellikleri



TRABZON BÜYÜKŞEHİR BELEDİYESİ

BETON ASFALT ŞANTİYESİ
BİTÜMLÜ KARIŞIMDA BİTÜM MİKTARI TAYİNİ

NUMUNE CİNSİ : AŞINMA
NAKLEDİLEN YER : KTÜ HYT TESİSİ

TARİH 20.04.2018

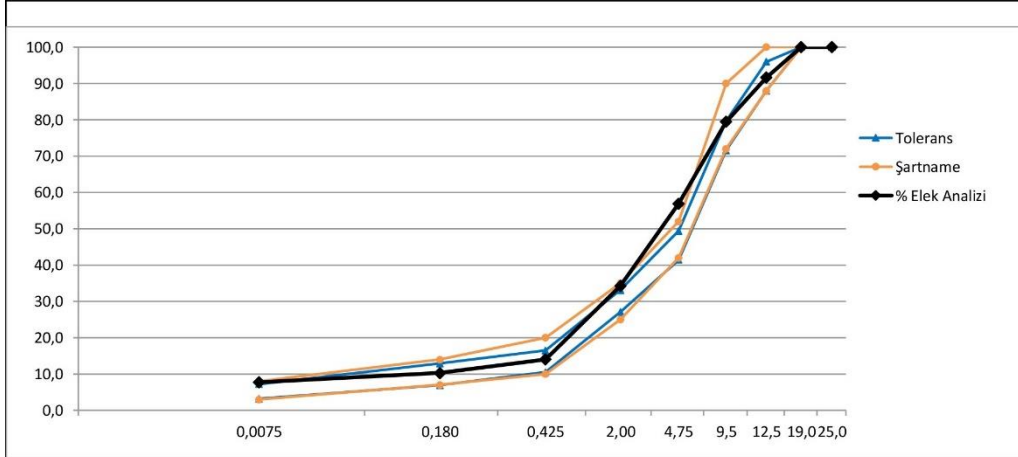
| A | Süzgeç Kağıdı gr. | 29,8 |
|-----------|--|--------|
| B | Süzgeç Kağıdı gr.+ Çanak gr. | 2480,2 |
| C | Süzgeç Kağıdı gr.+ Çanak gr.+ Bitümlü Numune Ağırlığı gr. | 4172,3 |
| D | Süzgeç Kağıdı gr.+ Çanak gr.+ Bitümü alınmış Numune Ağırlığı gr. | 4084,3 |
| E | Bitümlü numune ağırlığı gr. | 1692,1 |
| F | Bitümü alınmış numune ağırlığı gr.(Agrega) | 1604,1 |
| G | Filler Kaybına göre (0.002) düzeltilmiş numune ağırlığı | 1607,3 |
| H | Bitüm miktarı gr. | 84,8 |
| E-G/E.100 | Yüzde bitüm | 5,01 |
| E-G/G.100 | Yüzde bitüm (kuru mıcra göre) | 5,28 |

BİTÜM PENETRASYONU : 50-70
ASFALT KARIŞIMIN SICAKLIĞI : 163 C

| ELEK BOYUTLARI | EKSTRAKTÖR ANALİZ SONUÇLARI | | | İŞYERİ KARIŞIM GRADASYONU | KARAYOLLARI TEKNİK ŞARTNAMESİ AŞINMA TIP-1 LİMİTLERİ | | | |
|------------------|------------------------------------|-----------------------------------|--------------------|---------------------------|--|-------|----------|-------|
| | Her elek üzerinde toplu kalan (gr) | Her elek üzerinde toplu kalan (%) | Toplu geçenin % si | | TOLERANS | | ŞARTNAME | |
| | | | | | | | | |
| 1" (25.0mm) | | 0,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| 3/4" (19.0mm) | 0,0 | 0,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| 1/2" (12.5mm) | 135,0 | 8,4 | 91,6 | 92,0 | 88,0 | 96,0 | 83,0 | 100,0 |
| 3/8" (9.5mm) | 330,0 | 20,5 | 79,5 | 75,6 | 71,6 | 79,6 | 70,0 | 90,0 |
| No:4 (4.75mm) | 693,0 | 43,1 | 56,9 | 45,4 | 41,4 | 49,4 | 40,0 | 55,0 |
| No:10 (2.00mm) | 1057,0 | 65,8 | 34,2 | 30,1 | 27,1 | 33,1 | 25,0 | 38,0 |
| No:40 (0.425mm) | 1382,0 | 86,0 | 14,0 | 13,5 | 10,5 | 16,5 | 10,0 | 20,0 |
| No:80 (0.180mm) | 1442,0 | 89,7 | 10,3 | 9,9 | 6,9 | 12,9 | 6,0 | 15,0 |
| No:200 (0.075mm) | 1483,0 | 92,3 | 7,7 | 5,2 | 3,2 | 7,2 | 4,0 | 10,0 |

0
RUTUBETİ GİDERİLMİŞ NUMUNE AĞIRLIĞI : 1607,3 gr

0
NUMUNENİN ALINDIĞI YER : PLENT

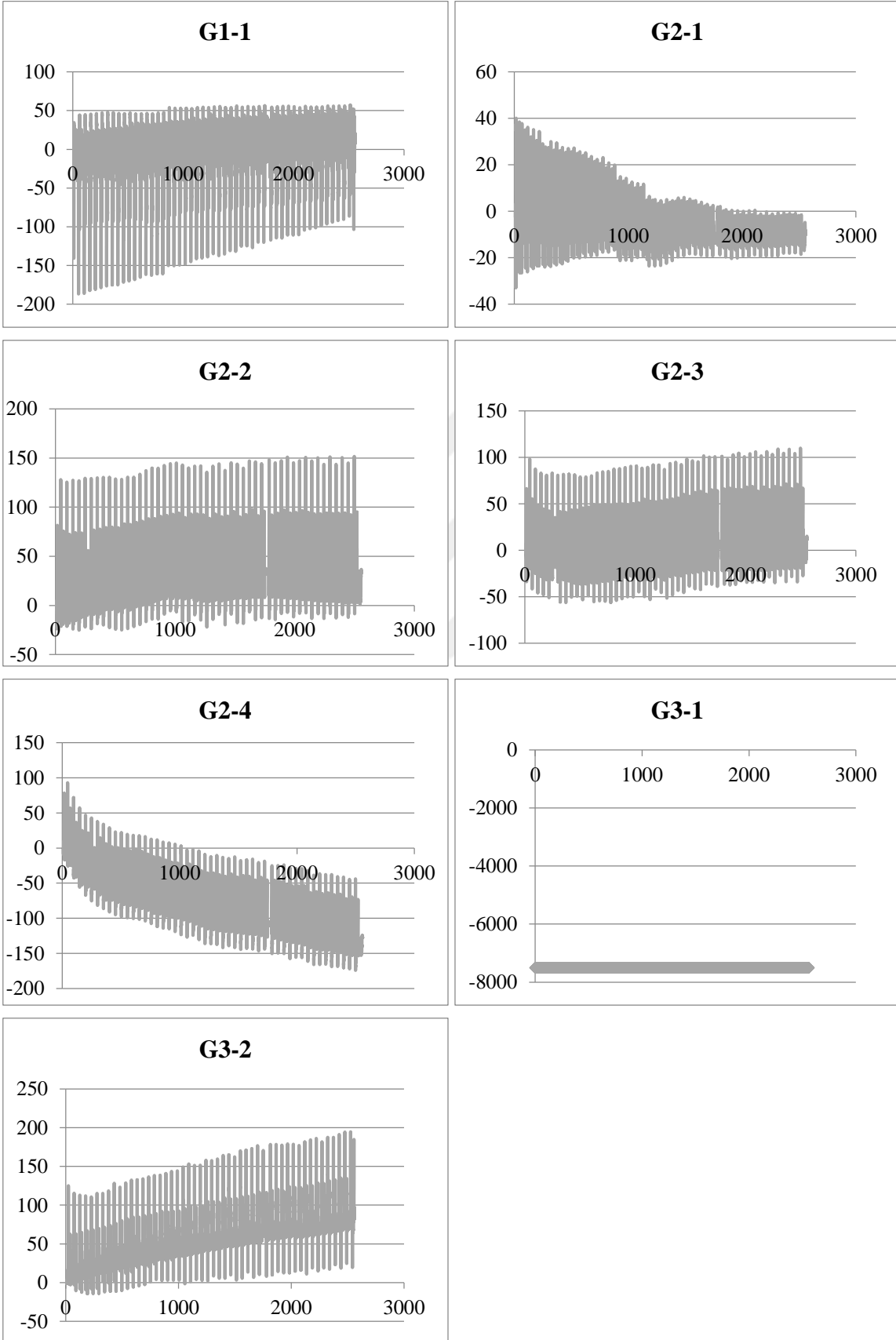


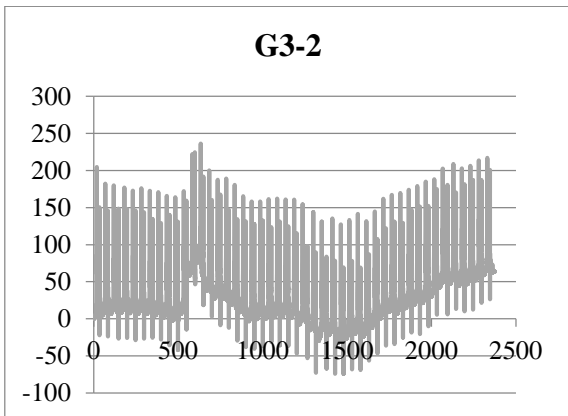
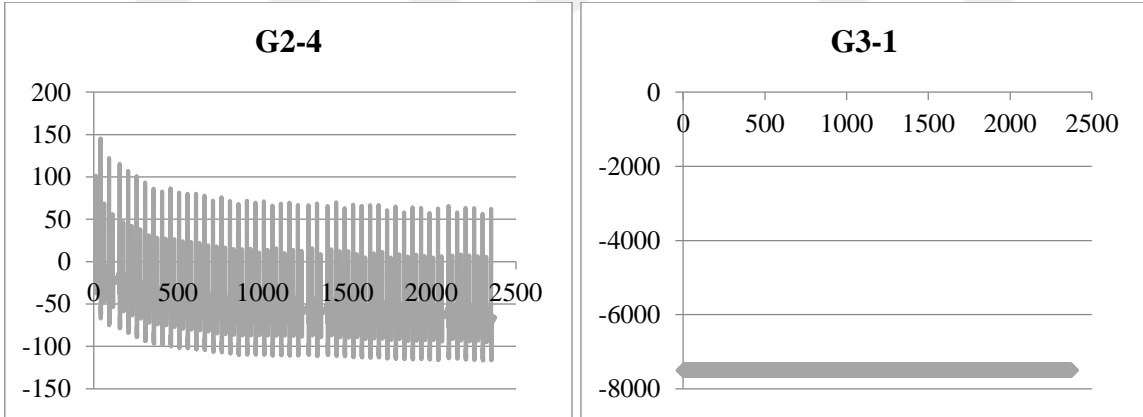
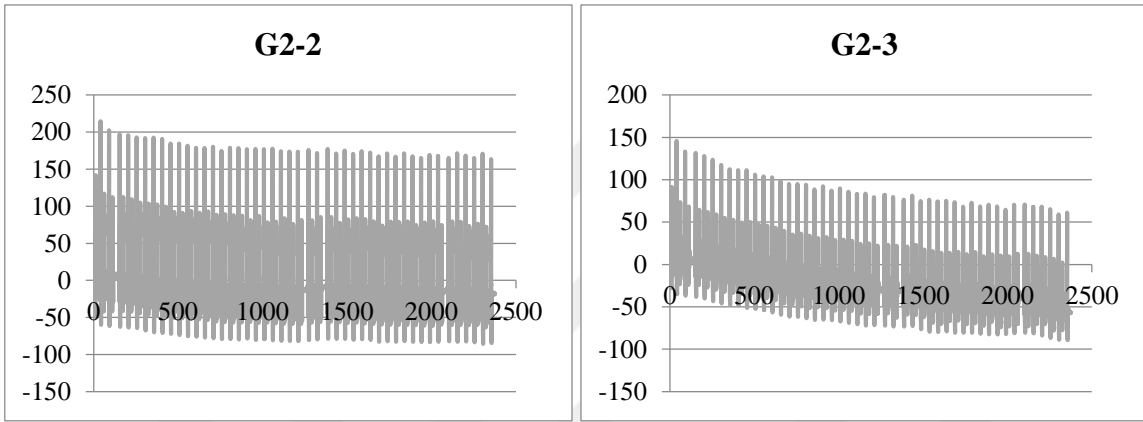
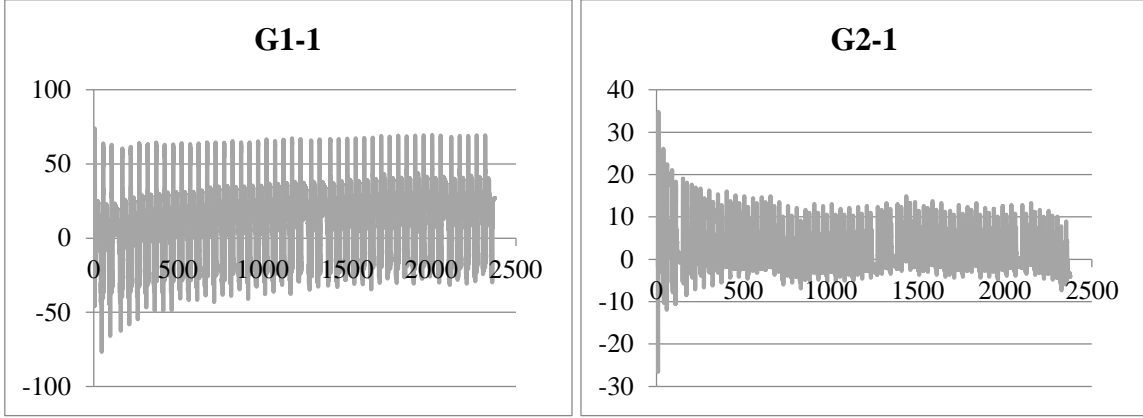
Laboratuvar Tek.
Kemal YILMAZ

Tesisler Şube Müdürü
Hasan KAMACI

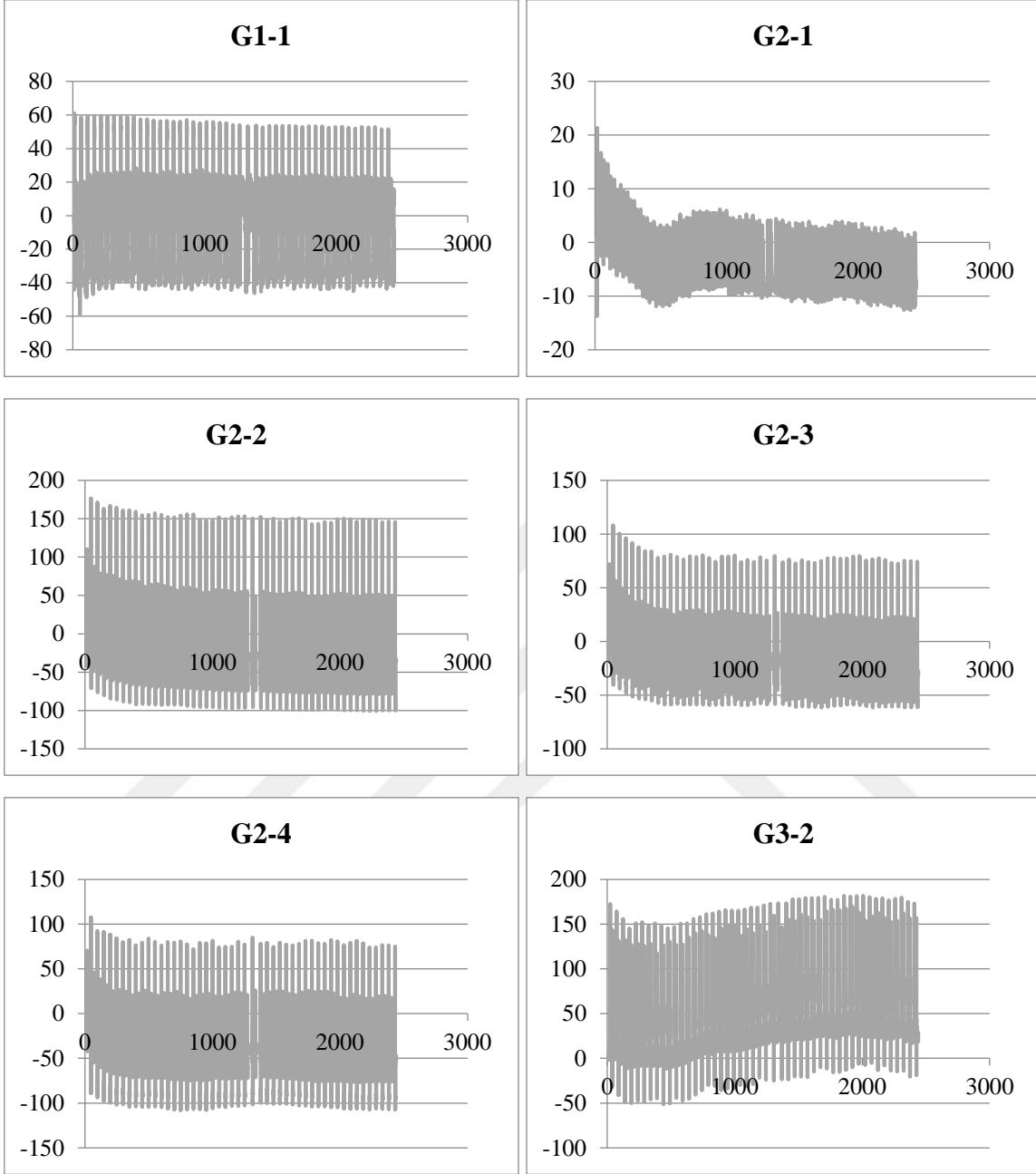
Ek 2. Asfalt alt yüzeyinde oluşan gerinim değerlerinin elde edildiği grafikler

Güney Tarafı Gerinim Ölçümleri (0-20 Geçiş)-Yatay eksen (sn), Dikey Eksen ($\epsilon \cdot 10^{-6}$)

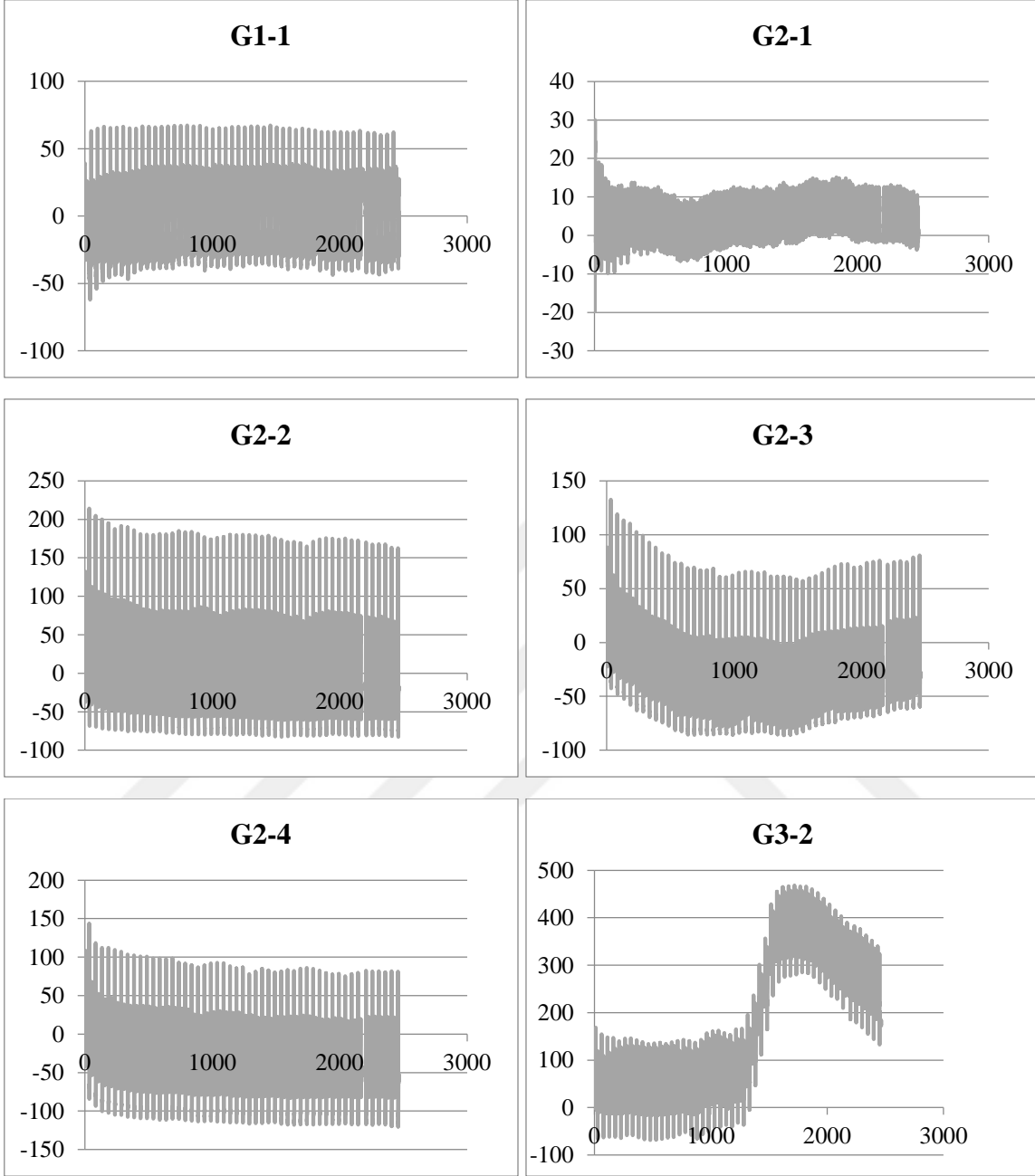


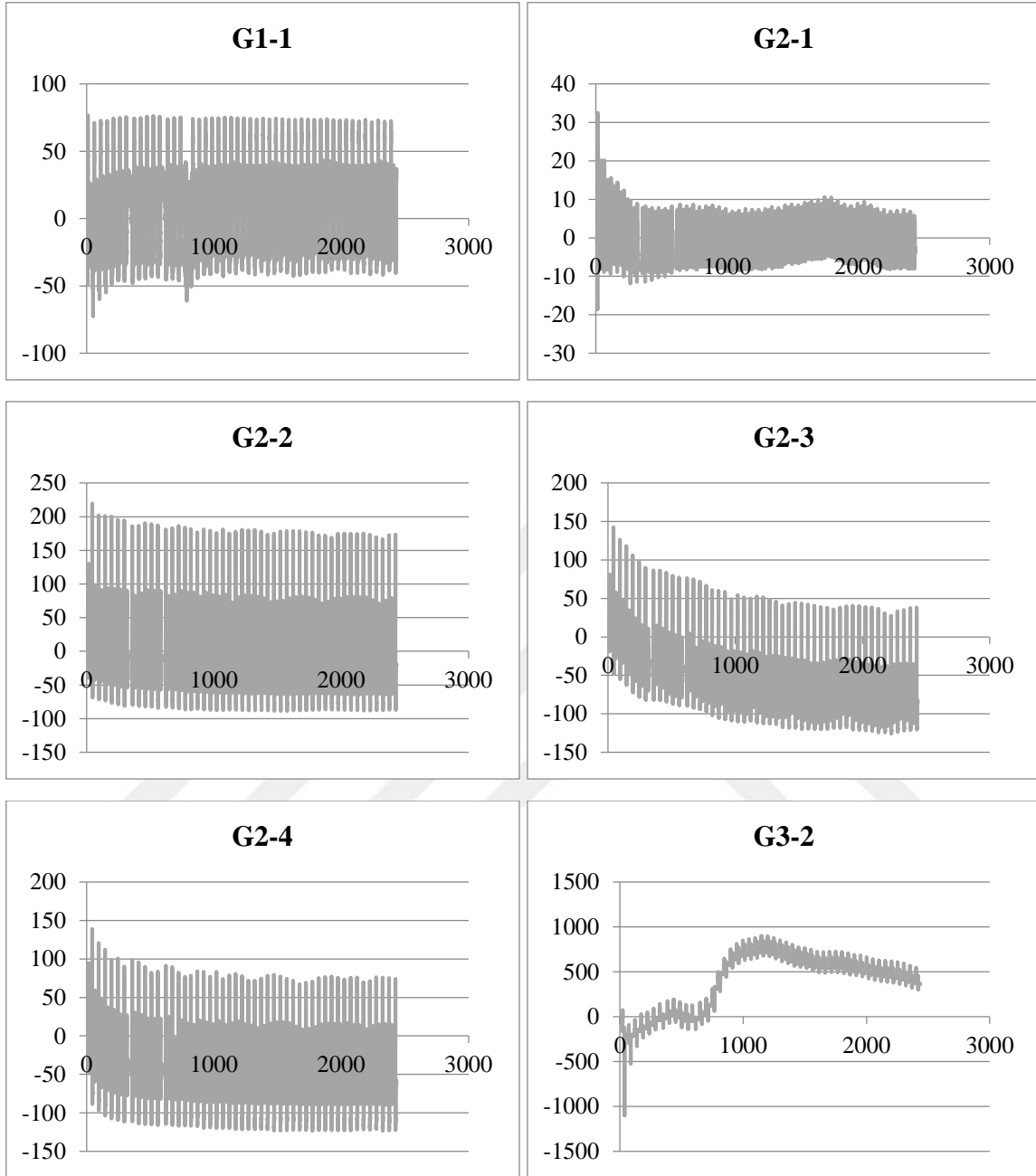
Güney Tarafı Gerinim Ölçümleri (6000 Geçiş)-Yatay eksen (sn), Dikey Eksen ($\epsilon \cdot 10^{-6}$)

Güney Tarafı Gerinim Ölçümleri (7000 Geçiş)-Yatay eksen (sn), Dikey Eksen ($\epsilon \cdot 10^{-6}$)

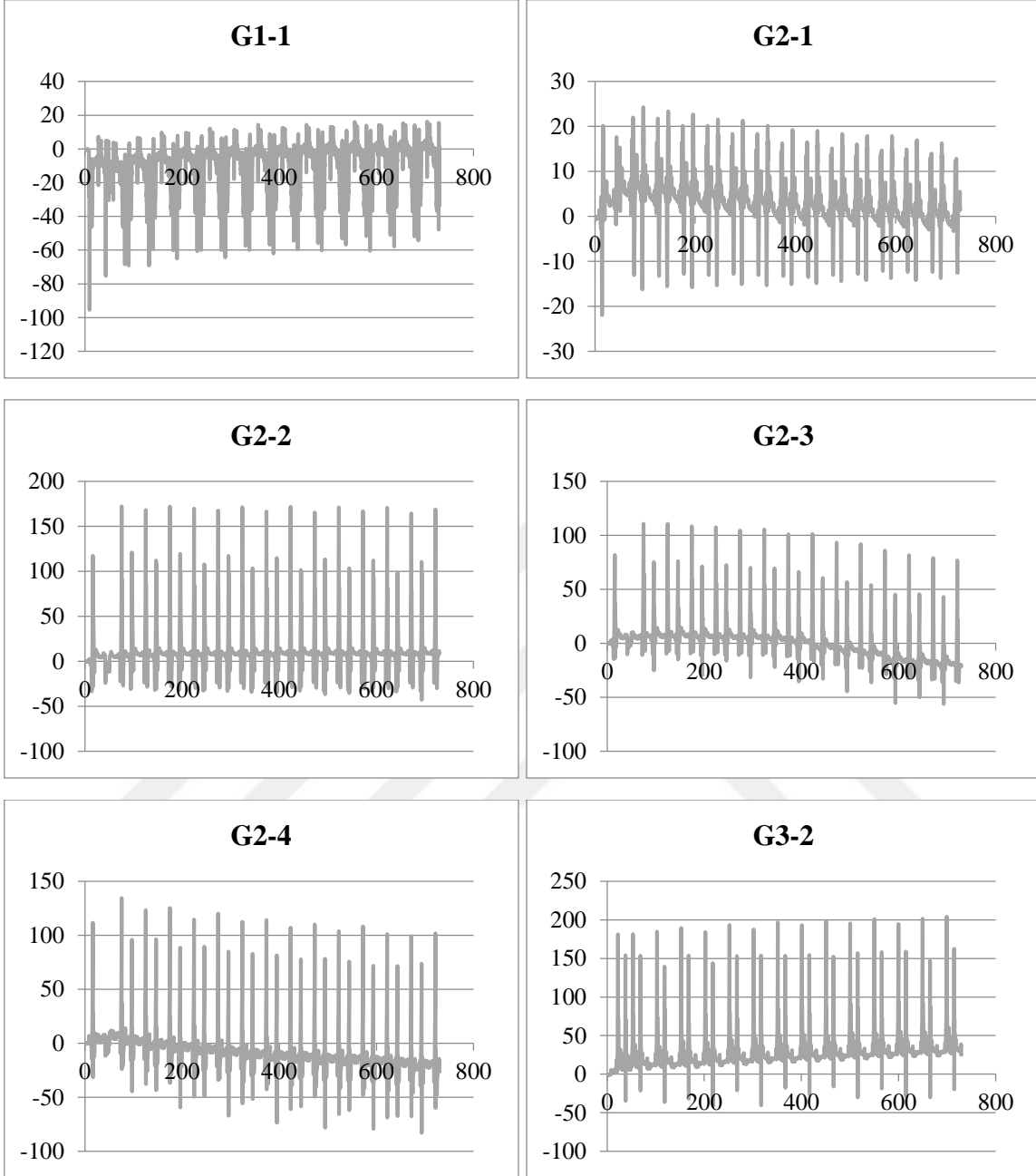


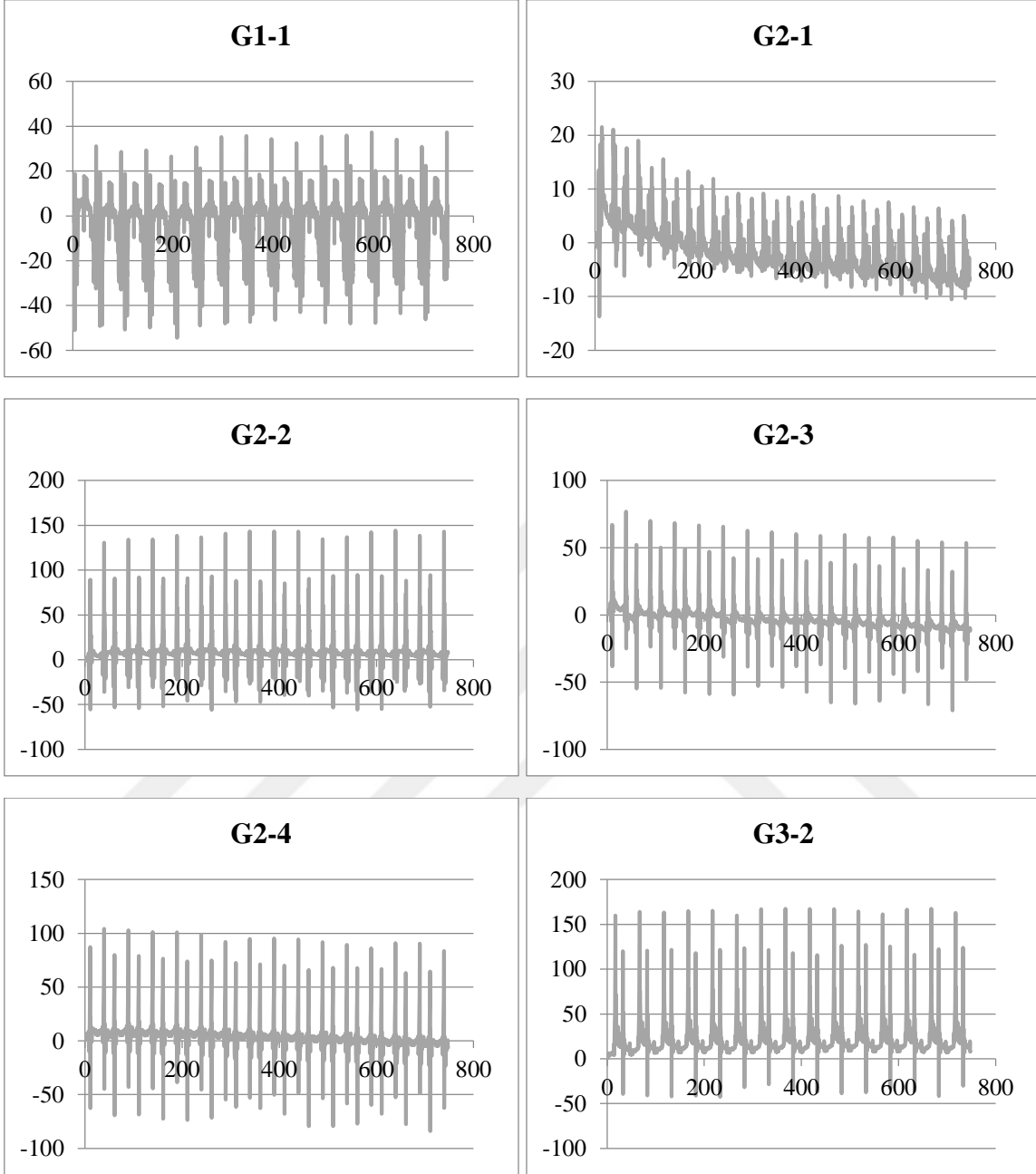
Güney Tarafı Gerinim Ölçümleri (8500 Geçiş)-Yatay eksen (sn), Dikey Eksen ($\epsilon \cdot 10^{-6}$)

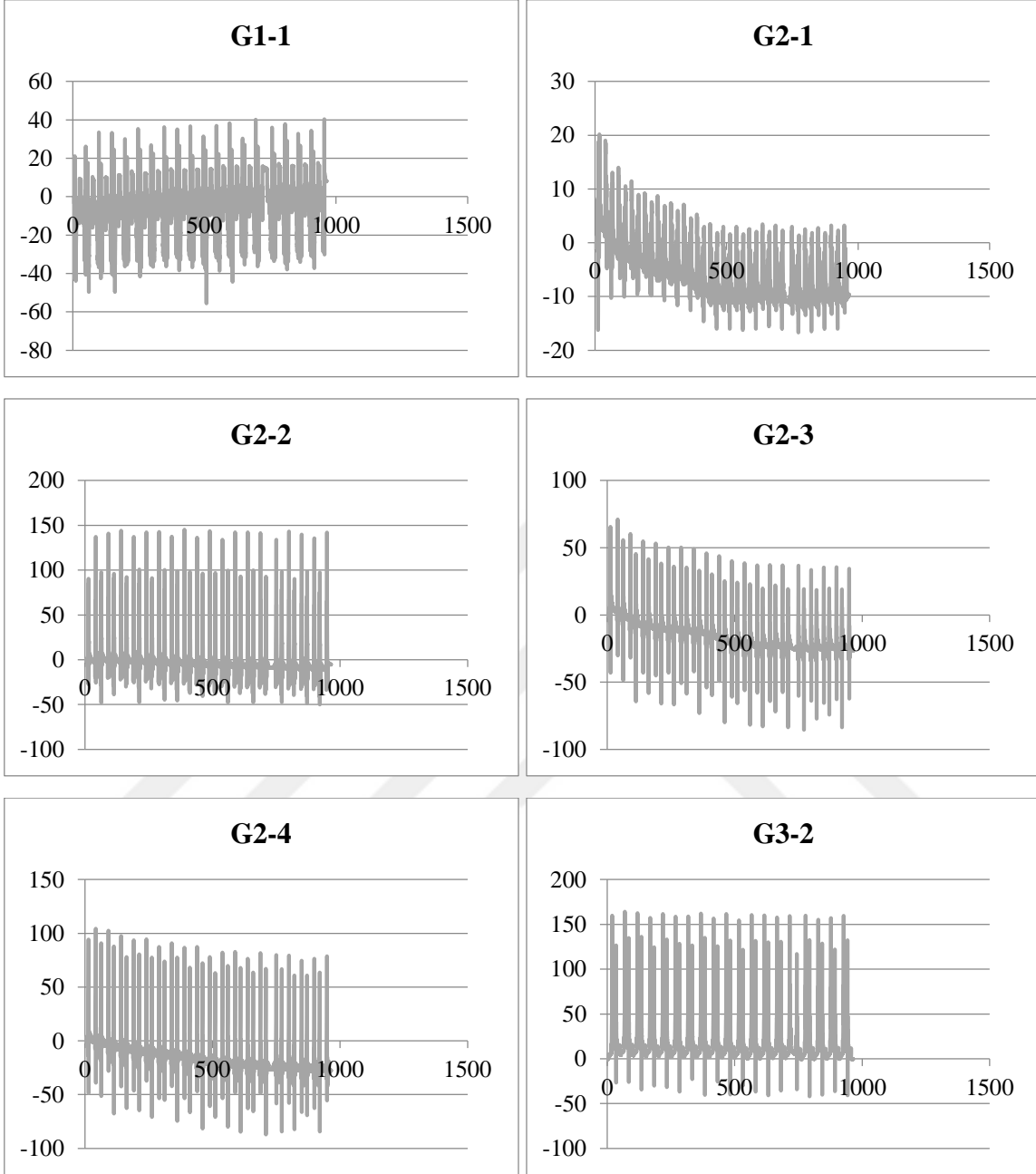


Güney Tarafı Gerinim Ölçümleri (11500 Geçiş)-Yatay eksen (sn), Dikey Eksen ($\epsilon \cdot 10^{-6}$)

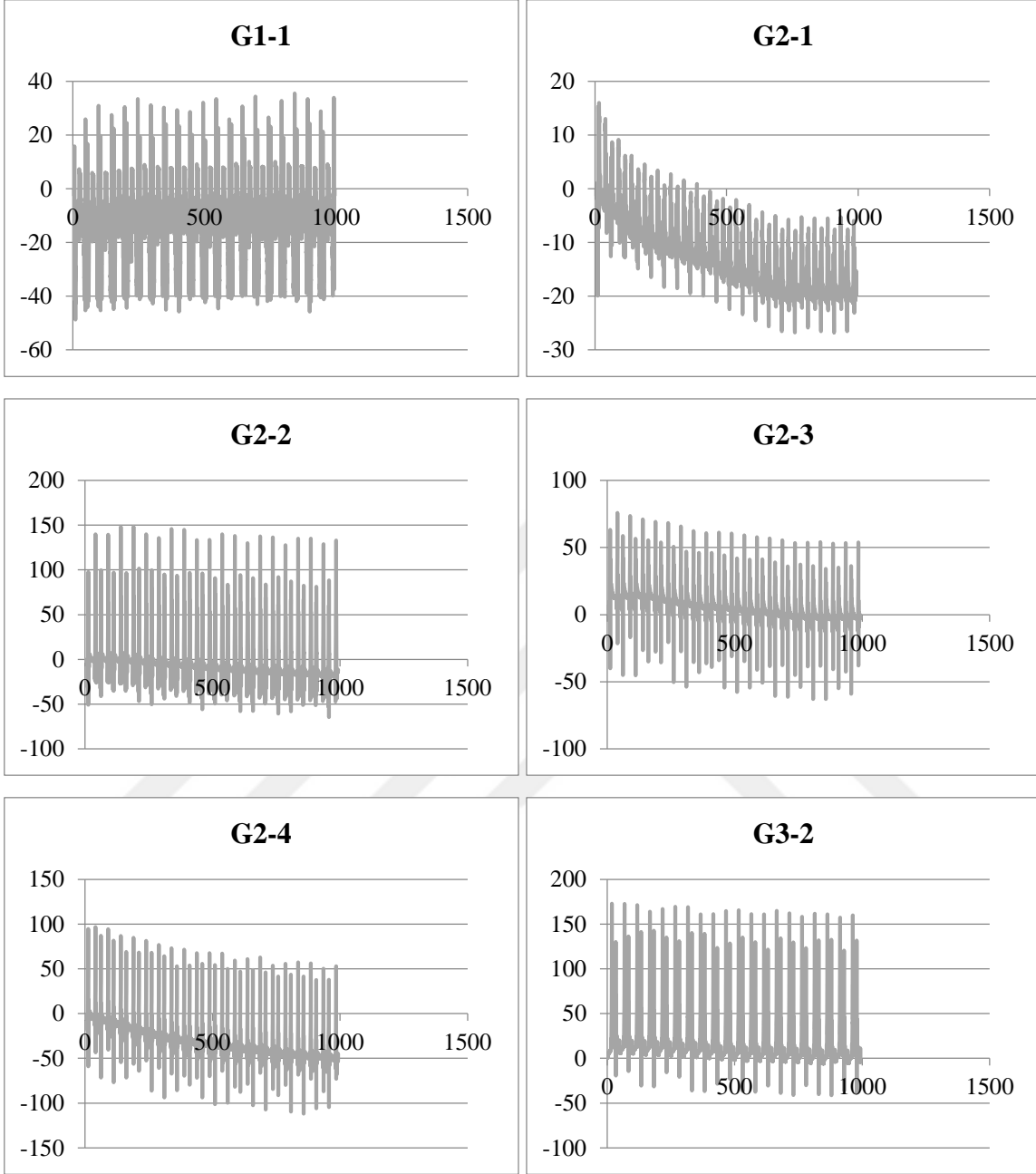
Güney Tarafı Gerinim Ölçümleri (15000 Geçiş)-Yatay eksen (sn), Dikey Eksen ($\epsilon \cdot 10^{-6}$)

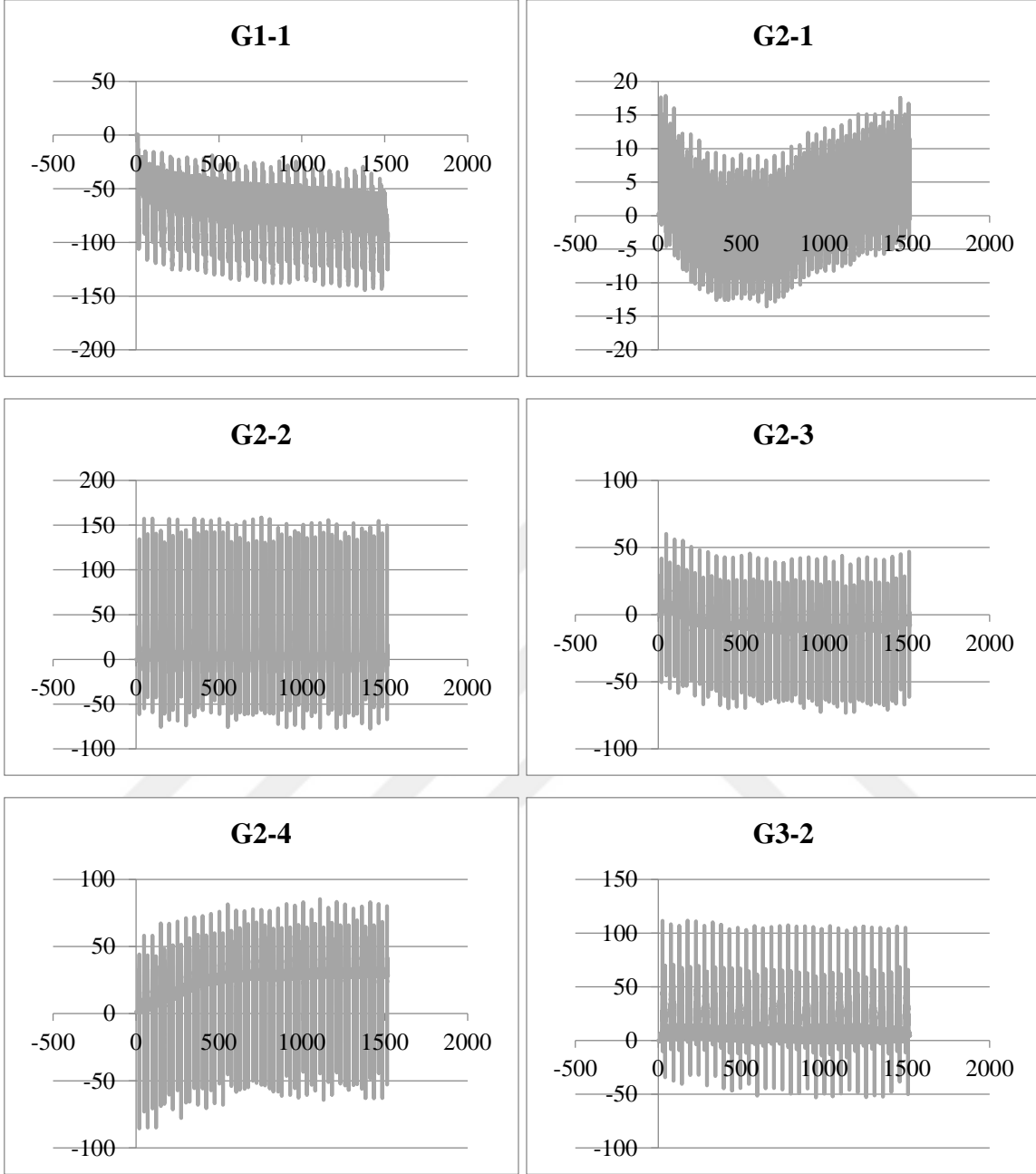


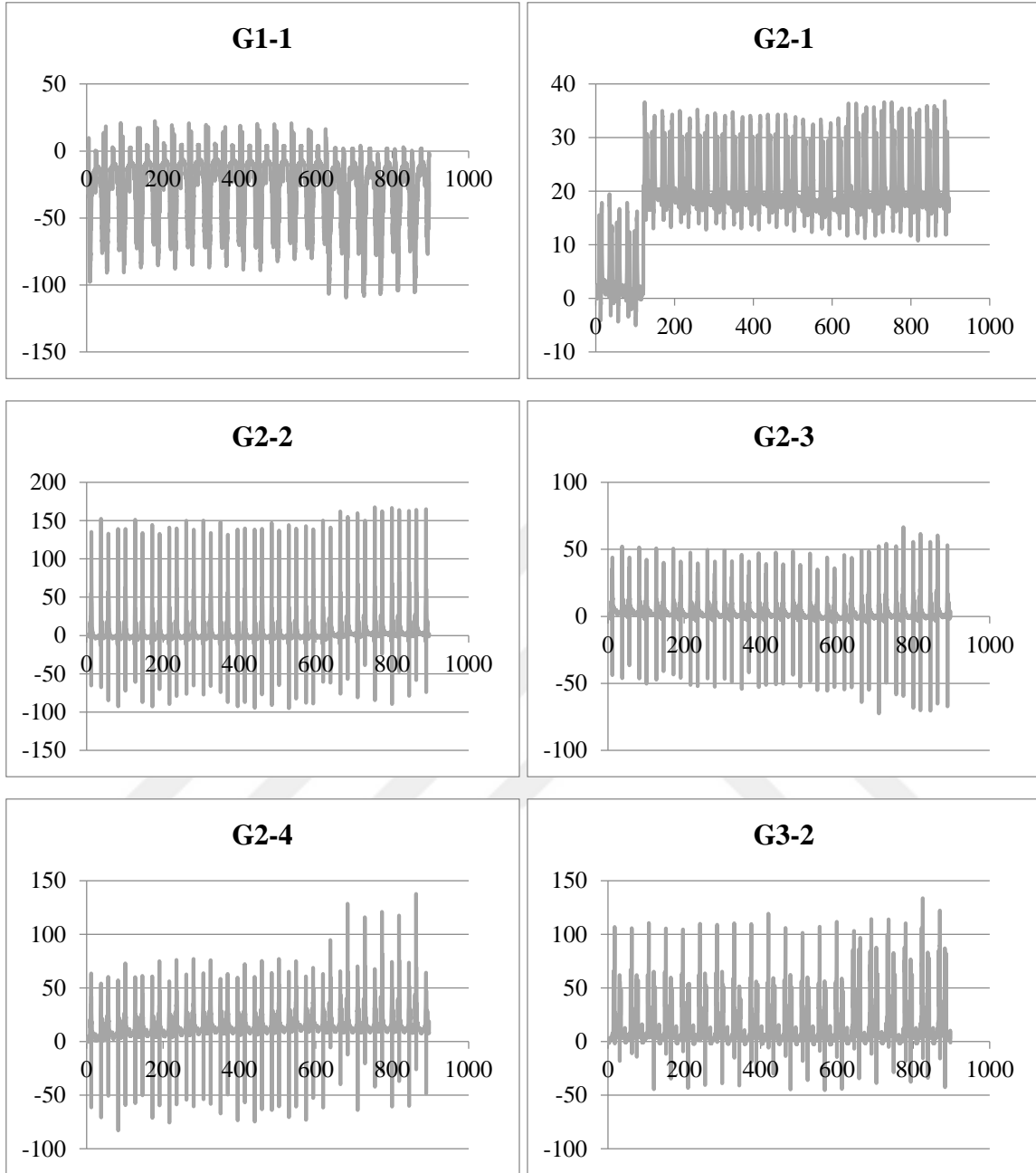
Güney Tarafı Gerinim Ölçümleri (20000 Geçiş)-Yatay eksen (sn), Dikey Eksen ($\epsilon \cdot 10^{-6}$)

Güney Tarafı Gerinim Ölçümleri (25000 Geçiş)-Yatay eksen (sn), Dikey Eksen ($\epsilon \cdot 10^{-6}$)

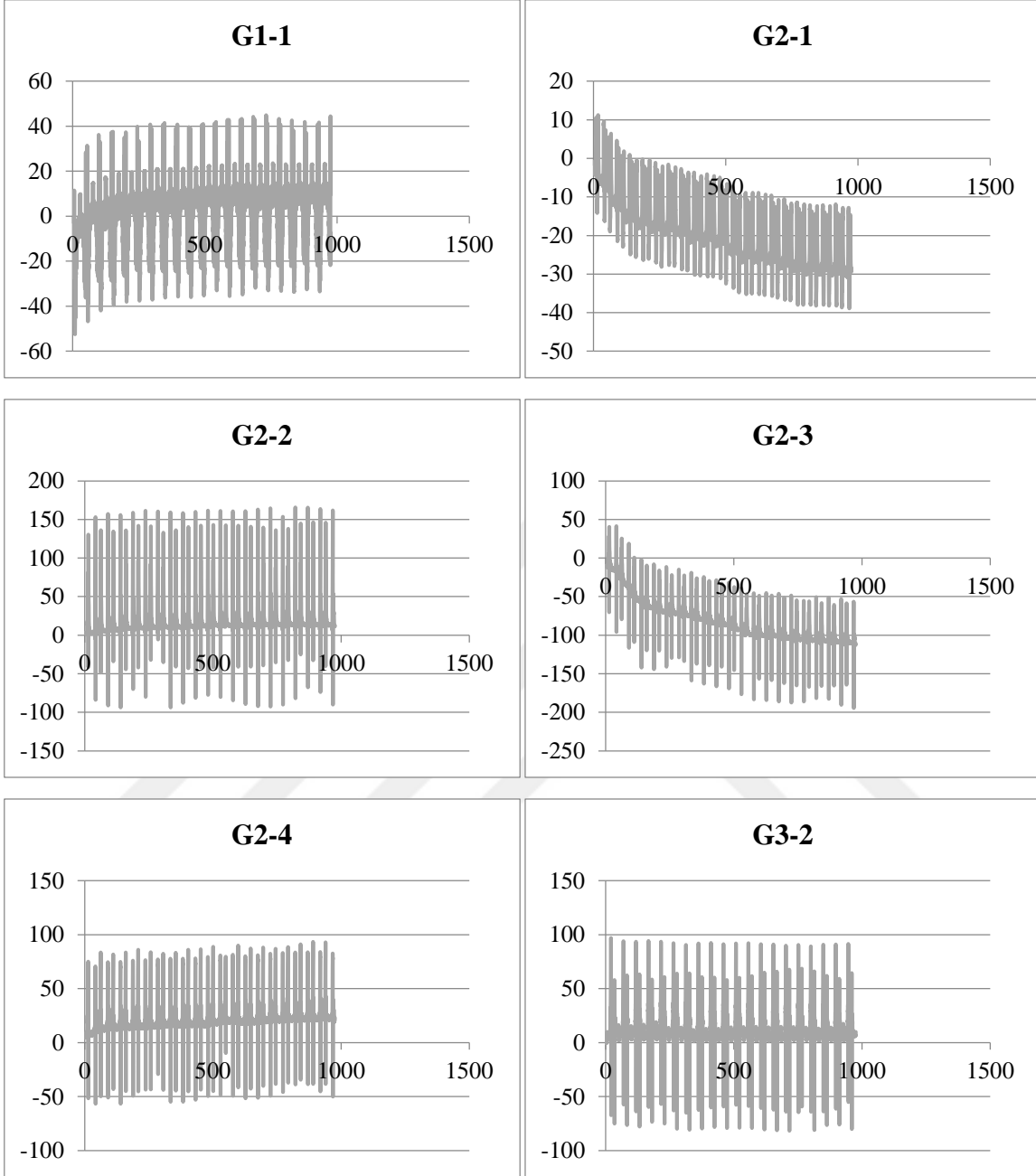
Güney Tarafı Gerinim Ölçümleri (30000 Geçiş)-Yatay eksen (sn), Dikey Eksen ($\epsilon \cdot 10^{-6}$)



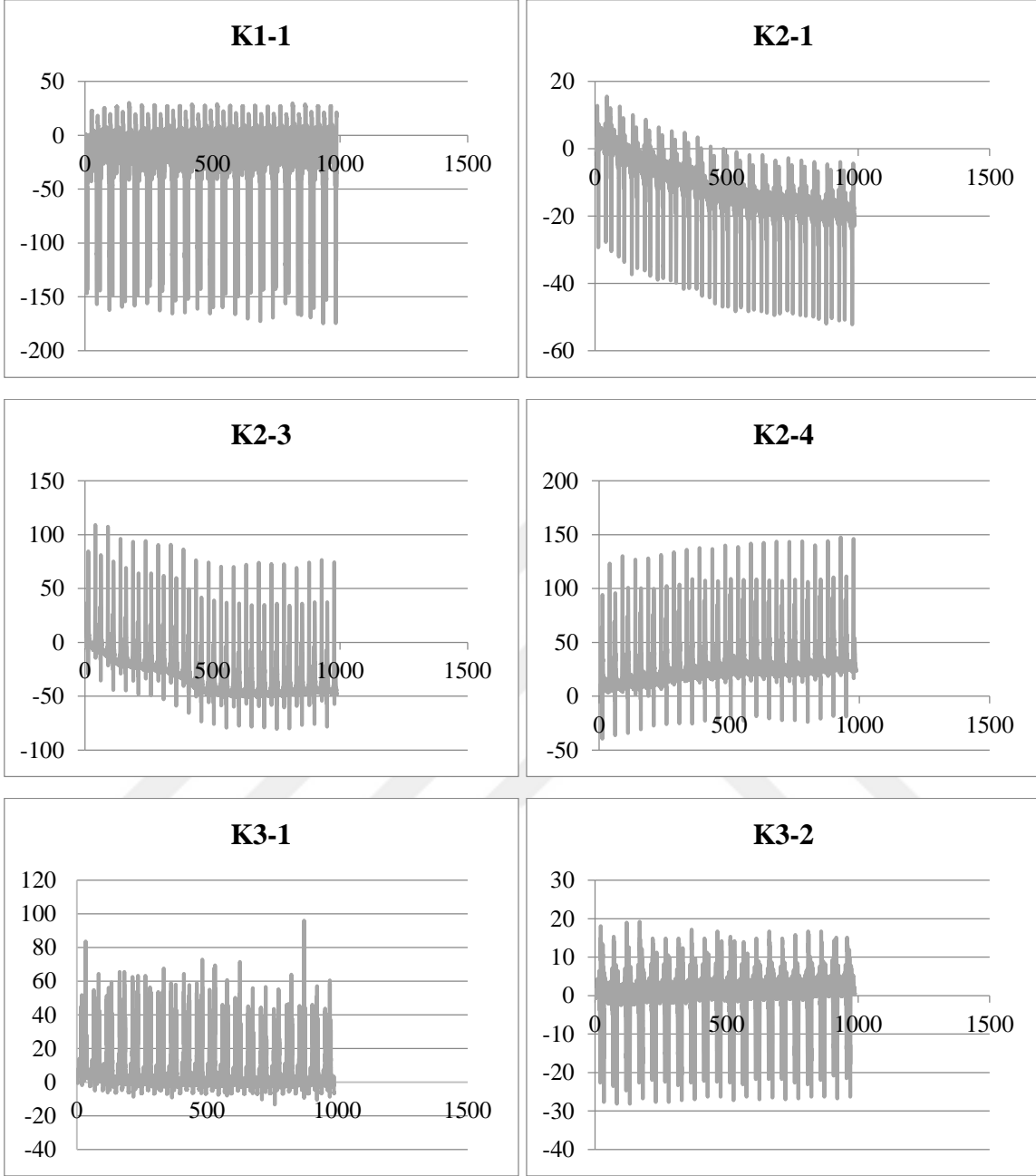
Güney Tarafı Gerinim Ölçümleri (50000 Geçiş)-Yatay eksen (sn), Dikey Eksen ($\epsilon \cdot 10^{-6}$)

Güney Tarafı Gerinim Ölçümleri (70000 Geçiş)-Yatay eksen (sn), Dikey Eksen ($\epsilon \cdot 10^{-6}$)

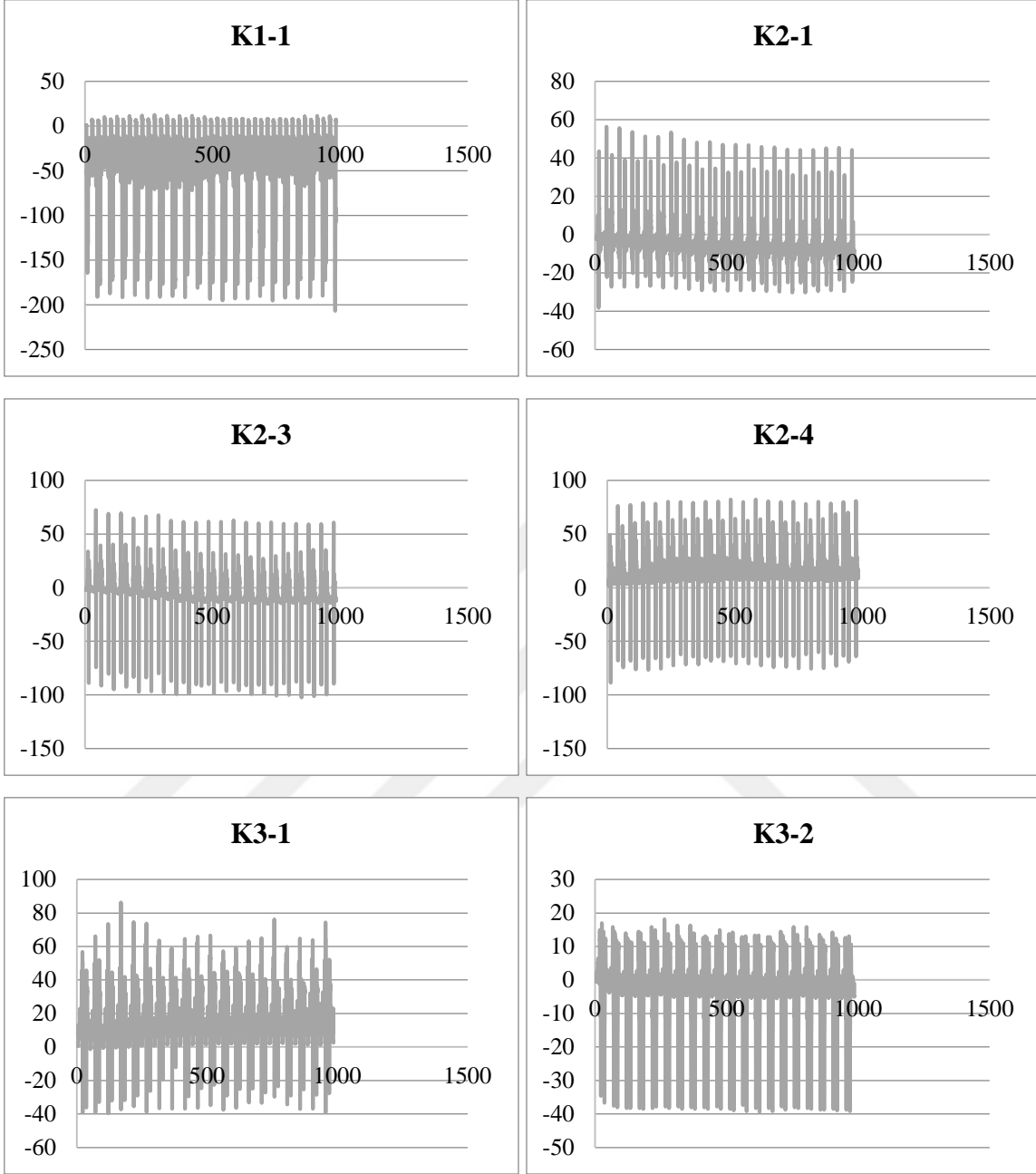
Güney Tarafı Gerinim Ölçümleri (100000 Geçiş)-Yatay eksen (sn), Dikey Eksen ($\epsilon \cdot 10^{-6}$)

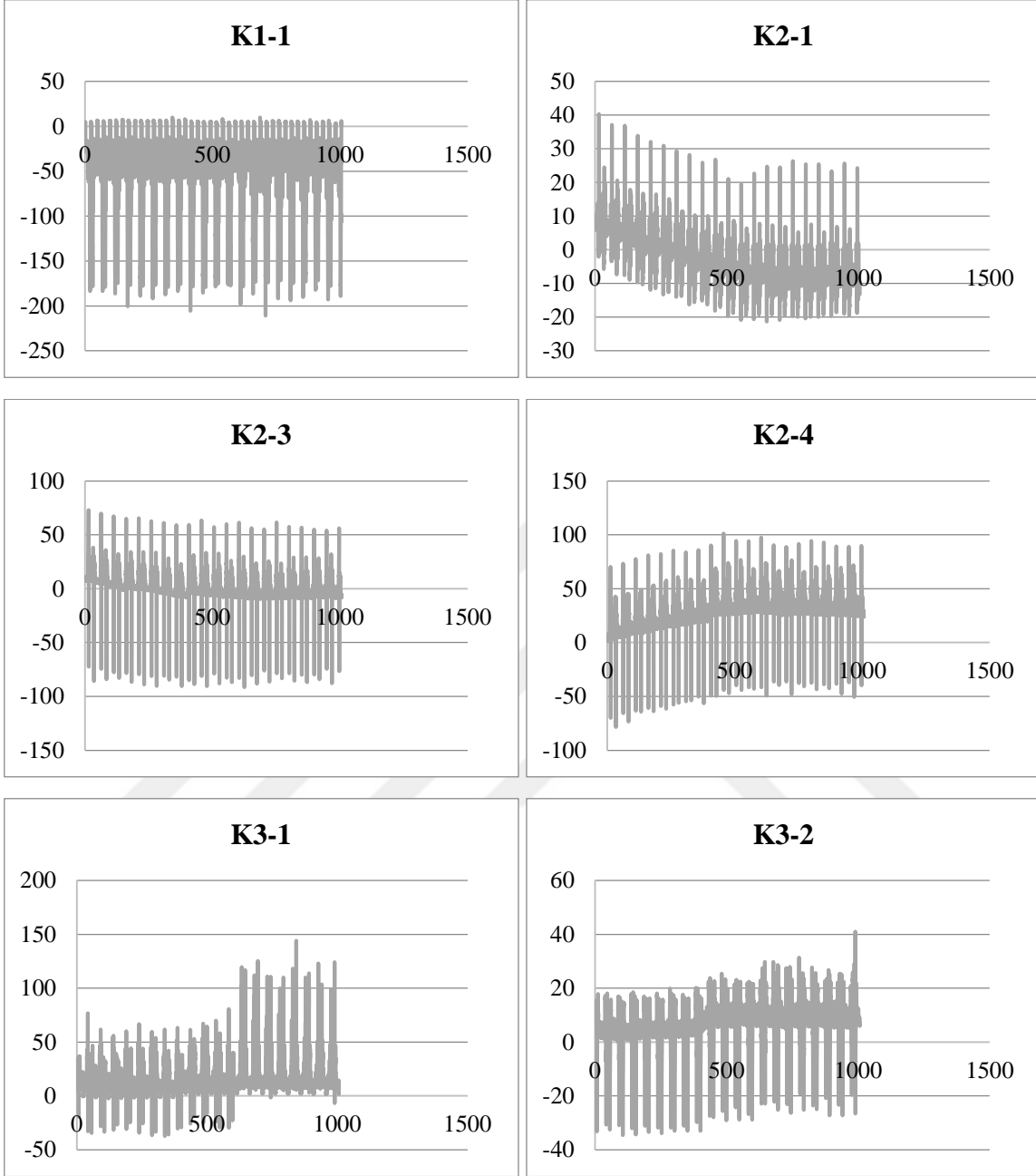


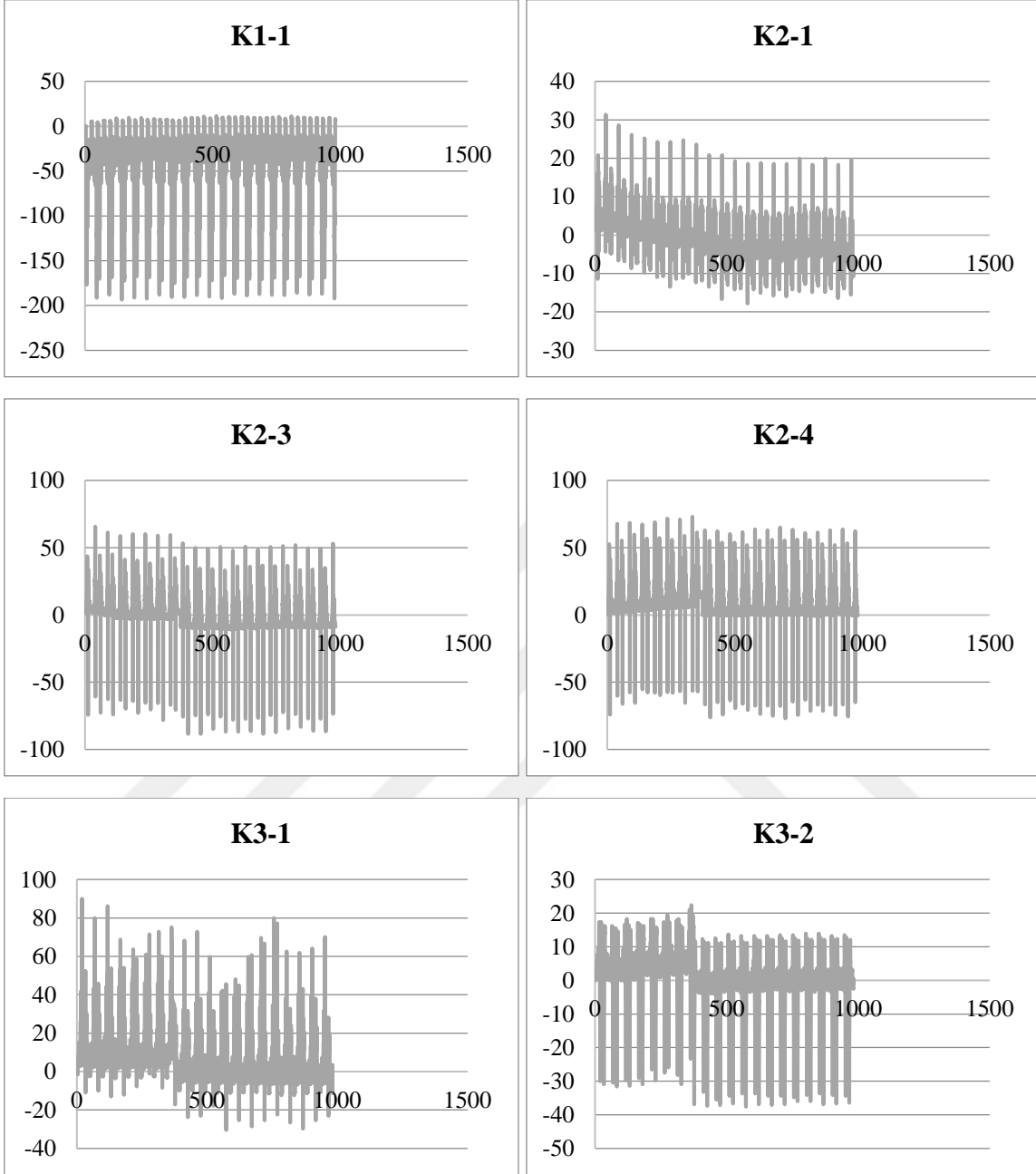
Kuzey Tarafı Gerinim Ölçümleri (0-20 Geçiş)-Yatay eksen (sn), Dikey Eksen ($\epsilon \cdot 10^{-6}$)

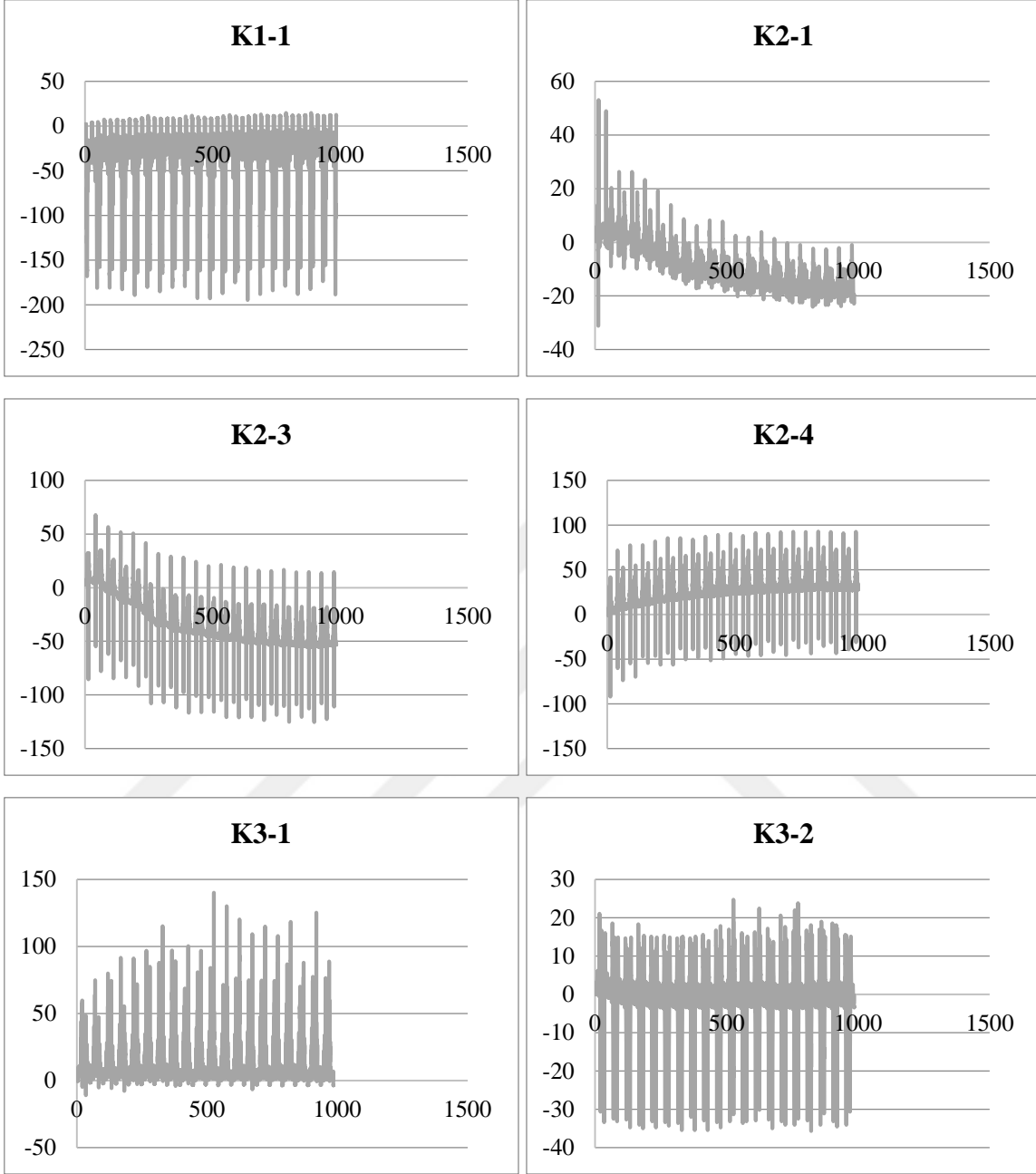


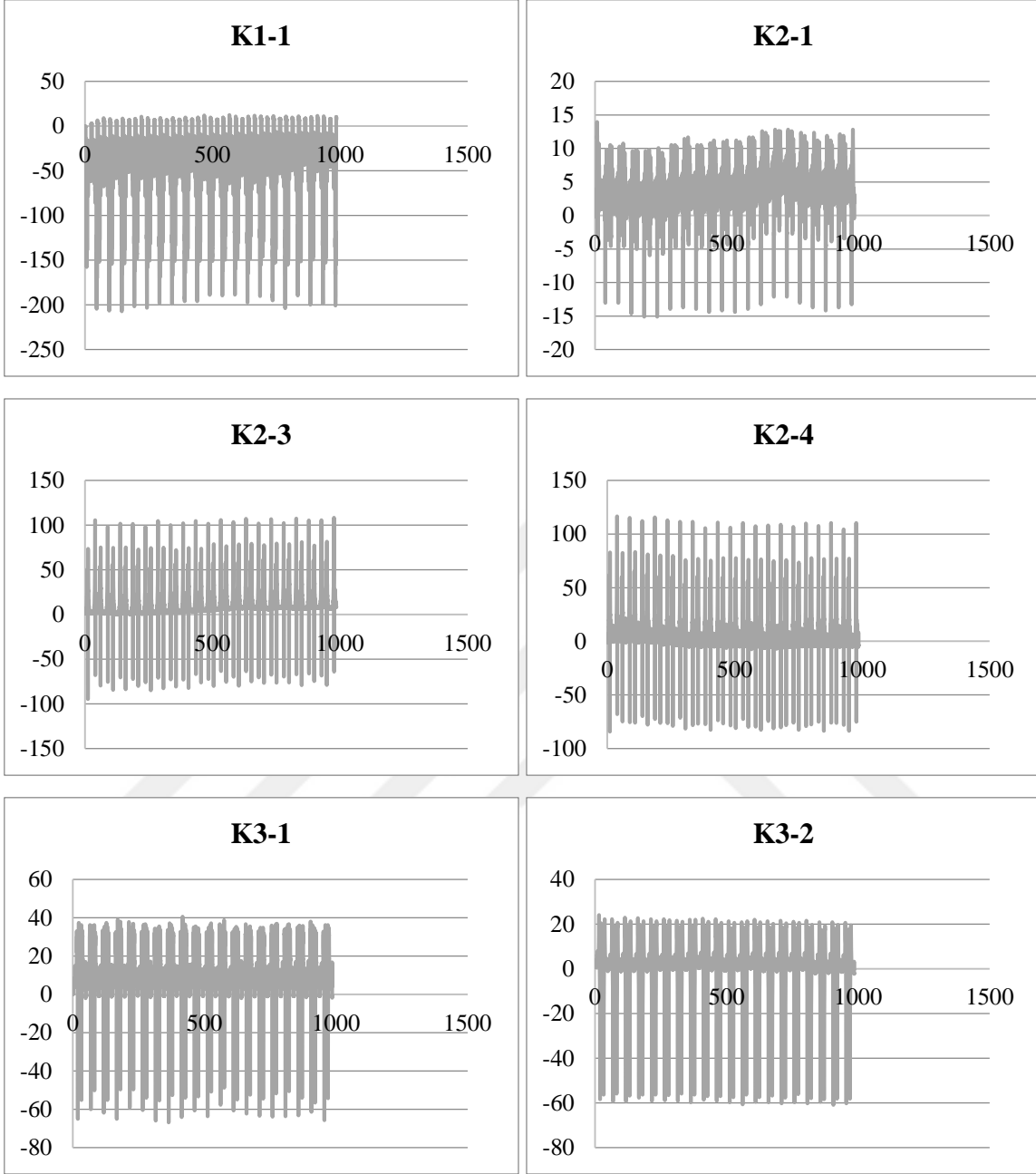
Kuzey Tarafı Gerinim Ölçümleri (6000 Geçiş)-Yatay eksen (sn), Dikey Eksen ($\epsilon \cdot 10^{-6}$)



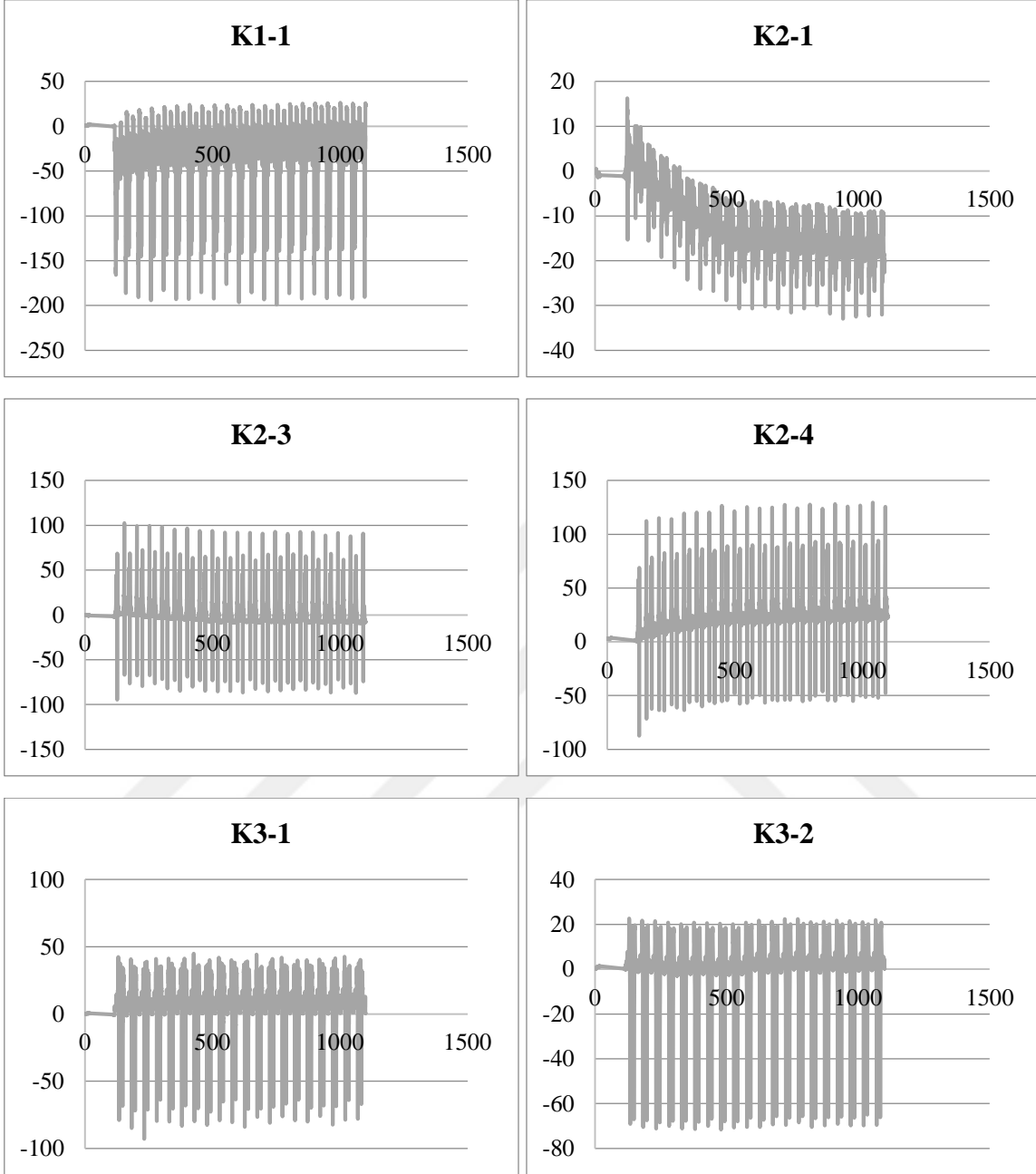
Kuzey Tarafı Gerinim Ölçümleri (7000 Geçiş)-Yatay eksen (sn), Dikey Eksen ($\epsilon \cdot 10^{-6}$)

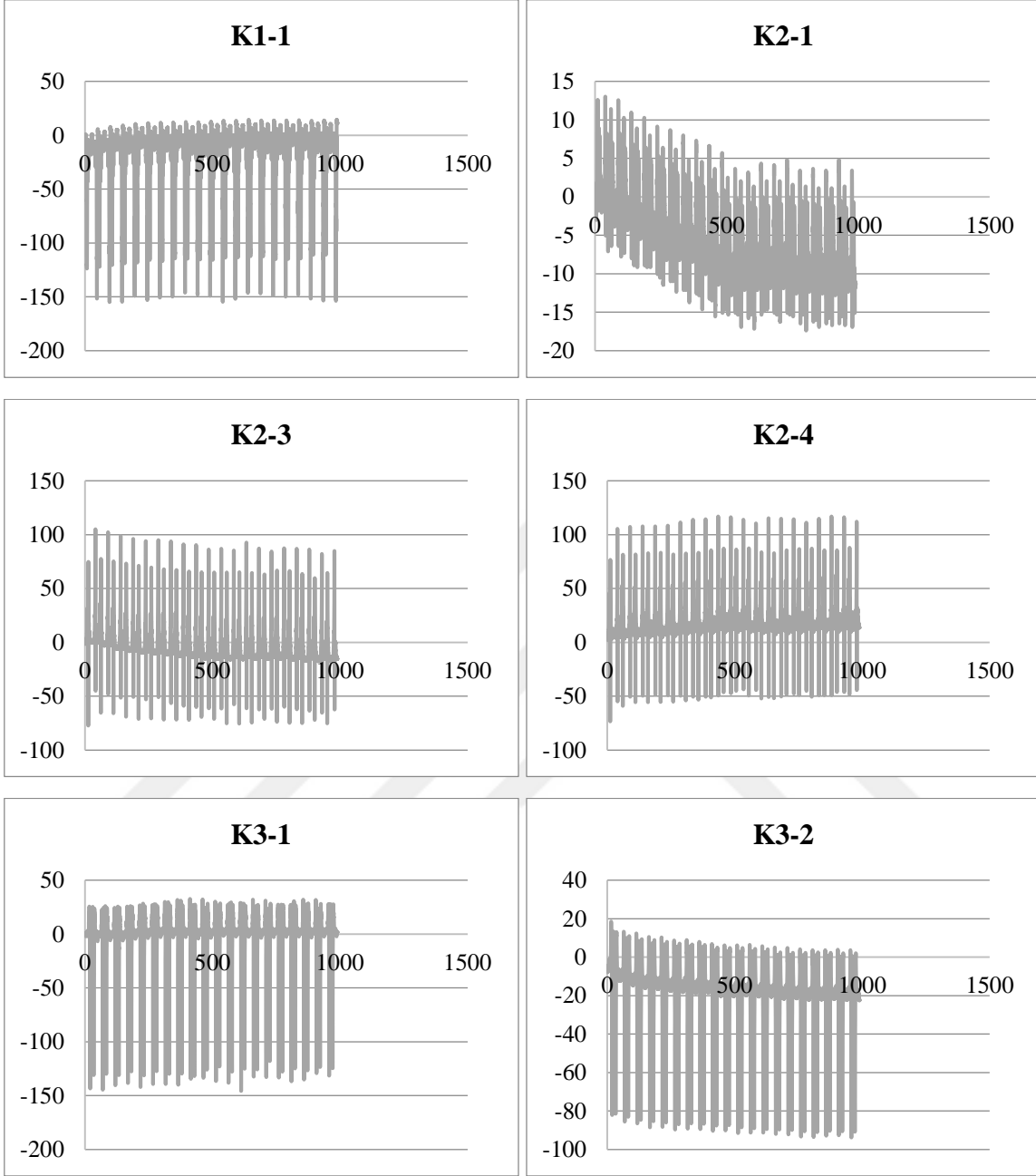
Kuzey Tarafı Gerinim Ölçümleri (8500 Geçiş)-Yatay eksen (sn), Dikey Eksen ($\epsilon \cdot 10^{-6}$)

Kuzey Tarafı Gerinim Ölçümleri (11500 Geçiş)-Yatay eksen (sn), Dikey Eksen ($\epsilon \cdot 10^{-6}$)

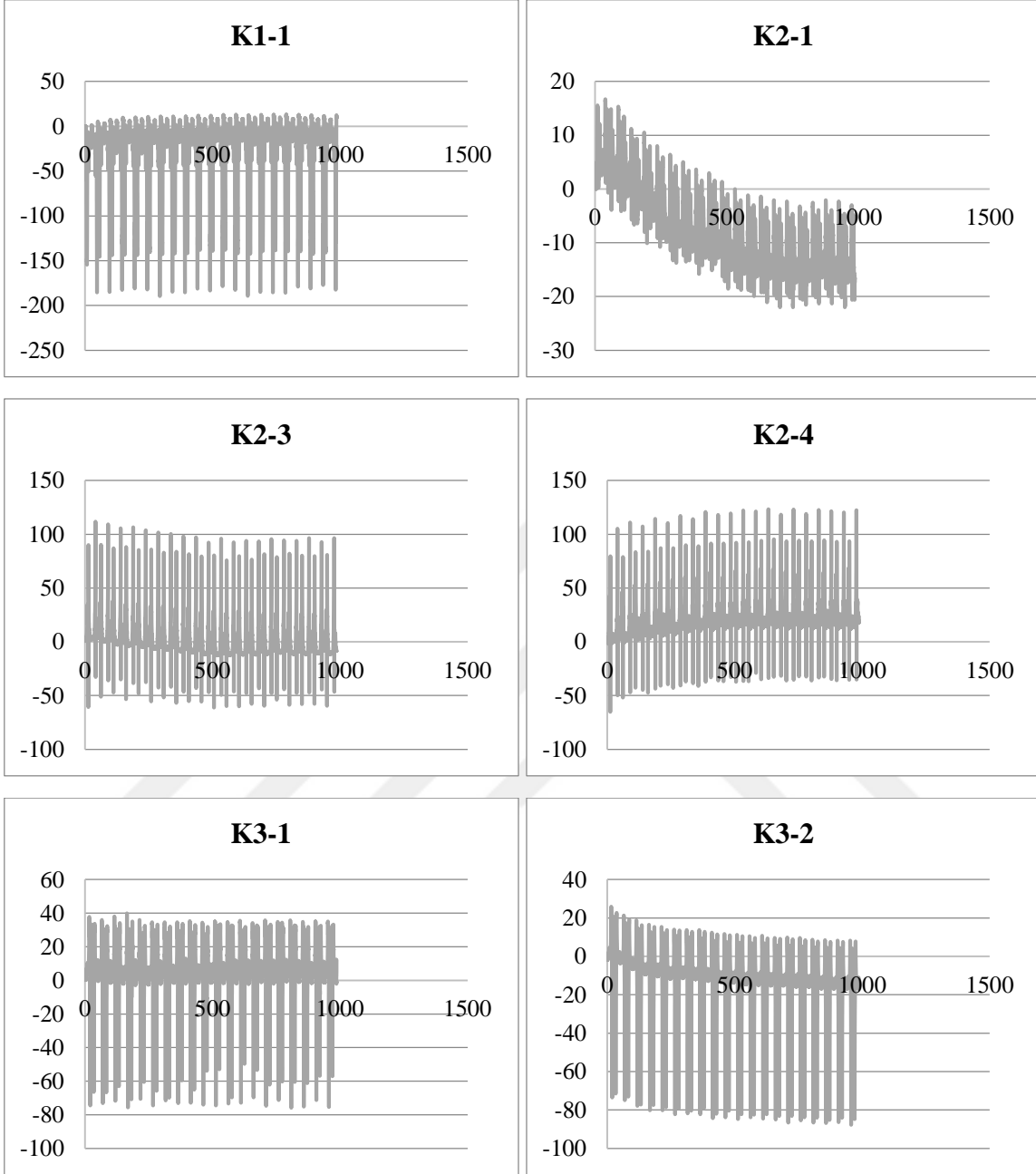
Kuzey Tarafı Gerinim Ölçümleri (15000 Geçiş)-Yatay eksen (sn), Dikey Eksen ($\epsilon \cdot 10^{-6}$)

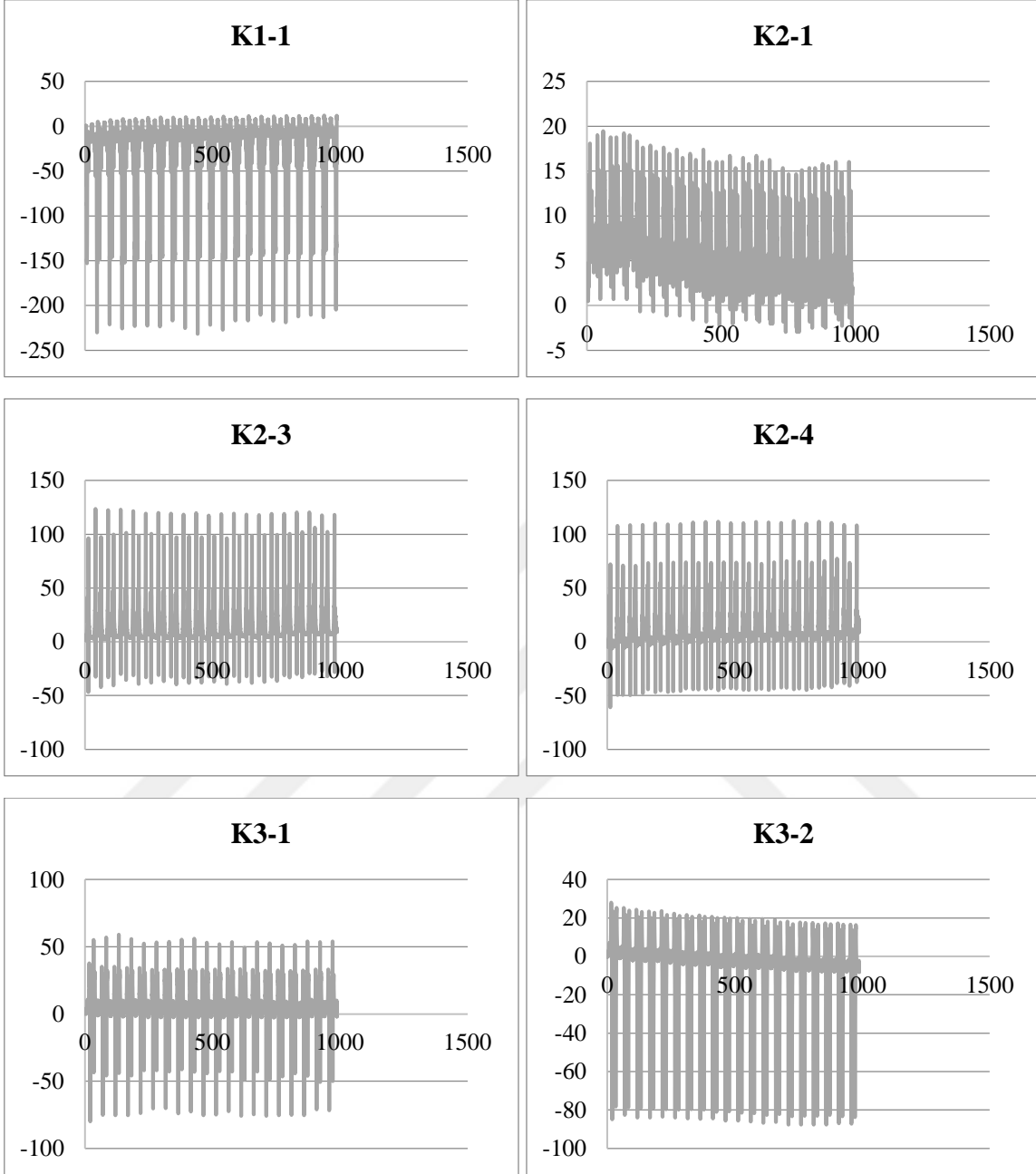
Kuzey Tarafı Gerinim Ölçümleri (20000 Geçiş)-Yatay eksen (sn), Dikey Eksen ($\epsilon \cdot 10^{-6}$)

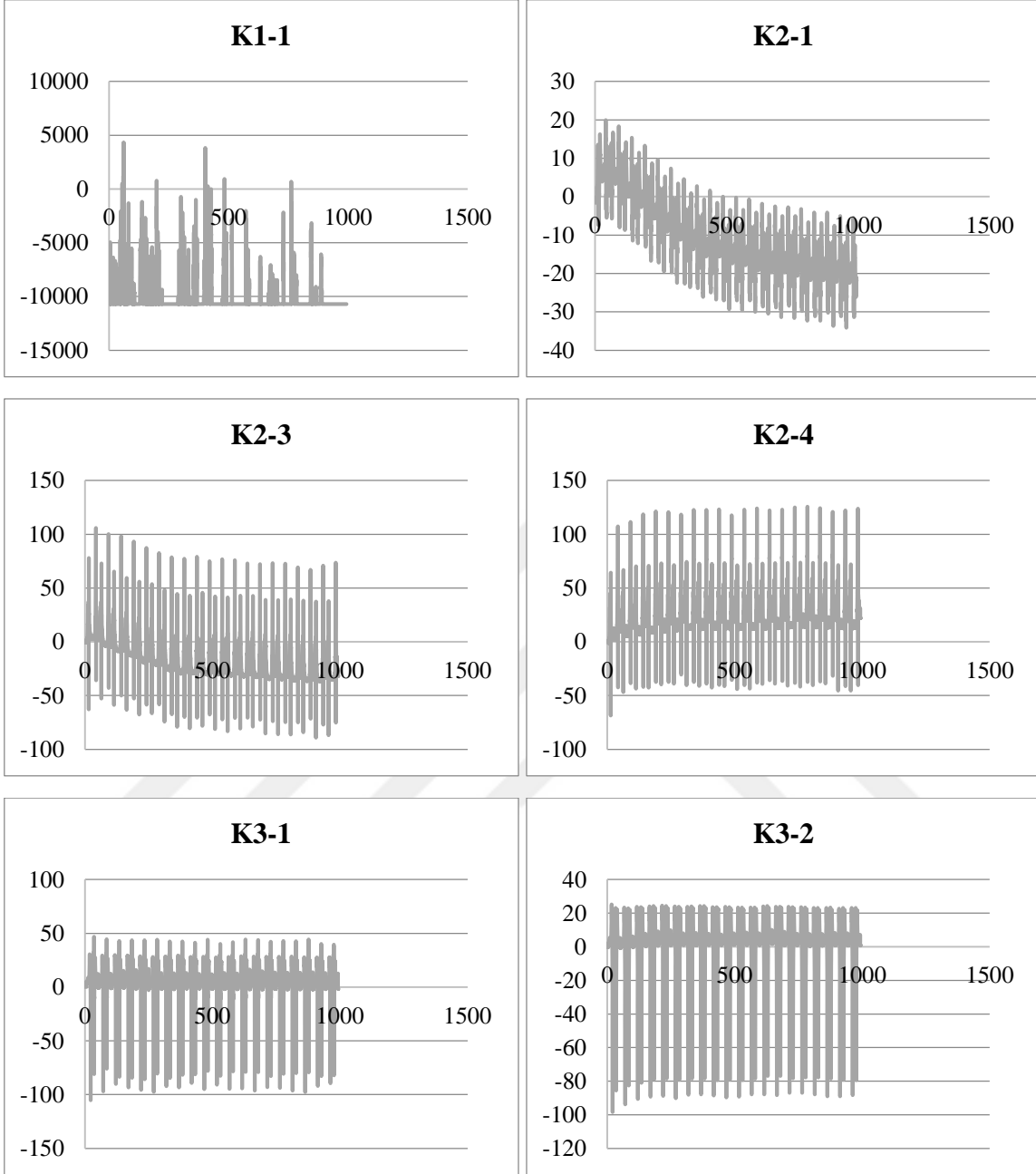


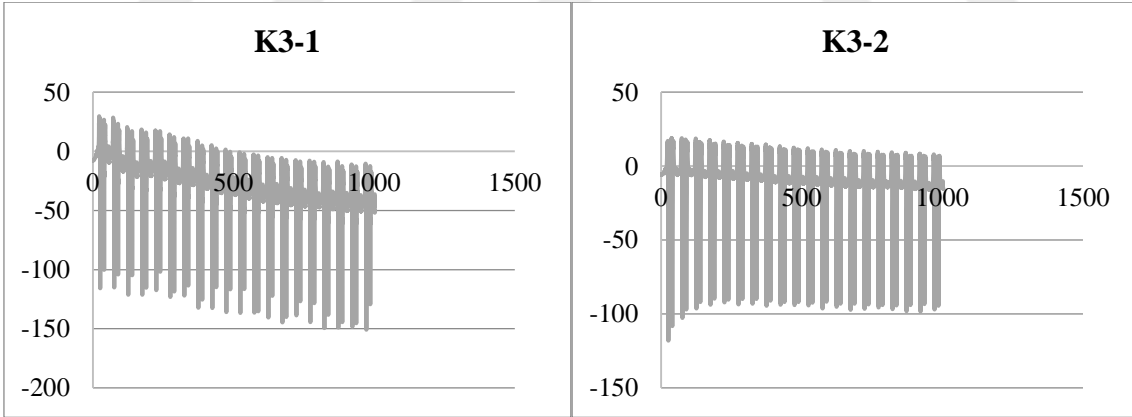
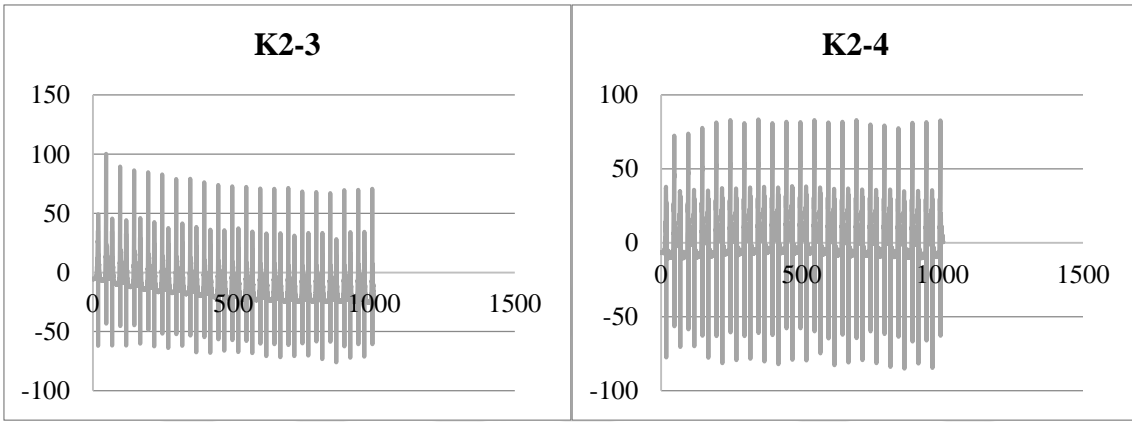
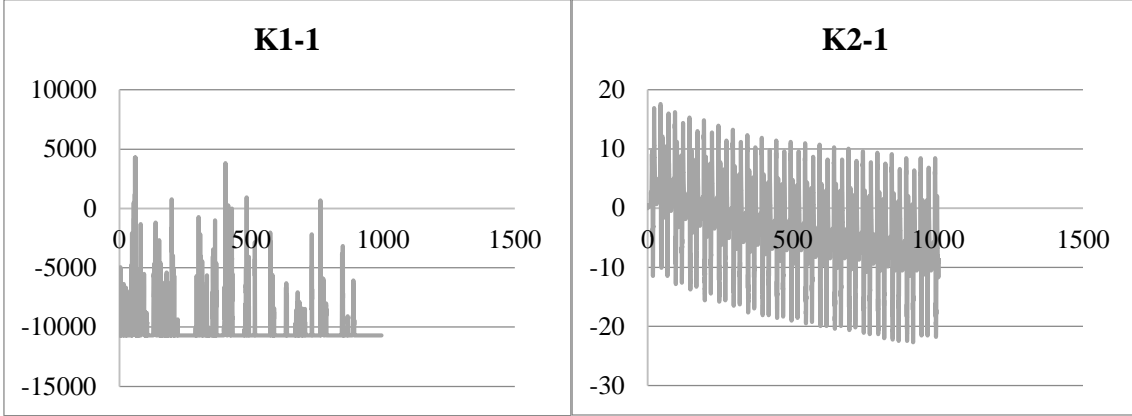
Kuzey Tarafı Gerinim Ölçümleri (25000 Geçiş)-Yatay eksen (sn), Dikey Eksen ($\epsilon \cdot 10^{-6}$)

Kuzey Tarafı Gerinim Ölçümleri (30000 Geçiş)-Yatay eksen (sn), Dikey Eksen ($\epsilon \cdot 10^{-6}$)

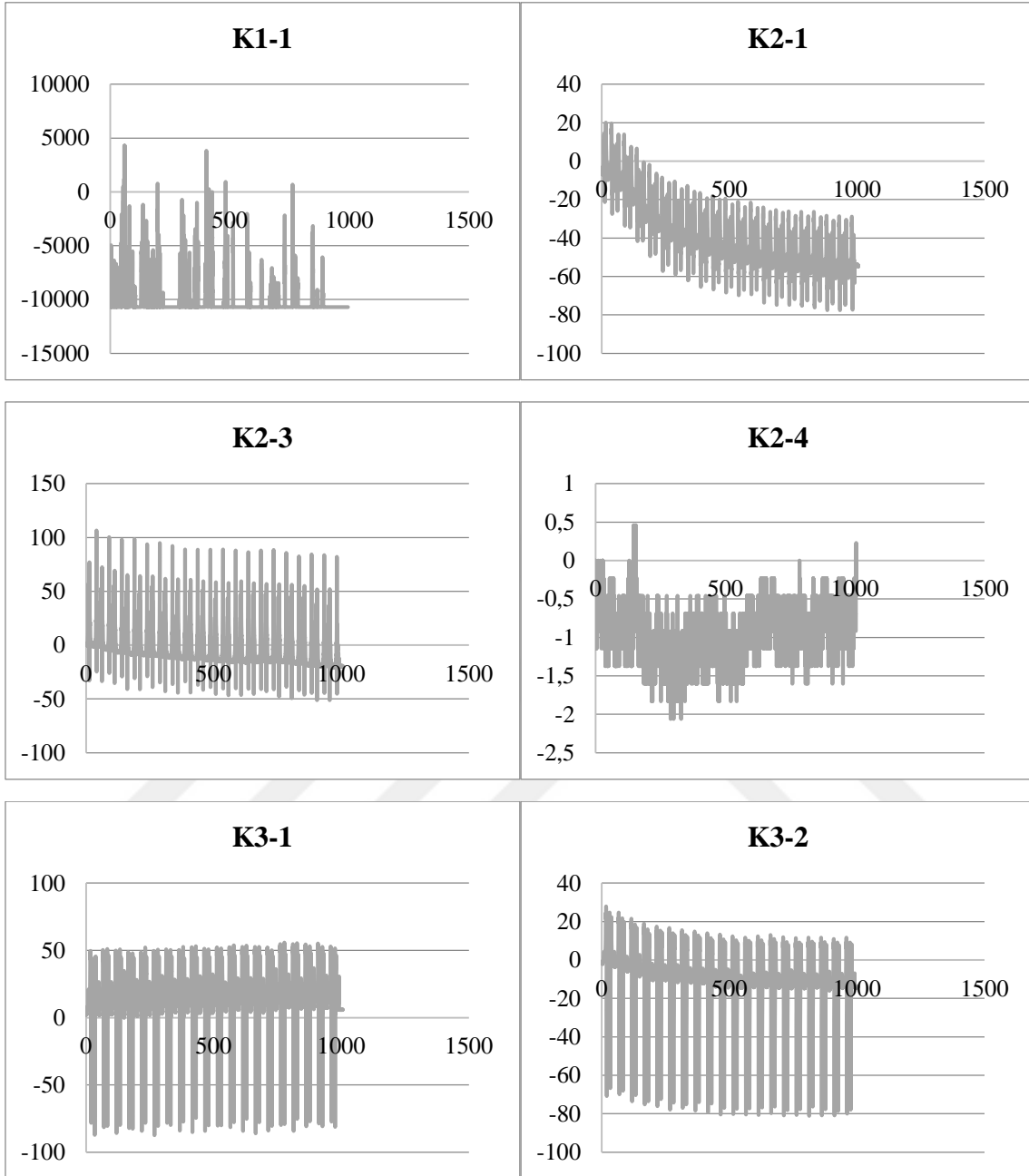


Kuzey Tarafı Gerinim Ölçümleri (40000 Geçiş)-Yatay eksen (sn), Dikey Eksen ($\epsilon \cdot 10^{-6}$)

Kuzey Tarafı Gerinim Ölçümleri (50000 Geçiş)-Yatay eksen (sn), Dikey Eksen ($\epsilon \cdot 10^{-6}$)

Kuzey Tarafı Gerinim Ölçümleri (70000 Geçiş)-Yatay eksen (sn), Dikey Eksen ($\epsilon \cdot 10^{-6}$)

Kuzey Tarafı Gerinim Ölçümleri (100000 Geçiş)-Yatay eksen (sn), Dikey Eksen ($\epsilon \cdot 10^{-6}$)



ÖZGEÇMİŞ

Muhammet ÇELİK, 1984 yılında Rize'de doğdu. 2002 yılında Ankara Kalaba Anadolu Lisesinden mezun oldu. Aynı yıl Gazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümüne girdi. 2008 yılında mezun oldu. 2007 yılından itibaren özel sektörde çalışmaya başladı. 2009 yılında Sinop İl Özel İdaresinde çalışmaya başladı. 2012 yılında Trabzon İl Afet ve Acil Durum Müdürlüğüne tayin oldu ve halen burada çalışmakta. 2012 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesinde İnşaat Mühendisliği Bölümünde Yüksek Lisans programına başladı, 2014 yılında mezun oldu ve aynı yıl aynı bölümde Doktora Eğitimine başladı. 2018 Haziran ayından beri 117M120 numaralı TÜBİTAK 1001 Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projeleri Destekleme Programında araştırmacı olarak çalışmaktadır. Evli ve iki çocuk babası olan Muhammet ÇELİK İyi derece İngilizce bilmektedir.